

19. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

TAGUNGSBAND

ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE

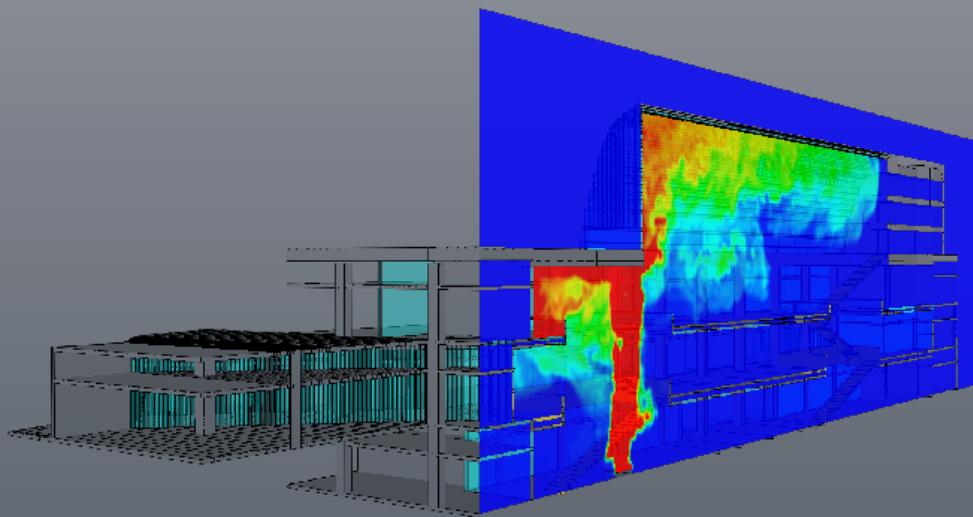
Datum:

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 Hennen	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 KI-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 General-Purpose- und Domain-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-Tagungsbanden 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



09.10.2025

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



09.10.2025

2

Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

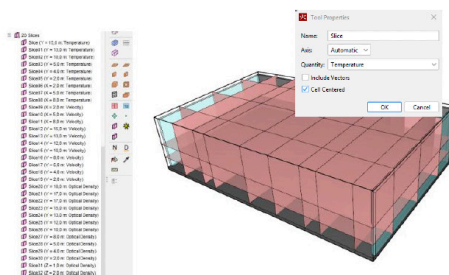




Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele - Nomenklatur von Slices mit ChatGPT

1. Slices in PyroSim erstellen



2. ChatGPT beauftragen eine ID zu vergeben

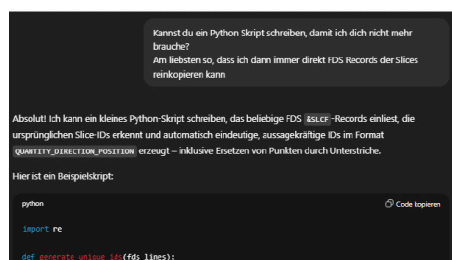


Name	XYZ Plane	Plane Values	Cell Plane Quantity
1 TE_X_0_m	Y	100m	Temperature
2 TE_X_1_m	Y	100m	Temperature
3 TE_X_2_m	Y	100m	Temperature
4 TE_X_3_m	Y	100m	Temperature
5 TE_X_4_m	Y	100m	Temperature
6 TE_X_5_m	Y	100m	Temperature
7 TE_X_6_m	Y	100m	Temperature
8 TE_X_7_m	Y	100m	Temperature
9 TE_X_8_m	Y	100m	Temperature
10 TE_X_9_m	Y	100m	Temperature
11 TE_X_10_m	Y	100m	Temperature
12 TE_X_11_m	Y	100m	Temperature
13 TE_X_12_m	Y	100m	Temperature
14 TE_X_13_m	Y	100m	Temperature
15 TE_X_14_m	Y	100m	Temperature
16 TE_X_15_m	Y	100m	Temperature
17 TE_X_16_m	Y	100m	Temperature
18 TE_X_17_m	Y	100m	Temperature
19 TE_X_18_m	Y	100m	Temperature
20 TE_X_19_m	Y	100m	Temperature

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 = ""

    &SLCF QUANTITY="OPTICAL DENSITY", CELL_CENTERED=TRUE., ID="Slice", PBV=9.1/
    &SLCF QUANTITY="VELOCITY", VECTOR=TRUE., CELL_CENTERED=TRUE., ID="Slice01", PBV=6.1/
    &SLCF QUANTITY="TEMPERATURE", CELL_CENTERED=TRUE., ID="Slice02", PBV=2.5/
    """

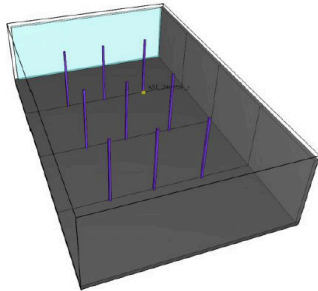
    lines = input_text.strip().splitlines()
    updated_lines = generate_unique_ids(lines)
    for l in updated_lines:
        print(l)

    &SLCF QUANTITY="OPTICAL DENSITY", CELL_CENTERED=TRUE., ID="00_Y_9_1_m", PBV=9.1/
    &SLCF QUANTITY="VELOCITY", VECTOR=TRUE., CELL_CENTERED=TRUE., ID="VE_Y_6_1_m", PBV=6.1/
    &SLCF QUANTITY="TEMPERATURE", CELL_CENTERED=TRUE., ID="TE_Y_2_5_m", PBV=2.5/
```

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Anwendungsbeispiele – Erstellen von DEVC mit ChatGPT

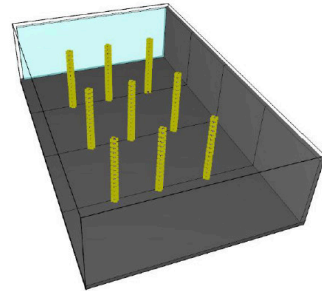
1. Beispiel Messpunkt in PyroSim erstellen



2. ChatGPT beauftragen Messpunkte nach gewünschter Logik zu erstellen

[illegible]

3. Messpunkte (540 Stück) in PyroSim kopieren

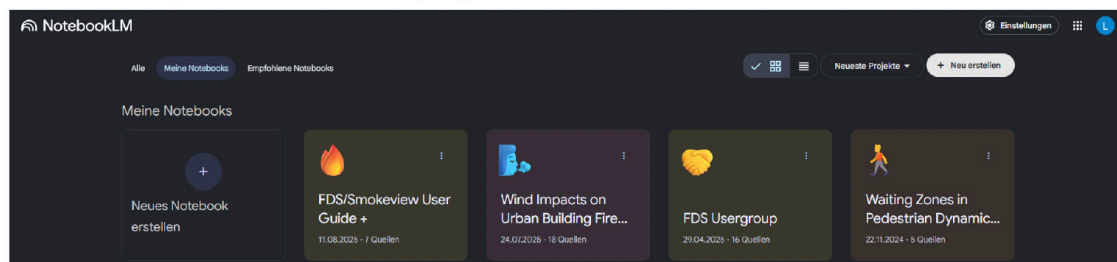


Quellenarbeit - NotebookLM

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 Quellenachweis und Verknüpfung zur Textstelle



09.10.2025 9 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



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?



09.10.2025 10 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



FDS/Smokeview User Guide +

Quellen

+ Hinzufügen Entdecken

Alle 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 brandgetriebenen Fluidströmungen, einschließlich Gleichungen für den Impulstransport, Turbulenzmodelle wie das Deardorff-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 Strahlungstransportgleichung. Die Verification und 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 Notiz speichern

Video-Zusammenfassung Audio-Zusammenfassung Mindmap

Text eingeben... 7 Quellen

Wie beeinflussen turbulente Modelle und numerische Schemata die Genauigkeit der FDS-Simulationen? Welche primär...

Notiz hinzufügen

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

brandwerk fse

FDS/Smokeview User Guide +

Quellen

+ Hinzufügen Entdecken

Alle 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 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:

1. Empfohlenes Maximalverhältnis (Vermeidung von Informationsverlust):

- Mesh-Verfeinerungsverhältnisse von mehr als 4:1 sollten nach Möglichkeit vermieden werden.
- Eine Änderung der Gitterauflösung 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) aufw.
- Dies bedeutet, dass Meshes so ausgerichtet sein müssen, dass feine Zellen auf dem angrenzenden Mesh bedeckt ist. Eine benachbarte Mesh sehen.

3. Numerische Konsequenzen bei Verfeinerung:

- Wenn die Zellgrößen an der Meshgrenze nicht identisch dargestellt werden, muss der Informationsaustausch zwischen den Meshes an der Meshgrenze beachtet werden.
- Als verfeinerten Meshgrößen wird First-order Upwind benutzt, da es die besten Ergebnisse liefert.

Case	Mesh Interface	Notes
1	matched interface	no special treatment required
2	misaligned interface	use of ADIABATIC as a solid phase boundary condition. This parameter should only be used for testing because no solid material has a thermal conductivity of zero. Using this parameter can cause unphysical fluctuations at the solid-gas interface.

Text eingeben...

Wie beeinflussen turbulente Modelle und numerische S...

FDS_User_Guide.pdf

Notiz hinzufügen

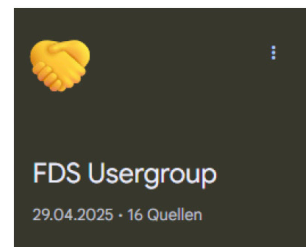
09.10.2025 12 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

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

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_18Band.pdf
- FDS_UG_28Band.pdf
- FDS_UG_38Band.pdf
- FDS_UG_48Band.pdf
- FDS_UG_58Band.pdf
- FDS_UG_68Band.pdf
- FDS_UG_88Band.pdf
- FDS_UG_98Band.pdf

Chat

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

Text eingeben...

Welche Methoden und Kriterien werden zur Verifikation und Validierung von FDS Simulationen genutzt?

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

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

The screenshot displays the FDS Usergroup interface, which is divided into three main sections: Quellen (Sources), Chat, and Studio.

Quellen (Sources): A list of 14 PDF documents, all titled "FDS_UG_...pdf", with checkboxes next to them.

Chat: A central window showing a table of research papers. The table has three columns: Author, Title, and Content. The papers are:

Author	Title	Content
Schroder (2016)	Beispiel einer unterirdischen Personenverkehrsanlage	hinsichtlich multipler Leistungskriterien aufgelöst werden kann. Der Ansatz zur HRR wird im Rahmen von Brandszenarien und Leistungskriterien diskutiert, eine spezifische HRR-Angabe fehlt jedoch.
Fabian Brännström (2016)	Einfluss der 1D-Wärmeleitungsmodellierung für ausgewählte Testfälle aus der Bahn-Industrie	Es werden Simulationen zur Unterstützung des Brandschutzes in der Zugindustrie durchgeführt, oft aufgrund von normativen Anforderungen (z.B. EN). Der Beitrag vergleicht die Ergebnisse der 1D-Wärmeleitungsmodellierung für ausgewählte Testfälle aus der Bahn-Industrie mit einer 3D-Modellierung. Die Berechnungen basieren auf Star-CCM++/fireFOAM und werden mit FDS-Ergebnissen gegenübergestellt. (HRR Kontext: Die HRR ist die treibende Kraft, deren Auswirkungen auf die Wärmeleitung untersucht werden, aber es werden keine spezifischen Werte im Abstract genannt).
Patrick Lauer / Manuel	Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen mittels KI-	Der Vortrag beleuchtet die Anwendung von Brandsimulationen in Schienenfahrzeugen, wobei realitätsnahe Brandereignisse aufgrund des hohen Sicherheitsniveaus selten sind. Es werden die aktuell verwendeten CFD-Methoden vorgestellt und mit den Plänen eines Forschungsprojekts verglichen.

Below the table is a text input field with the placeholder "Text eingeben..." and a button "16 Quellen".

Studio: A sidebar on the right containing various tools and documents. The tools include: Audio-Zusammenfassung, Videoübersicht, Mindmap, Berichte, Karteikarten, and Quiz. Below these are three document cards: "FDS in der Praxis: Einblicke in 15 Jahr...", "FDS Anwendertreffen...", and "FDS Usergroup 2008 Meeting...". At the bottom of the Studio sidebar is a button "Notiz hinzufügen".

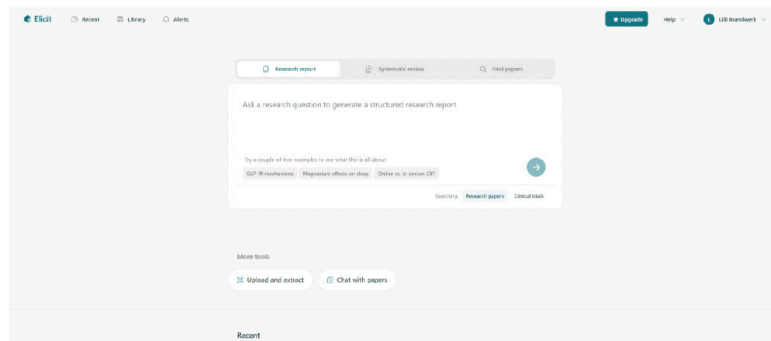
At the bottom of the interface, there is a footer bar with the date "09.10.2025", the page number "15", the text "Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen", and the logo for "brandwerk fse".

Literaturrecherche - Elicit

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Elicit

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



The screenshot displays the Elicit AI interface. At the top, there's a navigation bar with 'Elicit', 'Recent', 'Library', and 'Alerts'. A search bar contains the text 'Investigating Failure of Laminated Safety Glass in High Tempera...'. On the right, there are buttons for 'Upgrade', 'Help', and a user profile for 'Lilli Brandwerk'. Below the search bar, a 'Research report' is shown with a 'View only' dropdown. The main content area is divided into sections: 'ABSTRACT', 'METHODS', and 'RESULTS'. The 'ABSTRACT' section contains a paragraph about experimental research on fire failure of various glazing systems. The 'METHODS' section describes the analysis of 10 sources from an initial pool of 50. The 'RESULTS' section is titled 'Characteristics of Included Studies'. On the right side, a 'Citation details' panel is visible, showing 'Supporting quotes from 2 papers' and a quote from an 'Experimental study on fire performance of double-skin glass facades'. The quote discusses the fire performance of double-skin facades made with double glazing, mentioning preliminary tests, a full-scale facility, and three fire scenarios.

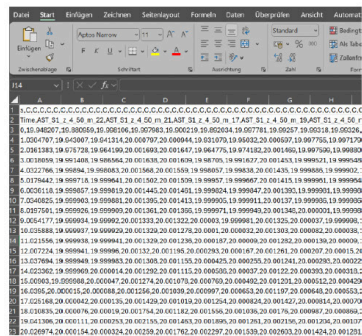
09.10.2025 19 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

brandwerk fse

Auswerteskripte - ChatGPT/Claude

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

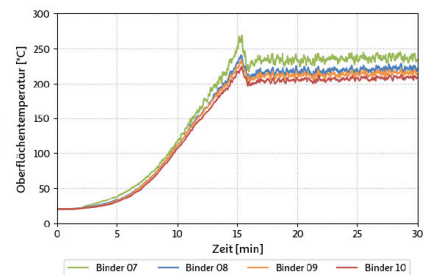
Anwendungsbeispiele - Auswerteskripte - Einstiegsbeispiel



 Claude

Ich habe eine csv Datei welche in der ersten Zeile die Einheit, in der zweiten Zeile die Messpunktbezeichnung ...

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

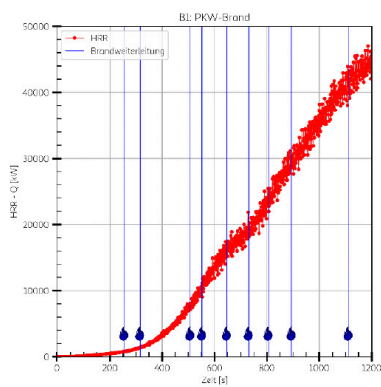


09.10.2025 21 Roth-Schuler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

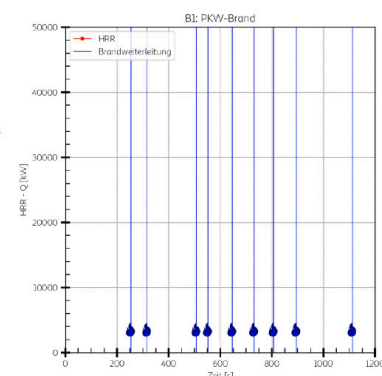


Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

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



Probleme und Handlungsempfehlungen

09.10.2025 23 Roth-Schüler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen

Probleme und Handlungsempfehlungen

- Datenschutz
- Umweltbelastung durch KI
- Cognitive Offloading und Verlust von Fähigkeiten vs. Performance 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

09.10.2025 24 Roth-Schüler | Pragmatischer KI-Einsatz im Brandschutzingenieurwesen



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

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 Pyrolysemodellierung 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 Wärmefreisetzungsrate des Brandes.

Probleme:

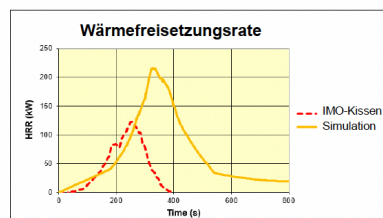
- Nicht normiert, lediglich individuelle Kundenforderungen.
- Kundenforderungen oft unklar.
- Grenze für die maximale HRR ohne weitere Spezifikation.
- Vollbrand versus lokaler Brand.

U-Bahn Wien, Lastenheft

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 initiierten Ereignisses durch IMO-Schaumstoffkissen erfolgen.

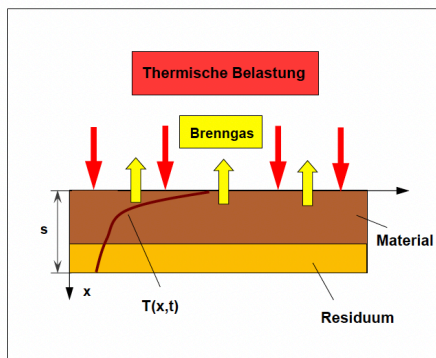
Projekt	Kriterium	Zündquelle
Metro Riyadh, 2013.	HRR < 30 MW (Vollbrand)	Nicht definiert
Metro Nürnberg, 2015	HRR < 250 kW (lokaler Brand)	TRStrab
U-Bahn Wien, 2019	HRR < 350 kW (lokaler Brand)	IMO-Kissen
HFX, 2019	HRR < 300 kW (lokaler Brand)	TRStab
Metro Ontario, 2021	HRR < 12 MW (Vollbrand)	Nicht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

¹ Nur Abschätzung nach Gary Duggan.



Simulation des Bemessungsbrandes

Pyrolysemodellierung



Pyrolysemodell schematisch

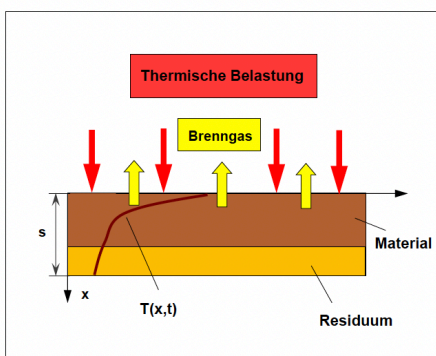
¹Implementiert in FDS.

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) Pyrolysemodell¹, aber nicht ausreichend validiert → **zentrales Thema des F&E bei SMO.**

Pyrolysemodellierung



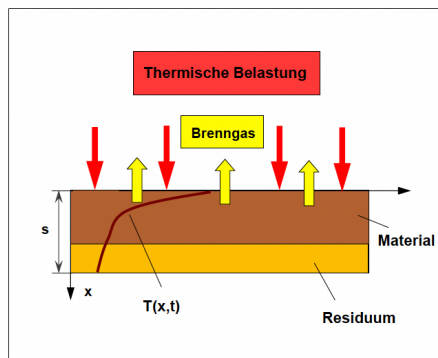
Pyrolysemodell schematisch

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.**
- Zwei Fragen: 1. *Komplexe Pyrolyse*, wie geht das?
2. *Komplexe Pyrolyse*, genügt das?

Pyrolysemodellierung



Pyrolysemodell schematisch

¹Implementiert in FDS.

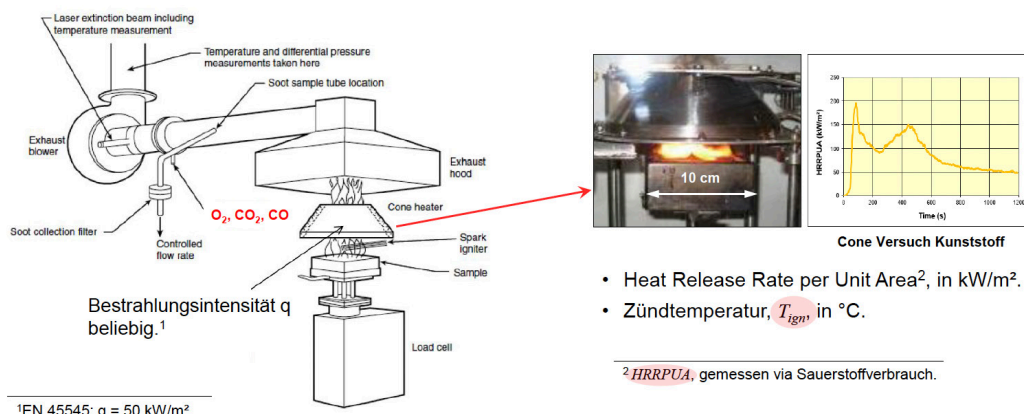
Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

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.

Brandversuche I, Kleinbrandversuche

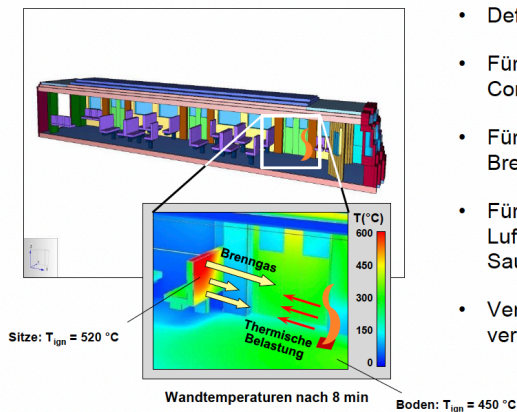
Cone-Calorimeter Versuch, ISO 5660



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

Pyrolysemodellierung

Simple Pyrolyse

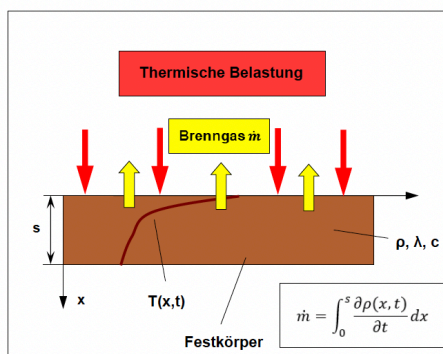


- Definiere die Heat of Combustion (HoC) des Brenngases.
- Für jedes Material: Definiere die $HRRPUA$ gemessen im Cone Versuch und definiere T_{ign} .
- Für jedes Material: Der freizusetzende Massenstrom \dot{m} an Brenngas in kg/m^2s ist gegeben durch $\dot{m} = HRRPUA / HoC$.
- Für jedes Material: 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

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

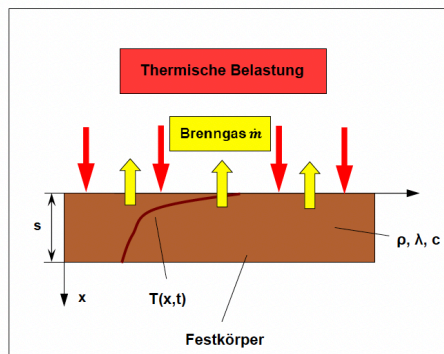
$$Y(x,t) = \rho(x,t)/\rho_0 \dots \text{normierte Dichte, } Y(x,0) = 1$$

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

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

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse



Pyrolysemodell schematisch

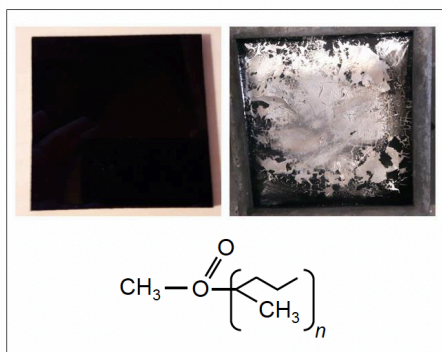
Einfaches Material: *Eine* Reaktion, *kein* Rückstand

6 Parameter zu bestimmen:

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

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse



Black PMMA (Polymethylmethacrylat)¹

¹ Auch Acrylglas

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	
A	Exponentialfaktor	} Reaktionsparameter, Bestimmung aus TGA-Versuch
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 $Y(t)$.

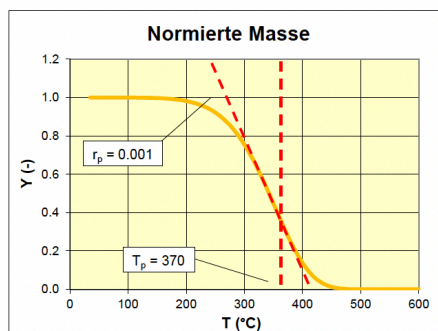
Vereinfachte Arrheniusgleichung¹:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y(t)}{\partial t} &= -AY(t)e^{-E/RT} \\ Y(0) &= 1 \end{aligned} \right\} \text{Bestimmung von } A \text{ und } E \text{ analytisch}$$

¹ Analytisch lösbar bis auf „Quadratur“.

Brandversuche I, Kleinbrandversuche

Komplexe Pyrolyse



$$\dot{Y}(t) = -AY(t)e^{-E/RT}, Y(0) = 1$$

¹ Siehe FDS User Guide.

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

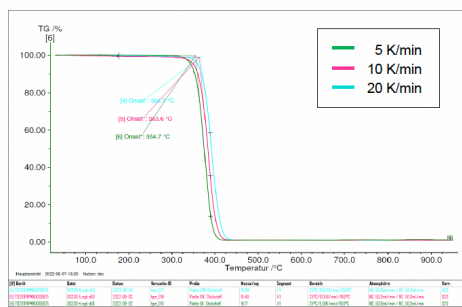
\dot{T} , Aufheizrate

Pyrolysemodellierung

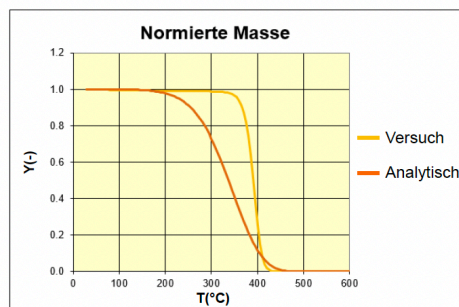
Komplexe Pyrolyse

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

$$T_p = 350, r_p = 0.001 \rightarrow A \sim 7.03 \cdot 10^7, E \sim 5.26 \cdot 10^4, \varepsilon = 0.26$$



TGA-Versuche mit PMMA (TGM 2022).



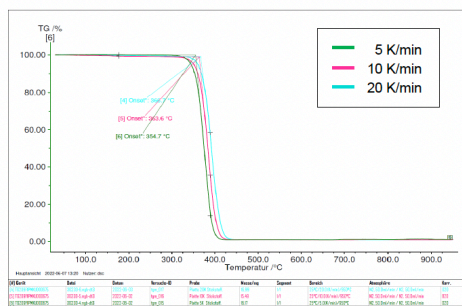
TGA-Versuch mit PMMA, $\dot{T} = 10$ K/min.

Pyrolysemodellierung

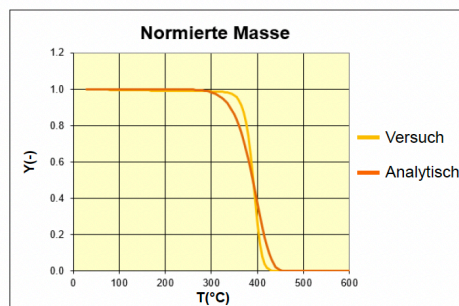
Komplexe Pyrolyse

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

$$T_p = 400, r_p = 0.002 \rightarrow A \sim 1.86 \cdot 10^7, E \sim 1.23 \cdot 10^5, \varepsilon = 0.063$$



TGA-Versuche mit PMMA (TGM 2022).

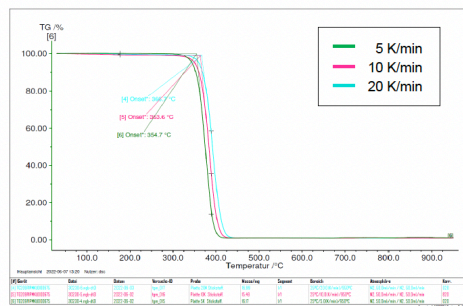


TGA-Versuch mit PMMA, $\dot{T} = 10$ K/min.

Pyrolysemodellierung

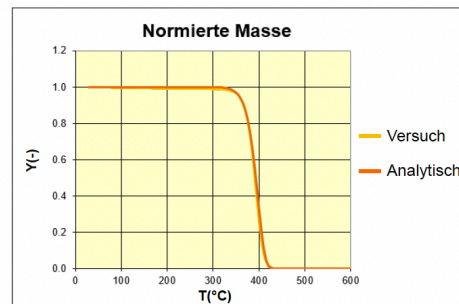
Komplexe Pyrolyse

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).

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



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

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

Thermophysikalische Parameter:

$$\rho_0 = 1318 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \text{Wiegen der Probe}$$

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

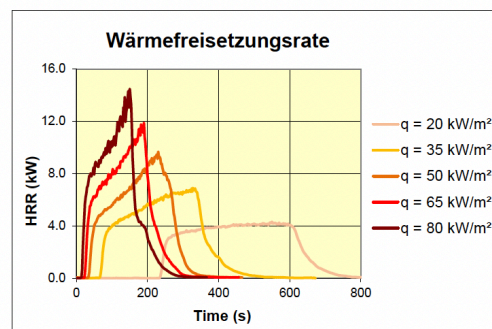
$$c = 1.5 \text{ kJ/kgK} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \text{Aus Datenblatt}$$

Reaktionsparameter:

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

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

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.)

Pyrolyse Modellierung von PMMA in einem Rohrofen
Benedikt Bereska

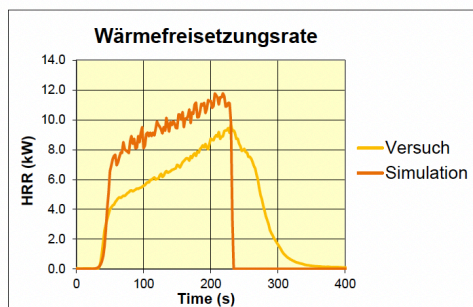
Seite 17



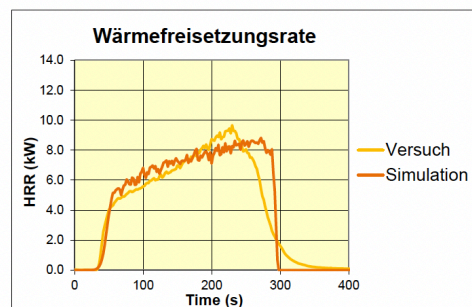
Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

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



$h_{r,1} = 1000 \text{ kJ/kg} \rightarrow \epsilon = 0.62.$



$h_{r,opt} = 1400 \text{ kJ/kg} \rightarrow \epsilon = 0.22.$

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

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



Probe nach Cone-Versuch

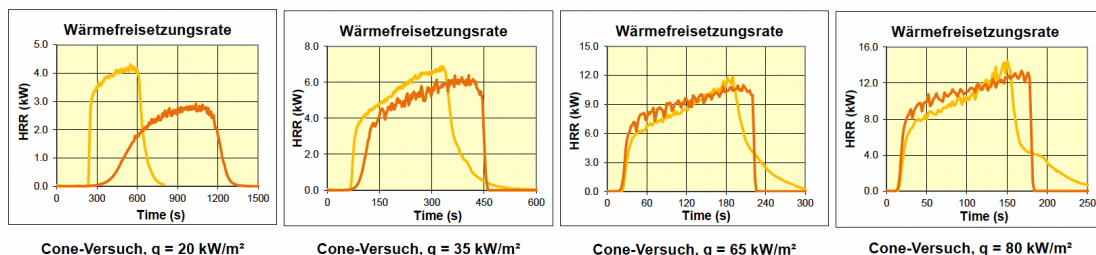
Parameter	Wert	Einheit	Beschreibung
ρ	1318	kg/m ³	Dichte
λ	0.19	W/Km	Wärmeleitfähigkeit
c	1.5	kJ/kgK	Wärmekapazität
A	$1.27 \cdot 10^{17}$	1/s	Reaktionsparameter
E	$2.46 \cdot 10^5$	J/mol	
H_r	1400	kJ/kg	Reaktionswärme
s	0.005	m	Dicke

Pyrolyseparameter für PMMA.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

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



$q \text{ (kW/m}^2\text{)}$	20	35	50	65	80
ϵ	—	0.51	0.22	0.27	0.34

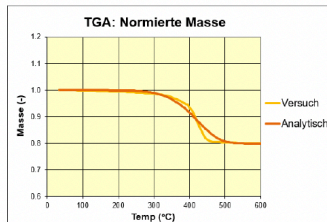
Legende:
 — Versuch
 — Simulation

Cone-Versuche mit PMMA, Fehler für die HRR.

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

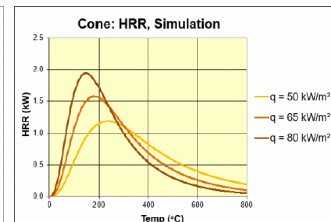
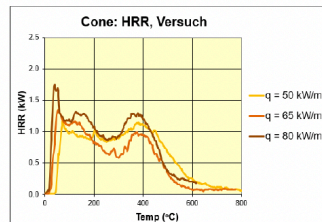
Halbeinfaches Material: *Eine* Reaktion, *ein* nicht reagierender Rückstand, z.B. GFK.



$$T_p = 420, r_p = 0.0002$$

$$A = 2.2 \cdot 10^2, E = 6.51 \cdot 10^4, \varepsilon = 0.011.$$

$$NU_{MATL} = 0.8$$



q (kW/m²)	50	65	80
ε	0.31	0.53	0.50

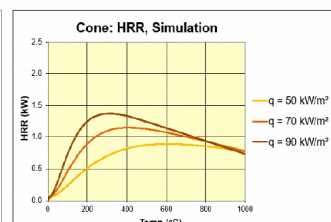
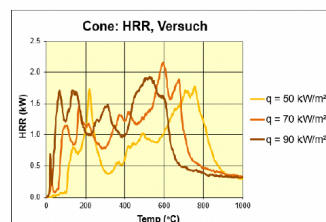
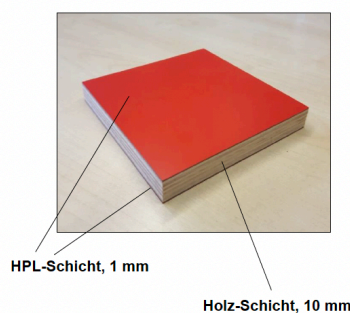
Cone-Versuche mit GFK, Fehler für die HRR

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

Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

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



q (kW/m²)	50	70	90
ε	0.44	0.38	0.39

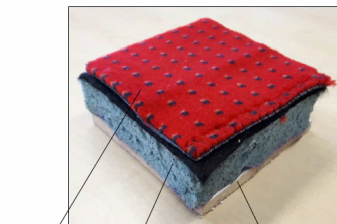
Cone-Versuche mit Holzsitz, Fehler für die HRR

22 Parameter manuell bestimmt, nicht eindeutig.

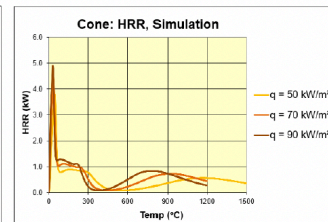
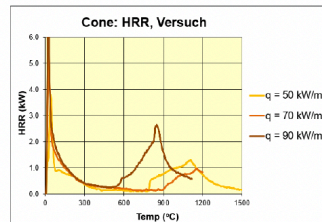
Pyrolysemodellierung

Komplexe Pyrolyse

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



Stoff, 4 mm
Schaum, 35 mm
Holz, 7 mm
Sample von oben bestrahlt



q (kW/m²)	50	70	90
ϵ	0.39	0.38	0.43

Cone-Versuche Polstersitz, Fehler für die HRR

Pyrolysemodellierung

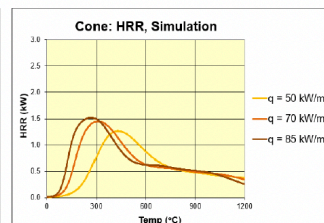
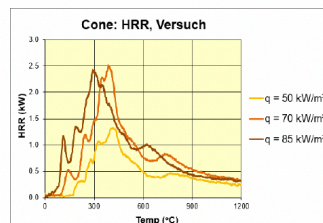
Komplexe Pyrolyse

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



Brandhemmender Anstrich, ca. 0.1 mm
Schaum, 35 mm

Sample von unten bestrahlt



q (kW/m²)	50	70	85
ϵ	0.33	0.35	0.32

Cone-Versuche Polstersitz, Fehler für die HRR

44 Parameter mit Optimierungssoftware bestimmt, nicht eindeutig.

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

Brandversuche mit Komponenten im genormten Brandraum (DIN EN 13823)



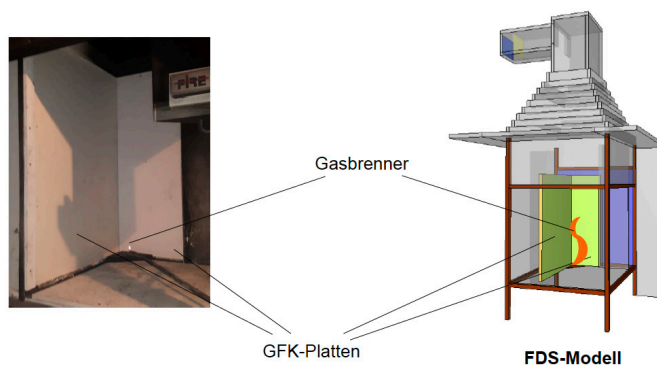
HRR via Sauerstoffverbrauch



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

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

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

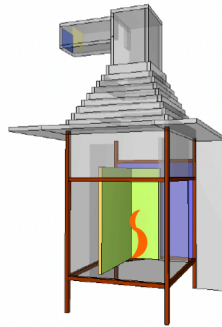


Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

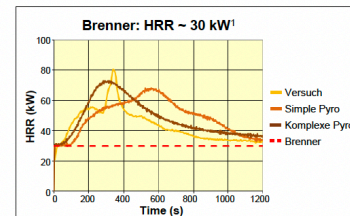
SBI-Versuche nach DIN EN 13823 mit zwei GFK-Platten



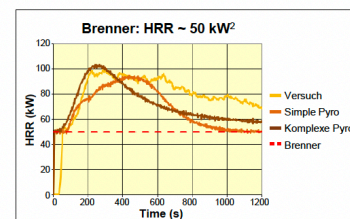
Brand nach 1 Minute



FDS-Modell



Fehler: $\epsilon_{\text{komplex}} \sim 0.17$, $\epsilon_{\text{simple}} \sim 0.29$



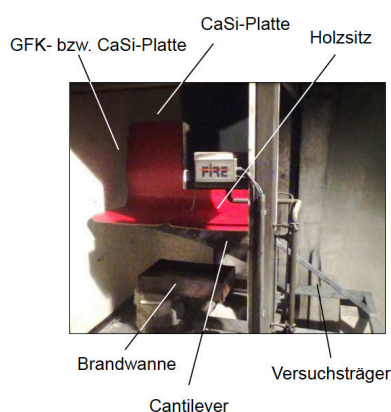
Fehler: $\epsilon_{\text{komplex}} \sim 0.21$, $\epsilon_{\text{simple}} \sim 0.23$

¹Ein Versuch, Daten des zweiten Versuches korrupt.

²Mittel aus zwei Versuchen.

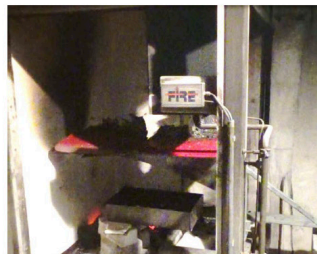
Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

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 ~ 150 kW.



Variante 1. Brand aus

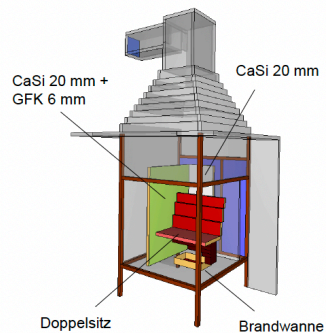


Variante 2. Brand nach 20 min

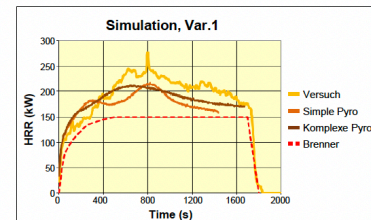
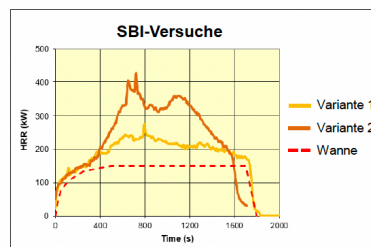
¹Gefüllt mit ca. 10 l Isopropanol

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

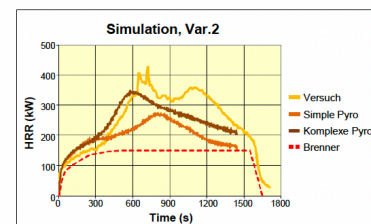
SBI-Versuche mit Doppelholzsitz, GFK-Platte, CaSi-Platten und Brandwanne



FDS-Modell, Variante 2



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

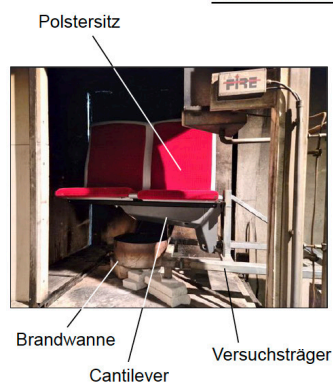


Fehler: $\epsilon_{\text{komplex}} \sim 0.19$, $\epsilon_{\text{simple}} \sim 0.33$

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne¹

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

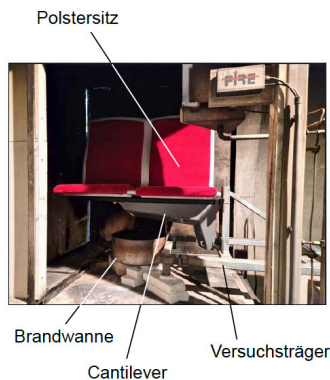


Rückenabdeckung aus Aluminium

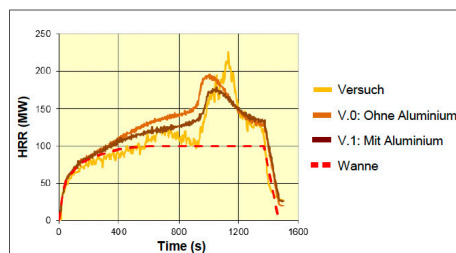
¹Wanne: $\varnothing \sim 35$ cm, gefüllt mit ca. 5 l Isopropanol, HRR ~ 100 kW.

Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne



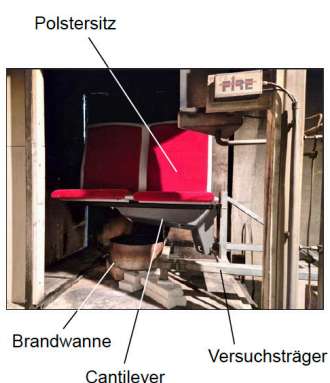
Simulation ohne Aluminium (V.0) und mit Aluminium (V.1).
Der Unterschied fällt nicht sehr ins Gewicht.



Fehler: $\epsilon_0 \sim 0.21$, $\epsilon_1 \sim 0.15$

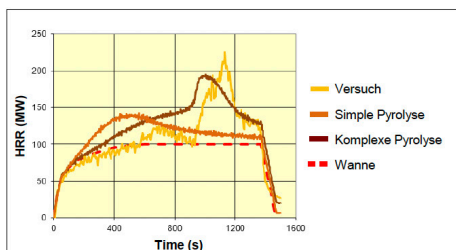
Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne



Simple versus komplexe Pyrolyse

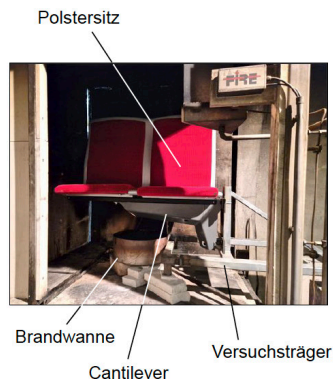
Variante 1: Simulationen ohne Aluminium.



Fehler: $\epsilon_{\text{komplex}} \sim 0.21$, $\epsilon_{\text{simple}} \sim 0.31$

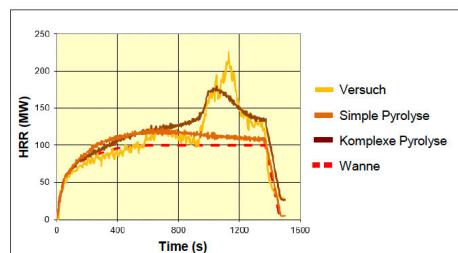
Brandversuche II, Mittelskalige Versuche

SBI-Versuch mit Doppelpolstersitz und Brandwanne



Simple versus komplexe Pyrolyse

Variante 2: Simulationen mit Aluminium.



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

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: $\varnothing \sim 1.12$ m, HRR ~ 1 MW

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

¹Gefüllt mit ca. 40 l Isopropanol.



Tunnel mit großem Ventilator

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne



Wanne: $\varnothing \sim 1.12$ m, HRR ~ 1 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

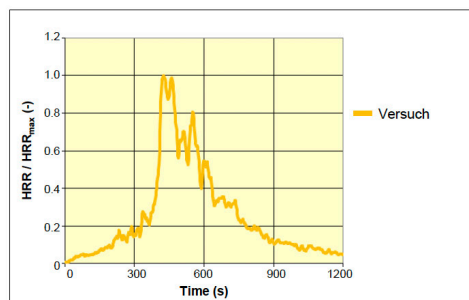


Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$



Wagen, Ansicht von hinten

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



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



Wagen, Ansicht von vorne



Tunnel mit großem Ventilator

¹Ermittelt nach der Sauerstoffverbrauchsmethode.

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne



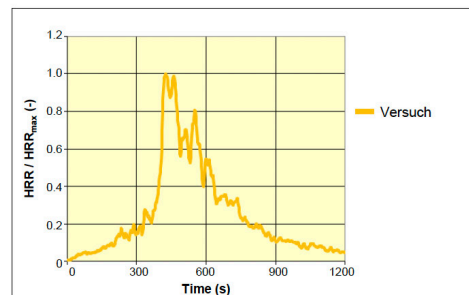
Wanne: $\varnothing \sim 1.12 \text{ m}$, HRR $\sim 1 \text{ MW}$



Wagen, Ansicht von hinten

Probleme bei der Simulation:

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



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



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 $\sim 1 \text{ MW}$

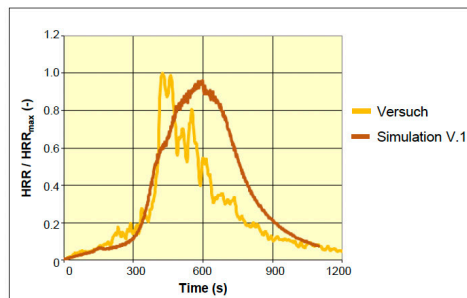


Wagen, Ansicht von hinten

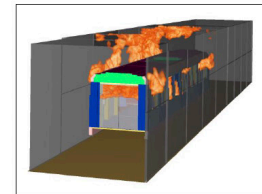
A. Komplexe Pyrolyse.

Variante 1:

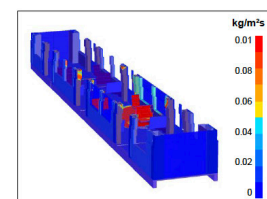
- Leuchtenabdeckung brennt voll mit.
- Versagen der Fenster (stückweise) bei 100°C .



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



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



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 $\sim 1 \text{ MW}$

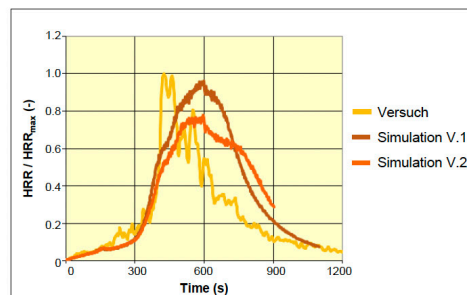


Wagen, Ansicht von hinten

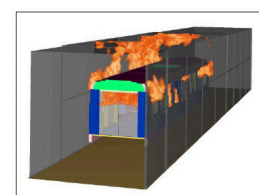
A. Komplexe Pyrolyse.

Variante 2:

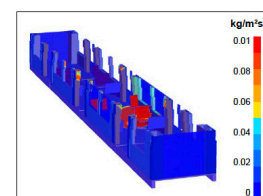
- Leuchtenabdeckung brennt gar nicht.
- Versagen der Fenster (stückweise) bei 100°C .



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



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



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 $\sim 1 \text{ MW}$

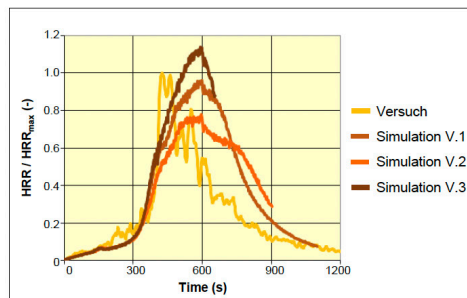


Wagen, Ansicht von hinten

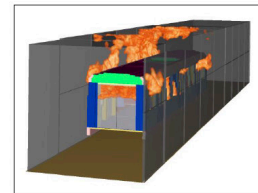
A. Komplexe Pyrolyse.

Variante 3:

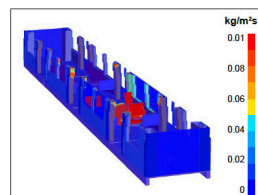
- Leuchtenabdeckung brennt voll mit.
- Versagen der Fenster (stückweise) bei 150 °C.



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



Simulation, t = 500 s. HRR (kW/m²)



Simulation, t = 500 s. \dot{m} (kg/m²s)

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne



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

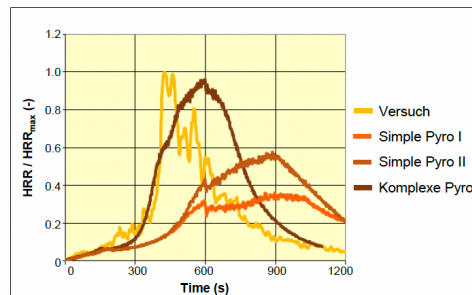


Wagen, Ansicht von hinten

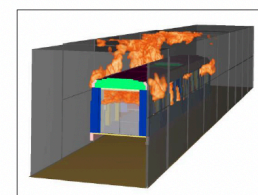
B. Simple versus komplexe Pyrolyse¹.

Variante 1: Alle Materialien simpel

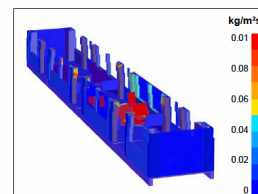
- Simple Pyrolyse I: Fensterversagen bei 100 °C.
- Simple Pyrolyse II: Fensterversagen bei 300 °C.



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



Simulation, t = 500 s. HRR (kW/m²)



Simulation, t = 500 s. \dot{m} (kg/m²s)

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

Brandversuche III, Großbrandversuche

Vollbrandversuch, Zündinitial große Brandwanne



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

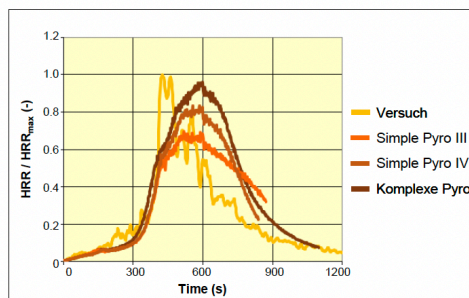


Wagen, Ansicht von hinten

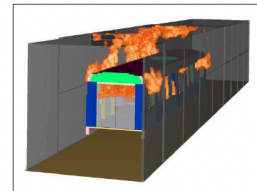
B. Simple versus komplexe Pyrolyse¹.

Variante 2: Nur ein Material simpel

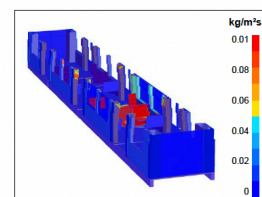
- Simple Pyrolyse III: Nur SW-Verkleidung simpel.
- Simple Pyrolyse IV: Nur Bodenbelag simpel.



Vollbrandversuch, Wärmefreisetzungsrate



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



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

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

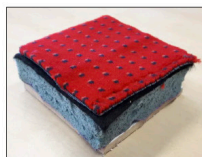
Zusammenfassung



SW-Verkleidung (GFK)



Holzstz (2 Materialien)



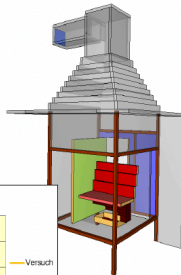
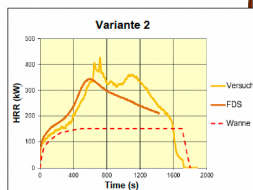
Polstersitz (4 Materialien)

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

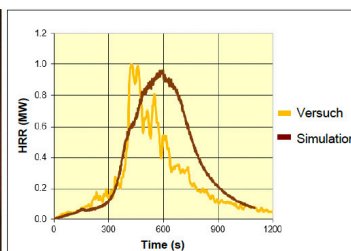


Herausforderung: Die Modellierung des Brandverhaltens der Materialien.

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.



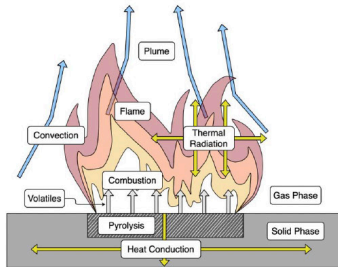
Danke für Ihre Aufmerksamkeit

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

AI in Fire Dynamics | Lukas Arnold | 09. October 2025

Slide 3

Computational
Civil EngineeringBERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTALJÜLICH
Forschungszentrum

Research Topics



AI in Fire Dynamics | Lukas Arnold | 09. October 2025

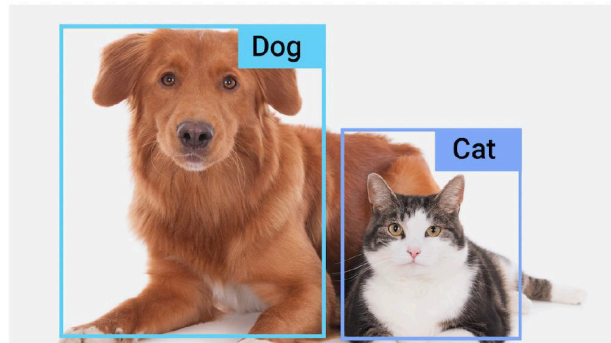
Slide 4

Computational
Civil EngineeringBERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTALJÜLICH
Forschungszentrum

AI Fundamentals

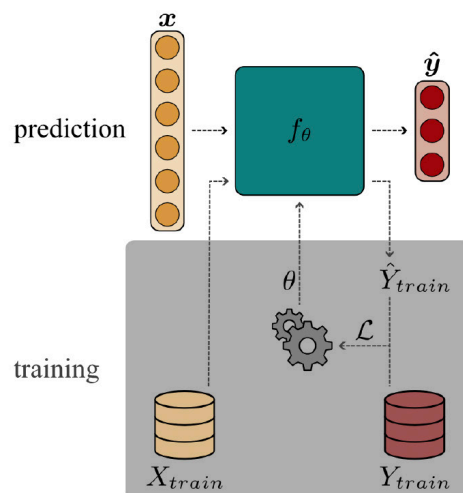
In general:

- 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

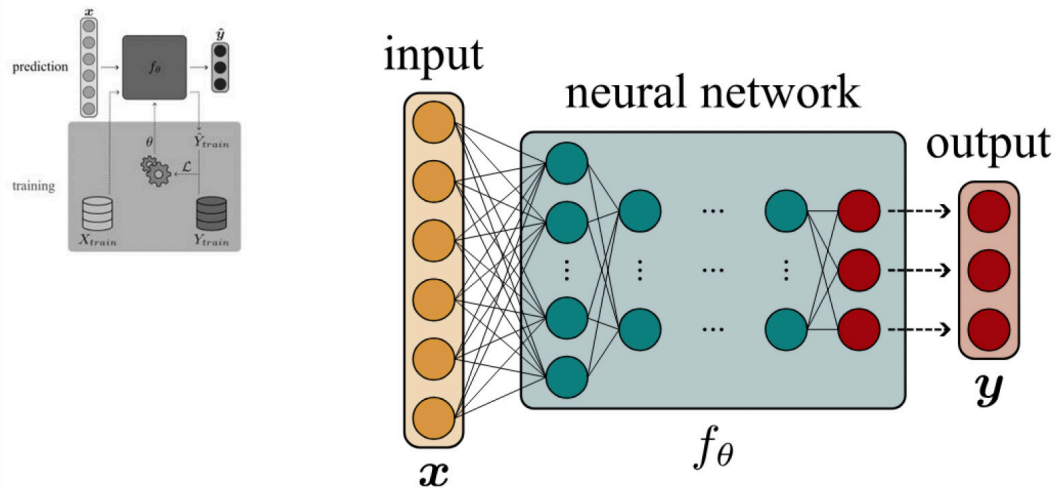


[1]

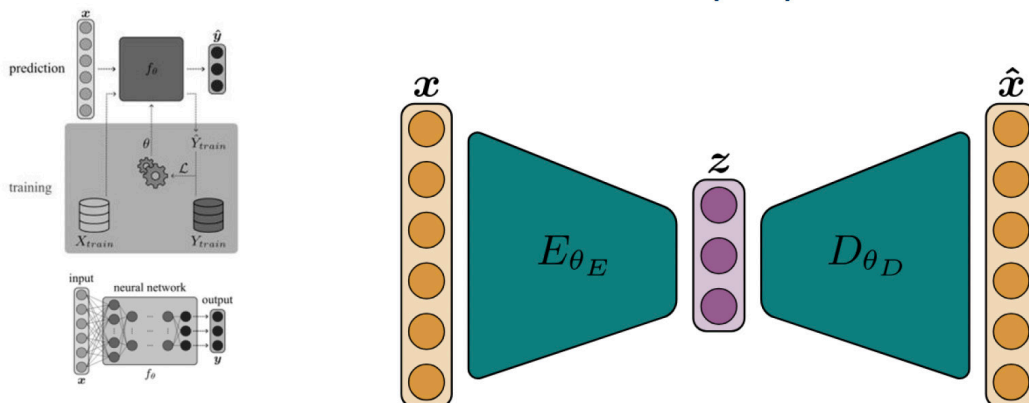
Basics on Neuronal Networks (Basics)



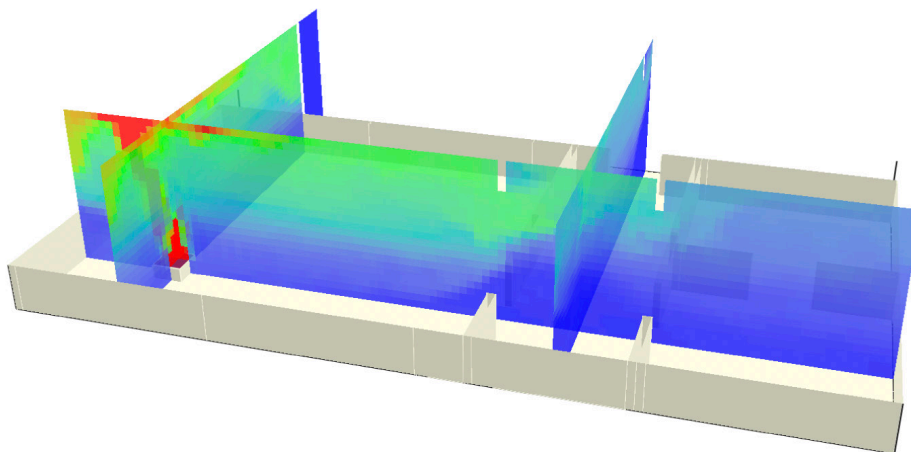
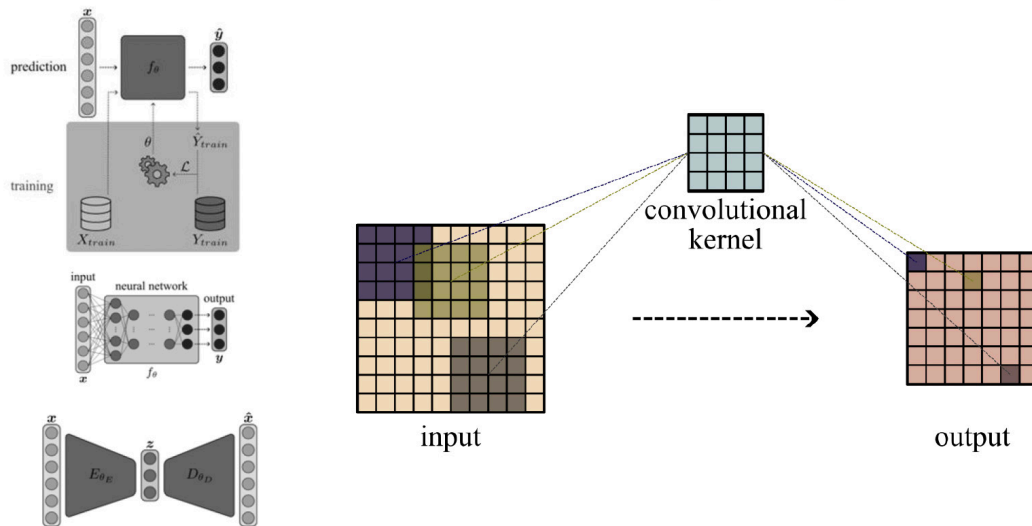
Basics on Neuronal Networks (ANN)



Basics on Neuronal Networks (AE)



Basics on Neuronal Networks (CNN)



Fires – Fluid Dynamics

Predicting Fluid Dynamics

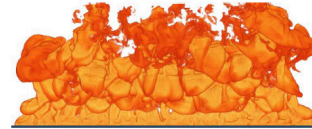
- Known mathematical representation (since nearly 200 years)

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

- Known approaches to solve them (Computational Fluid Dynamics)

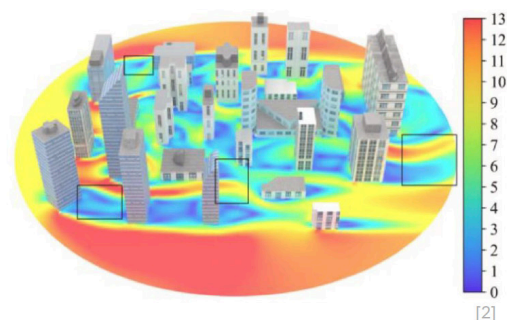
$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{k} = \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2}$$

- Have computing resources and tools to apply the methods

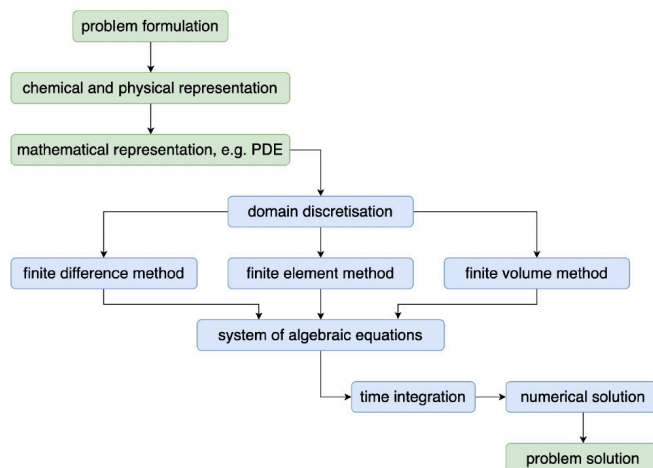


Application Options for AI in Fluid Dynamics

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

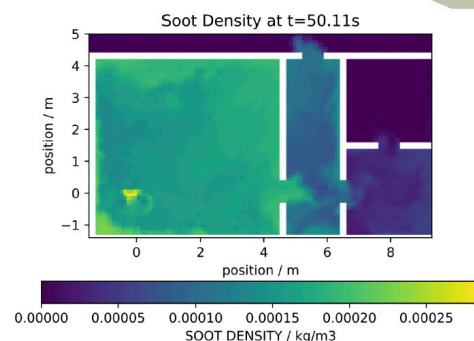
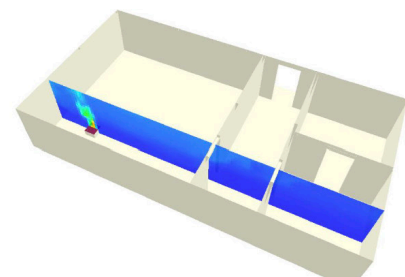
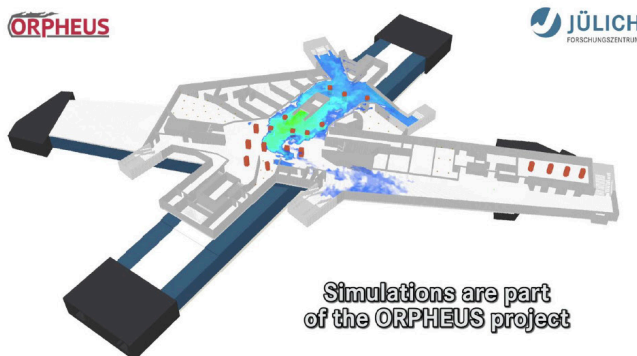


CFD – Computational Fluid Dynamics

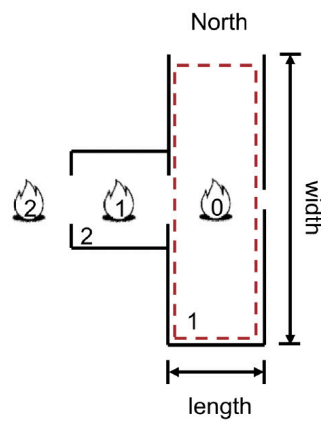


- Given boundary conditions
- Given initial conditions
- Predict, e.g.
 - $T(x, y, z, t)$
 - $v(x, y, z, t)$
 - soot concentration
- Analysis based on, e.g.
 - point measurements $\phi(t)$
 - slices $\phi(x, y, t)$

CFD – Colorful Fluid Dynamics



Prediction Based on Geometrical Parameters

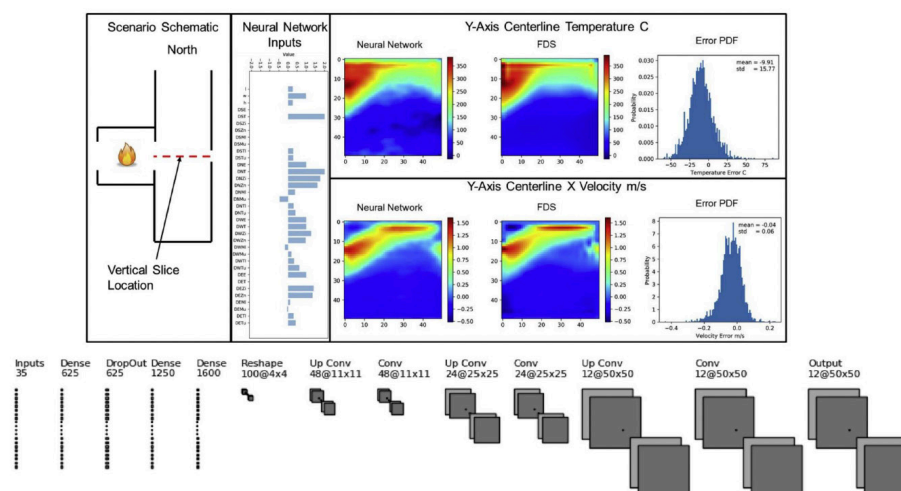


Room Geometry	
Width	2.5-10.0 m
Length	2.5-10.0 m
Height	2.5 m
Each Wall (North, East, South, West, West-West)	
Existence of Ventilation	True/False
Ventilation Size	0-2
0	0.625x1.9m
1	1.250x1.9m
2	Full Extent
Source	
Location	0-2
0	Fire Room 1
1	Fire Room 2
2	2-Layer Forced Ventilation
Intensity	
if Fire, Heat Release Rate	50-1000 kW
if 2-Layer Forced Ventilation	
Temperature	500-1000 C
Velocity	1-10 m/s
Interface Height	0-1.9m

[3]



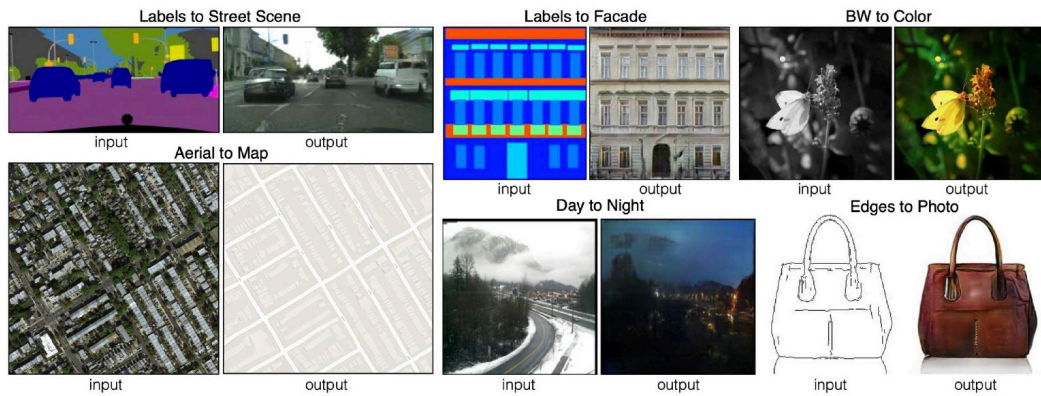
Up-convolutional ANN



[3]

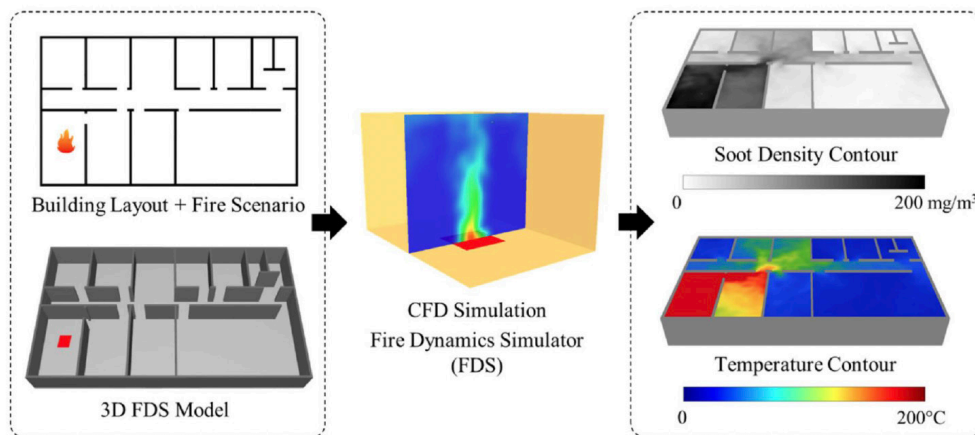


Image-to-Image Translation (pix2pix)



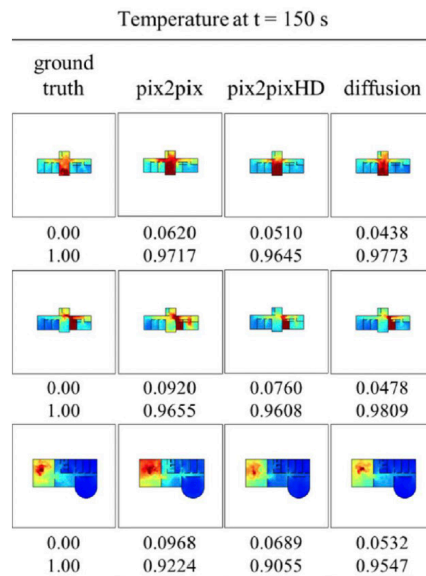
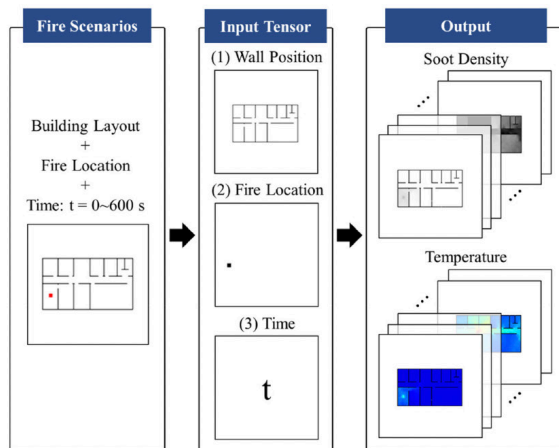
[4]

Representation Based on Images



[5]

Predictions

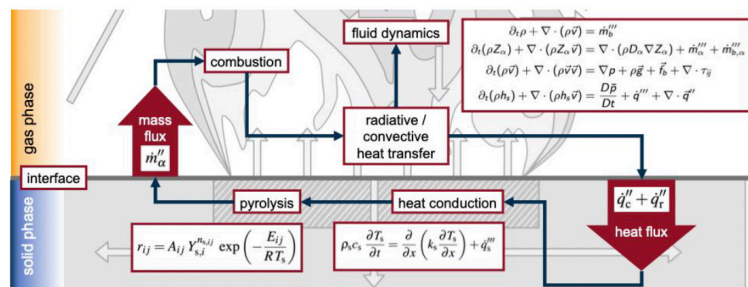
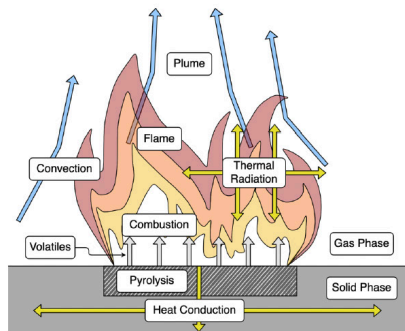


[5]

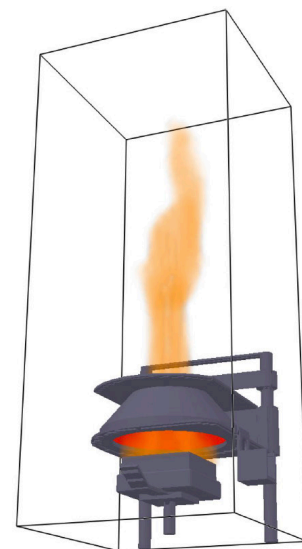
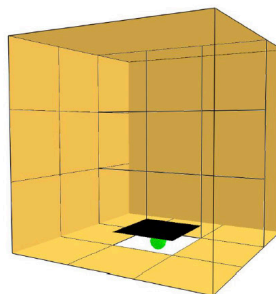
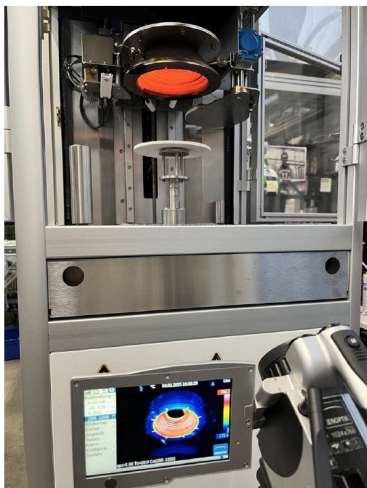


Fires – Pyrolysis

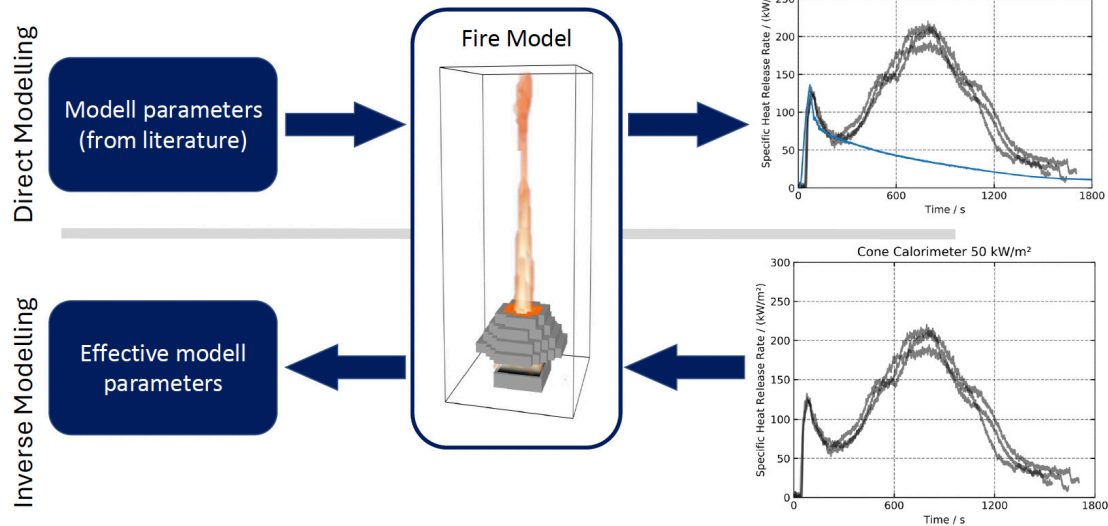
Pyrolysis Modelling



Cone Calorimeter



Inverse Modelling

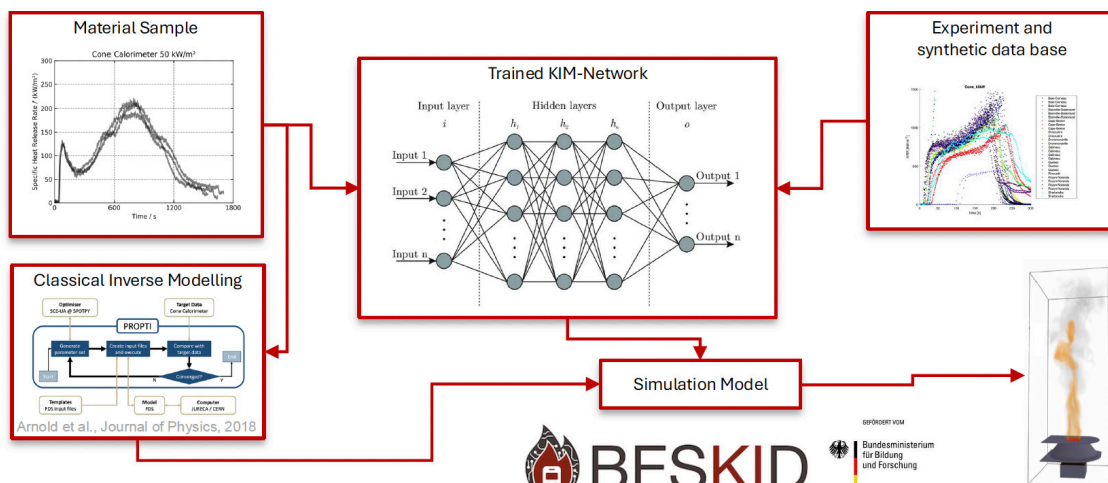


AI in Fire Dynamics | Lukas Arnold | 09. October 2025

Slide 25

Computational
Civil EngineeringBERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTALJÜLICH
Forschungszentrum

KIM – KI-basierte Materialparameterbestimmung



AI in Fire Dynamics | Lukas Arnold | 09. October 2025

Slide 26

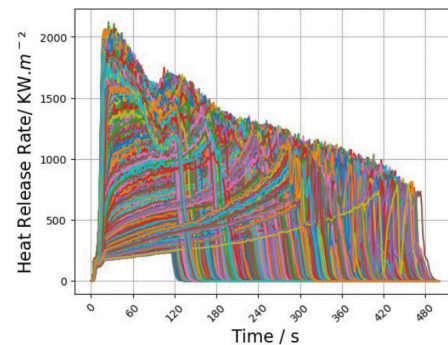
Computational
Civil EngineeringBERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTALJÜLICH
Forschungszentrum

Training Data Set

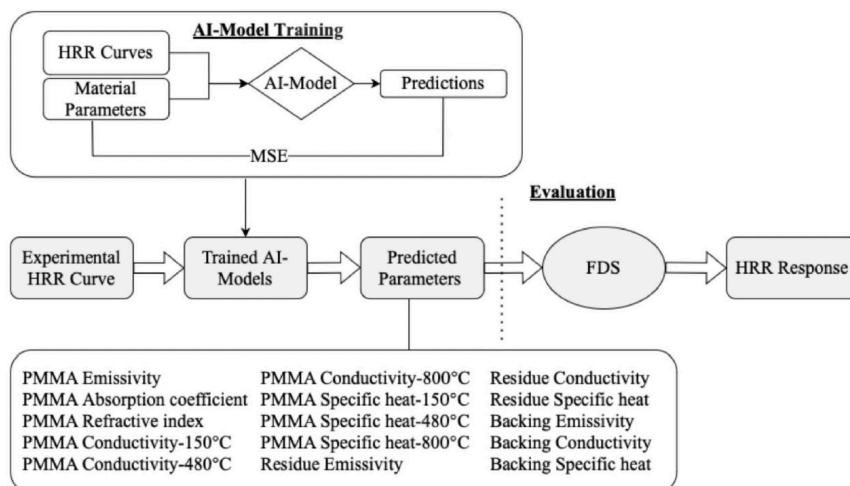
- Simple cone simulations, focus on HRR curves
- Number of simulations: 131072
- Material parameters:

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:

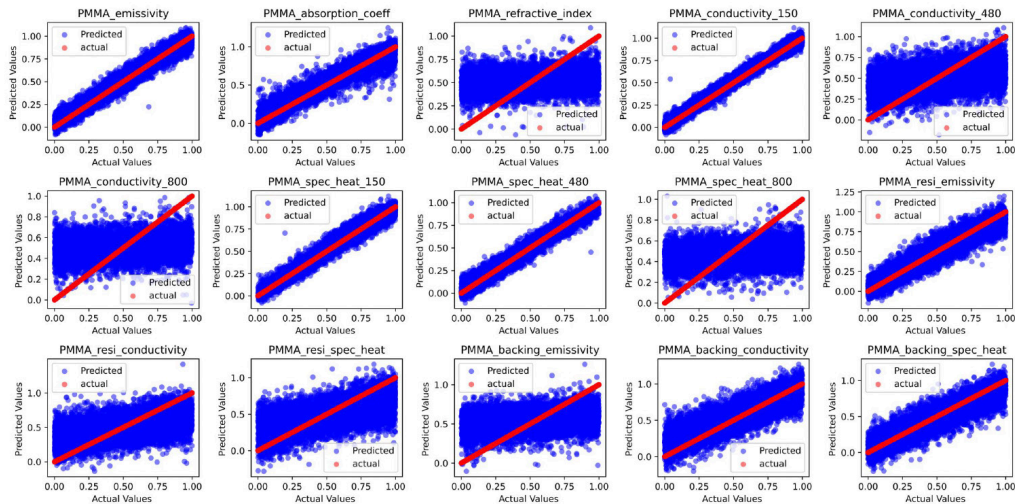


Training Approach

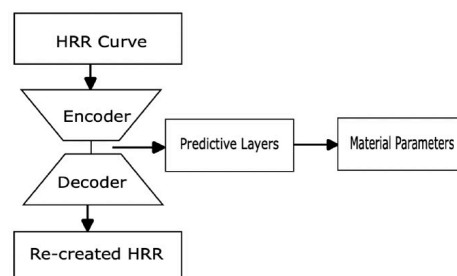
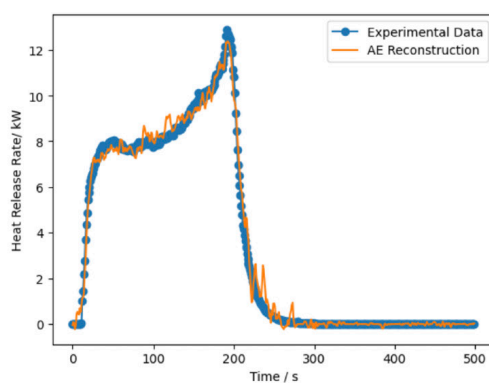


[6]

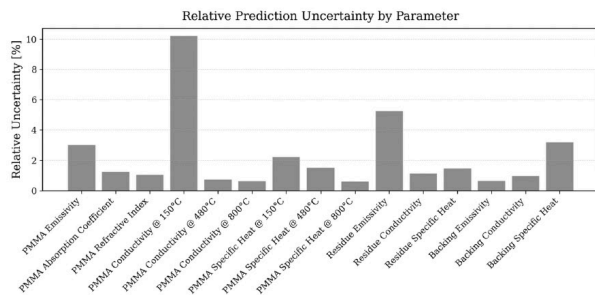
Parameter Sensitivity



Auto-Encoders



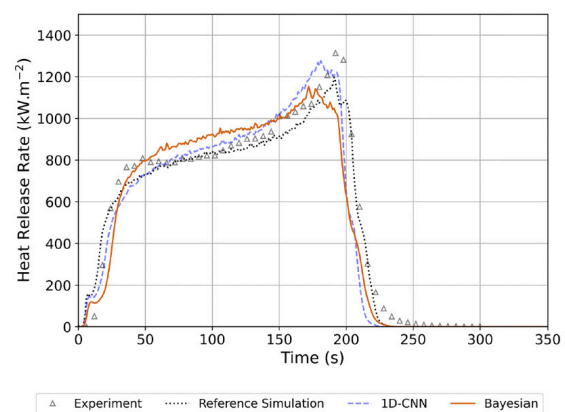
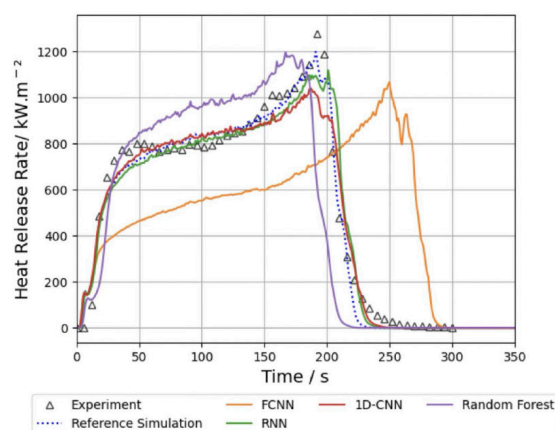
BNN



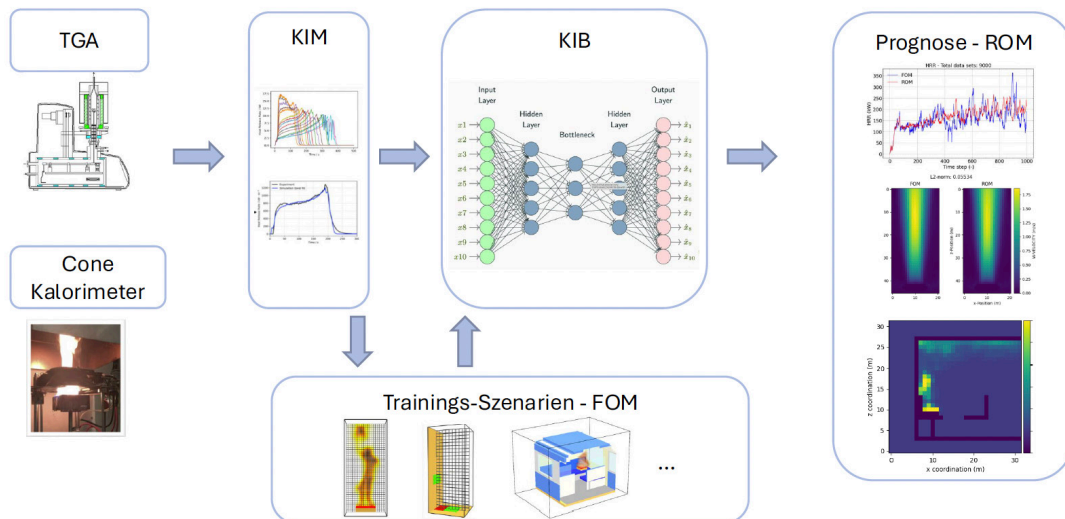
Parameter	Prediction \pm CI	Rel. Uncertainty	Confidence
PMMA Emissivity	0.763 ± 0.045	3.0%	High
PMMA Absorption Coefficient	7912.028 ± 194.206	1.3%	High
PMMA Refractive Index	2.815 ± 0.058	1.0%	High
PMMA Conductivity @ 150°C	0.382 ± 0.076	10.2%	Low
PMMA Conductivity @ 400°C	0.024 ± 0.000	0.7%	High
PMMA Conductivity @ 800°C	4.355 ± 0.053	0.6%	High
PMMA Specific Heat @ 150°C	0.890 ± 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 Emissivity	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

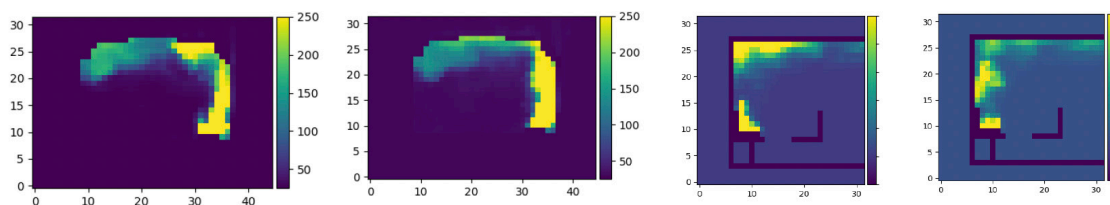
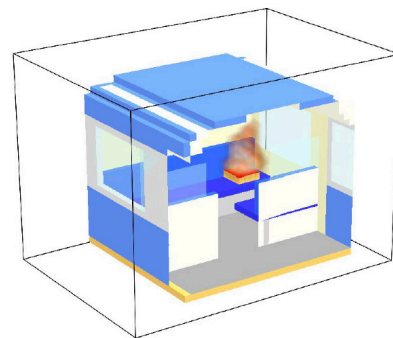


KIB – KI-basierte Brandsimulation (Prof. Brännström)



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 range 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

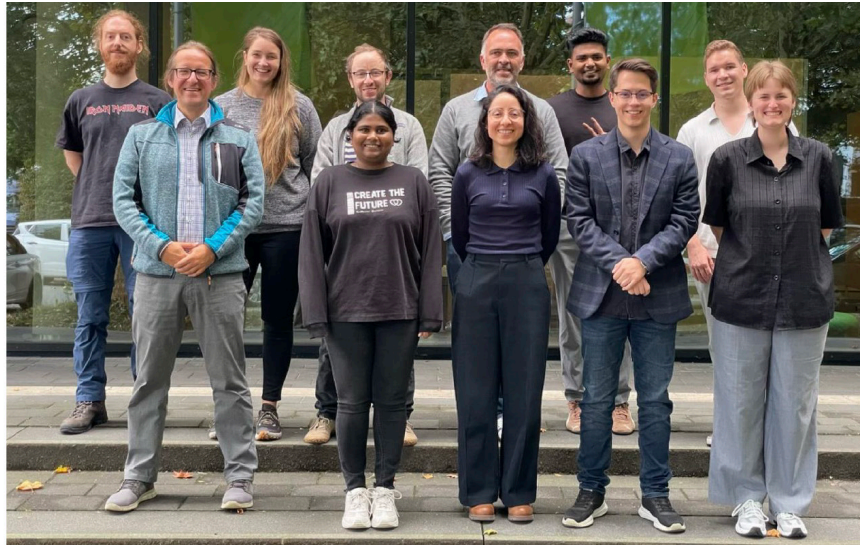
@ Bergische Universität
Wuppertal

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 Rettungswegsituation 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



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 dichtschießenden 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:

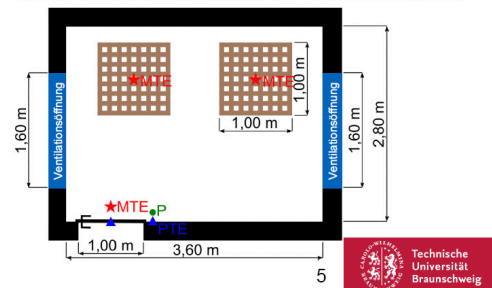
- Zimmertüren ca. 5 Minuten
- Wohnungseingangstüren 10 – 20 Minuten
- Aufbesserung historischer Türen durch Verstärkung von Schwachstellen und Einbau von Dichtungen

4



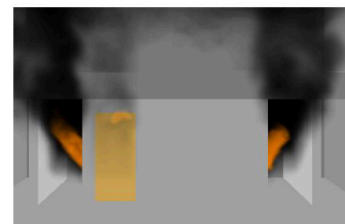
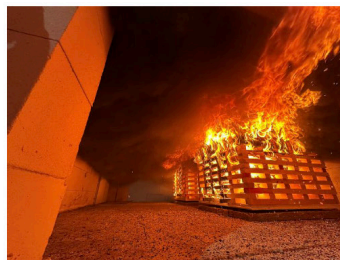
Versuchsstand und Messtechnik

- Bewertung von Brandverhalten und Leakage
- 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: dichtschießend
 - 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)



Gewähltes Brandszenario

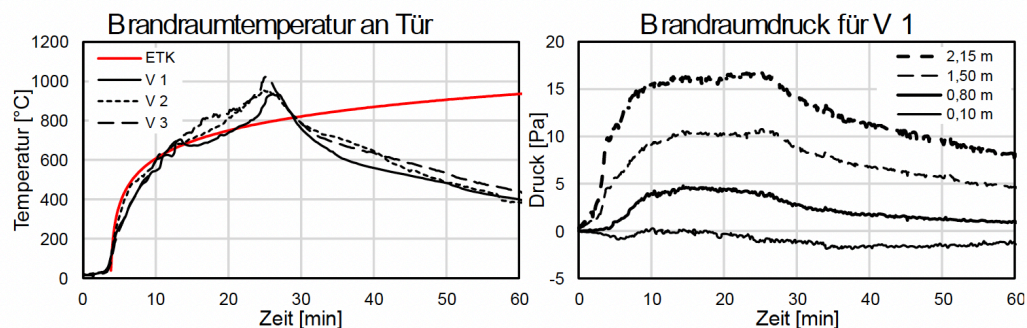
- angestrebtes Szenario: Intensiver Raumbrand direkt hinter der Wohnungseingangstür
- Grenzbereich brandlast-/ventilationsgesteuert für maximale Brandraumtemperaturen
- Festlegung der Brandlast über Brandsimulation und Krippenformeln zu zwei Holzkrippen je 150 kg
- Wärmefreisetzungsrate in Vollbrandphase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





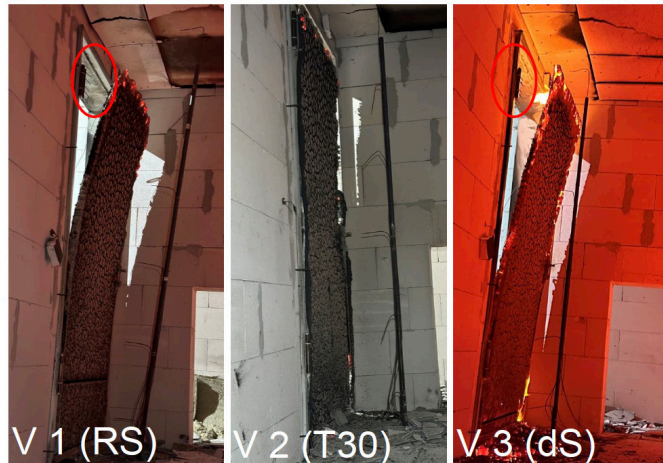
Brandraumtemperatur und -druck

- Auswertung der Brandraumtemperatur über Plattenthermoelemente an Tür, um Vergleichbarkeit zu Normprüfbedingungen 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



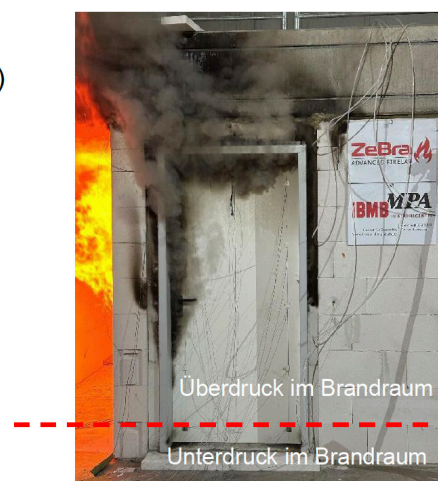
9



Messprinzip Türleckage

Volumenstrommessung unter Naturbrandbedingungen herausfordernd, da:

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

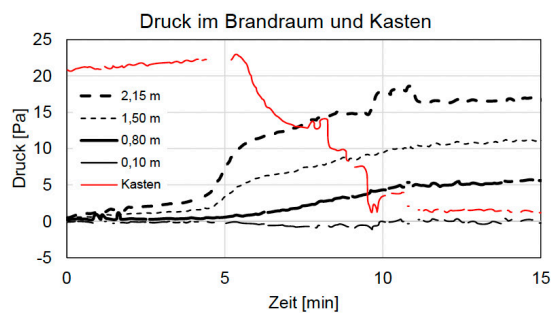


10



Messprinzip Türleckage

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

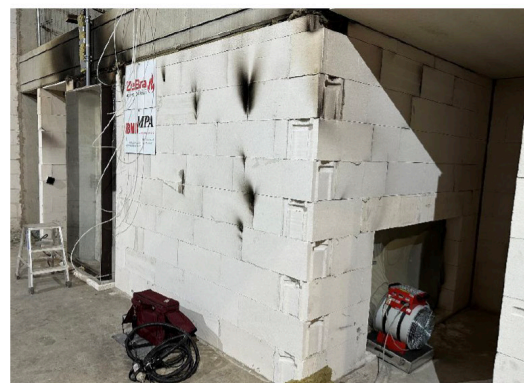
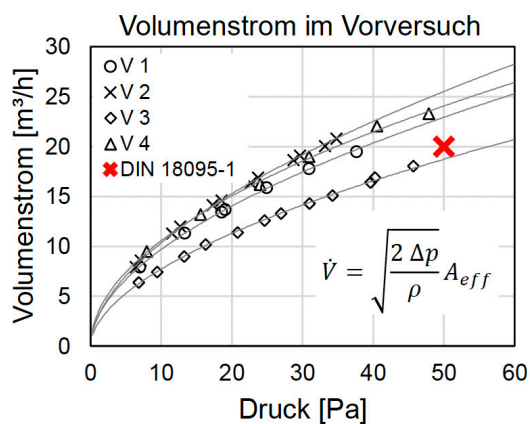


11



Türleckage im Kalten

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

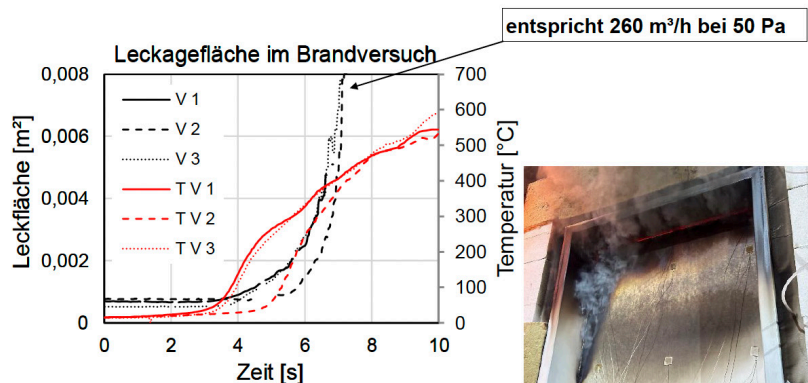


12



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

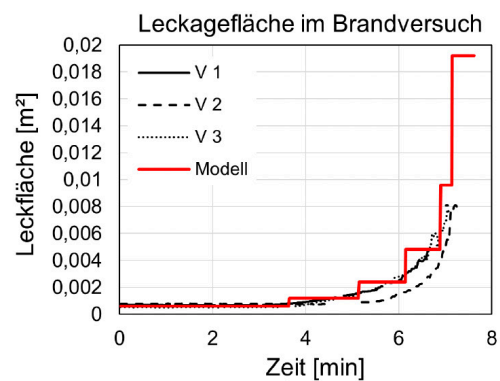
- HVAC-System
 - Heating, Ventilation, Air-Conditioning
 - Ein- und Ausgang in HVAC-System als Randbedingung innerhalb der Rechendomain
 - HVAC Network Solver zur Berechnung der Strömung zwischen den HVAC-Knoten

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)

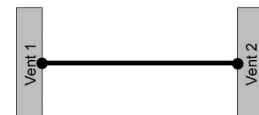
$$\dot{m} = \rho \cdot K_{Loss} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \cdot A_{Leck}$$



Variante 2

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

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

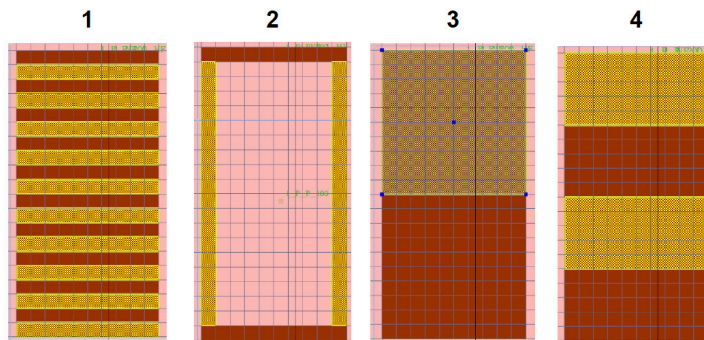


16



VENT-Positionierung

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

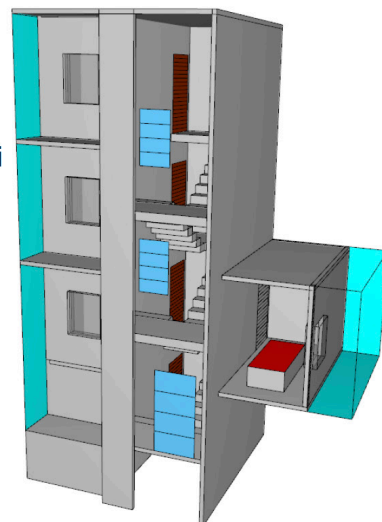


17



VENT-Positionierung

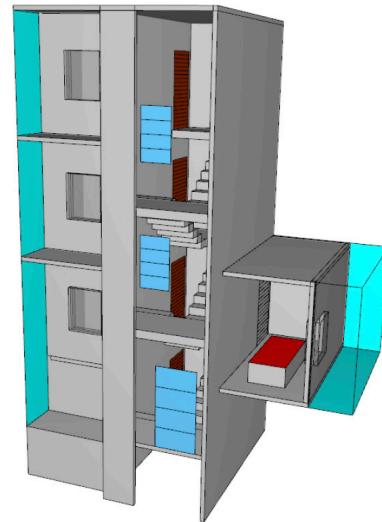
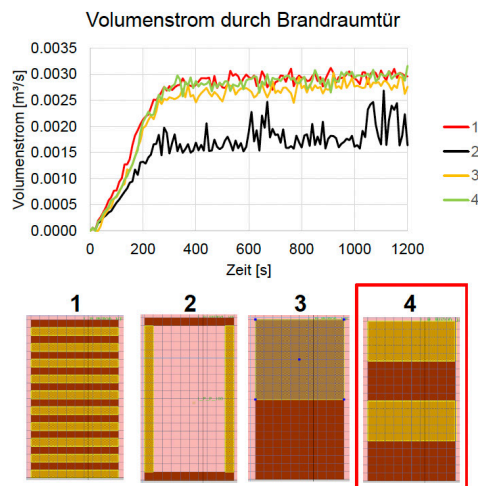
- Simulationsstudie zur Bewertung der möglichen Varianten
- Brand in Wohnung: $\dot{Q}_{max} = 1,2 \text{ MW}$, $t_{\alpha} = 300 \text{ s}$
- Türleckage: $A_L = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, entspricht 50 m³/h bei 50 Pa Differenzdruck, vergleichbar mit dichtschießender Tür
- Alle Türen geschlossen, konstante Leckagefläche



18



VENT-Positionierung



19



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 : $q \approx \alpha (4\varepsilon\sigma T_f^4 + h_c T_f)$
- Kumulierte Wärmemenge $E = \int q A dt \approx \alpha A \int (4\varepsilon\sigma T_f^4 + h_c T_f) dt$

20



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

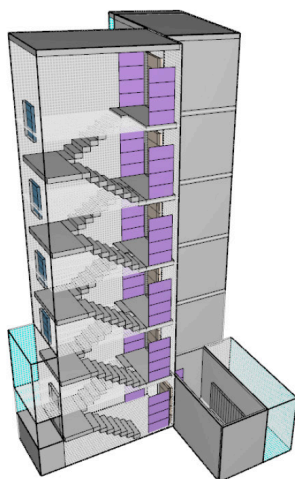
[4] Bechthold et al. (1978) Brandversuche Lehrte

[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 21



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.

Vorgelegt 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 Kompensationsansätze 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

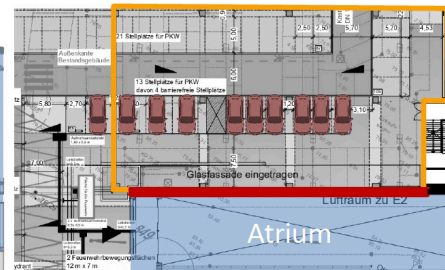
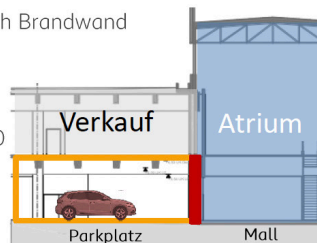
- Aufgabenstellung
- Schutzziele
- Leistungskriterien
- Geometrie/Modell
- Bemessungsbrand
- Materialeigenschaften Glas
- Ergebnisse & Sicherheiten
- Lessons Learned & Zusammenfassung



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 Bereich durch Brandwand
 - Wunsch des Bauherrn: Ausführung als Glasfassade
 - Abweichend soll das Glas in FO 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

Sicherheitstechnisch erforderlicher Zeitraum

Funktionale Anforderung

- Vorbeugung der Feuer- und Rauchausbreitung durch die Glasfassade
- Beherrschbarkeit des Brandes
 - Sicherung Angriffswege
 - Unterstützung manueller Löscharbeiten

Quantifizierung
Leistungskriterium

via FDS

Ergebnis

Ingenieurmäßiger 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
 1. 370 °C
 2. 550 °C
 3. 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 Berücksichtigung der Einwirkdauer

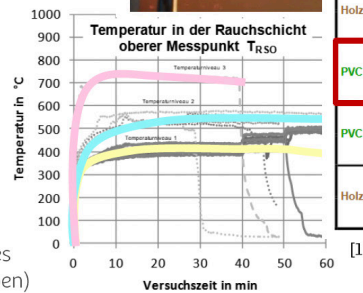


Tabelle 7-10: Versagenszeiten der Fenster

Fensterart	Rahmen	Verglasung	Temperaturniveau		
			1 (niedrig)	2 (mittel)	3 (hoch)
PVC	2-fach	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 außen VSG (RC2, früher WK II)	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	0:52
		Außenscheibe	NZ	NZ: > 60:00	Z: 30:00

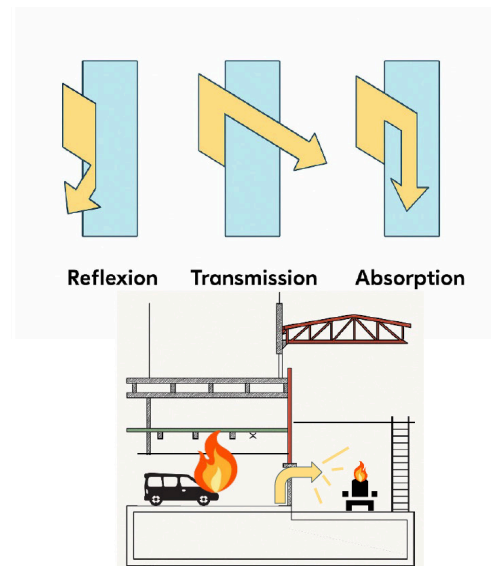
14.10.2025 5 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



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 ≤ 180 K
 - (Anlehnung an DIN 4102-3)
 - Thermische Strahlung
 - kritische Wärmestromdichte (CHF) ≤ 10 kW/m²
 - (thermisch dünne Materialien wie Papier, ohne Einwirkdauer)



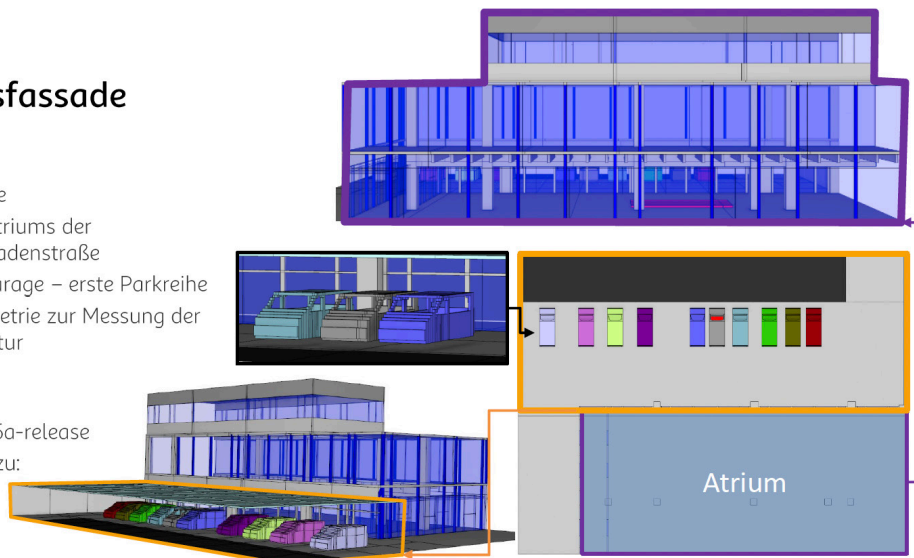
14.10.2025 6 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



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



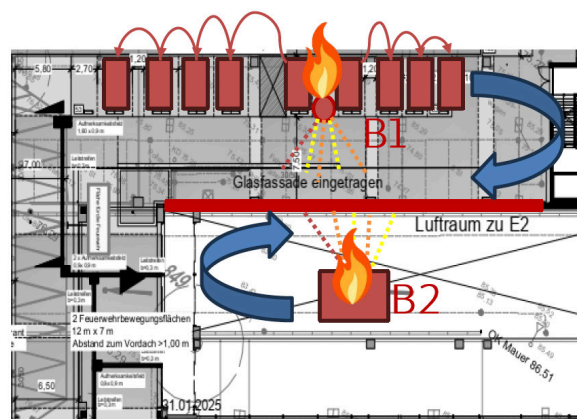
14.10.2025 7 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



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



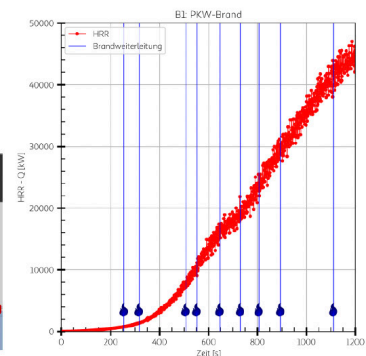
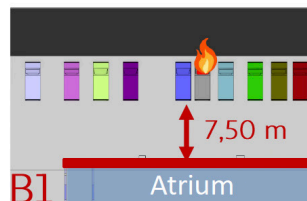
14.10.2025 8 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Bemessungsbrand II: PKW-Brand

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



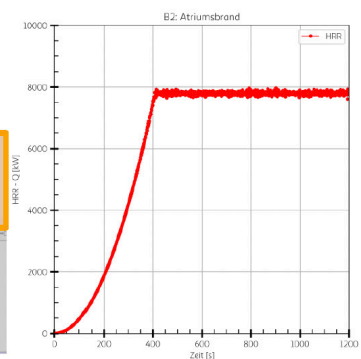
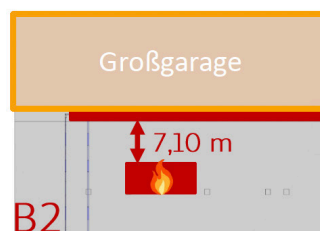
Kenngroße	Primärbrand	Folgebrand
Max. Brandleistung	5 MW	5 MW
Brandlast	10.000 MJ	10.000 MJ
Brandausbreitungsgeschw.	$t_g = 300 \text{ s}$	$t_g = 150 \text{ s}$
Effektiver Heizwert	20.000 kJ/kg	
Ruß-Ausbeute	0,116 kg/kg	
CO-Ausbeute	0,1 kg/kg	

[13]

Brand vs. Glasfassade

Bemessungsbrand III: Atriumsbrand

- Brand einer Aktionsfläche, hier Sitzgelegenheit mit ca. 30 m²
- Klassisch αt^2 mit \dot{q} für Einkaufszentren
- 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. Wärmefreisetzungsrate	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

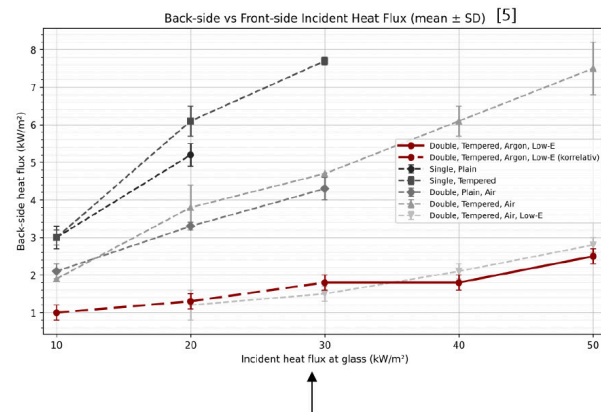
Mischbrandlast gem. [7]

Brand vs. Glasfassade

„Transmission“ in FDS

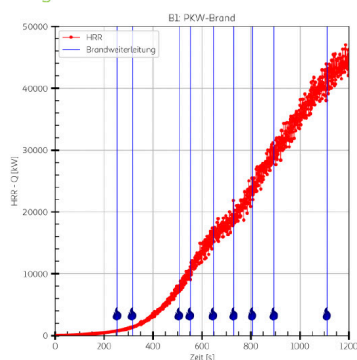
- Kein direktes Transmissionsmodell in FDS
- Indirekter Ansatz: Absorption ↓ - Transmission ↑
 - Physikalisch: lambert-beersche Gesetz

$$I = I_0 * \exp(-\alpha L) \rightarrow T = \frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha L)$$
 - 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 %



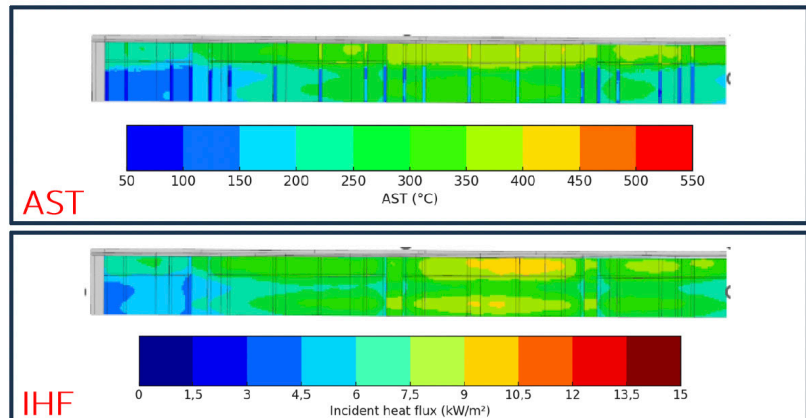
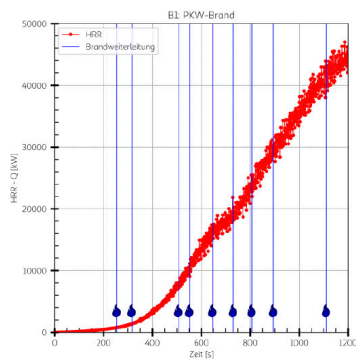
Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse I



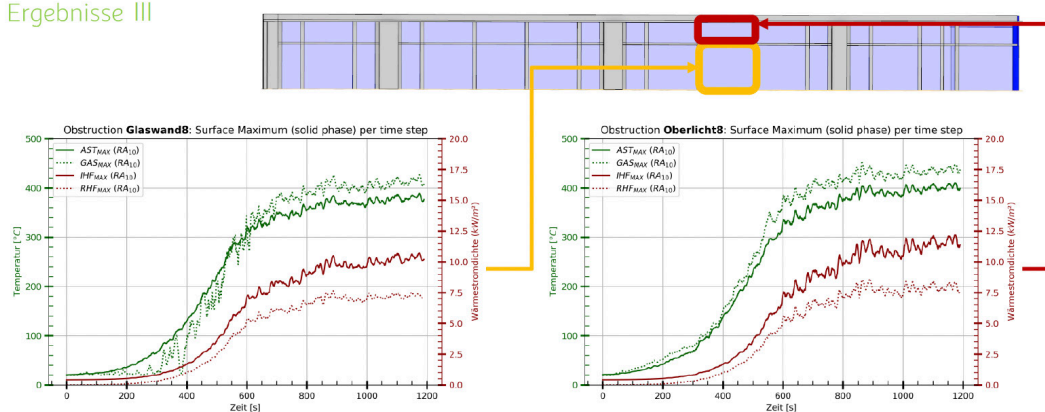
Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse II



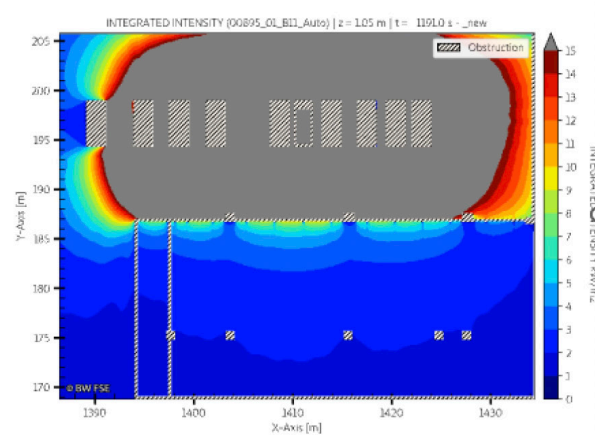
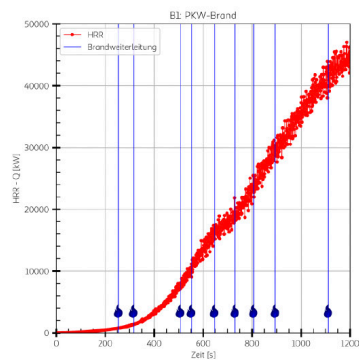
Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse III



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse IV

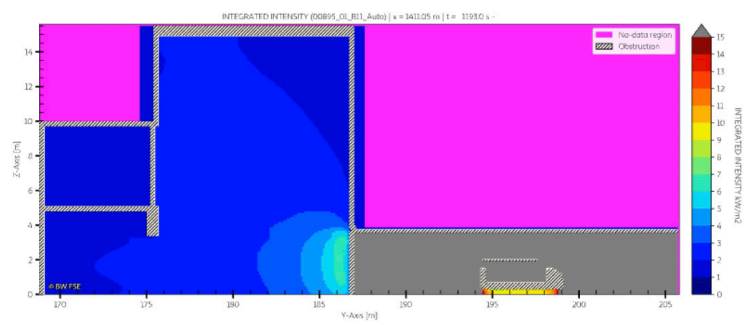
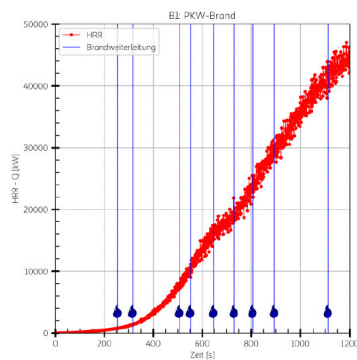


14.10.2025 15 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse V



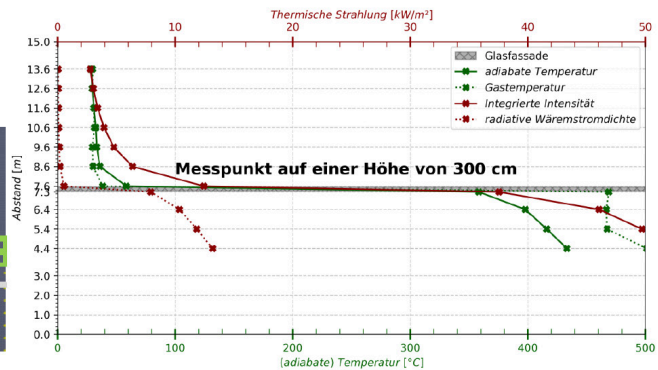
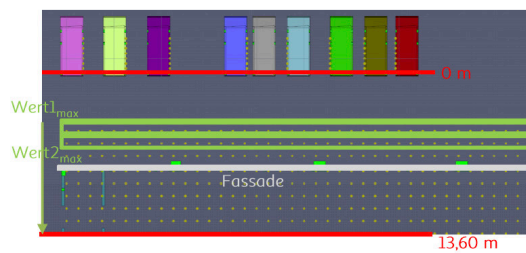
14.10.2025 16 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Ergebnisse VI

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



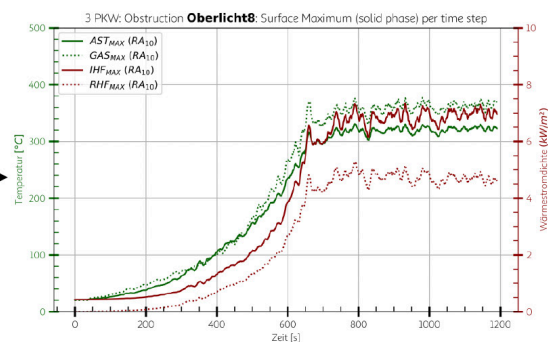
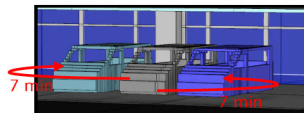
14.10.2025 17 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



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



14.10.2025 18 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Sicherheiten/Maßnahmen

- Dreifachverglasung + Rahmenmaterial Holz
 - geringer Transmission, längerer 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

14.10.2025 19 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



Brand vs. Glasfassade

Lessons Learned – Einflussfaktoren

Faktor	Beschreibung	Bewertung	Quellen	Evidenzgewicht hoch moderat Gering/ ungewiss
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]	
Anzahl der Scheiben	Mehr Scheiben = höherer „Trennwiderstand“		[1],[4],[5],[8]	
Rahmen	Rand/Abdeckung beeinflussen ΔT ; Holzrahmen halten Außenscheiben länger intakt		[1],[3],[4]	
Fenstergröße	Uneinheitlich: klein (weniger Wärmekapazität) vs. groß (mehr Spannungen)		[1],[8],[10]	

To be continued...

14.10.2025 20 Hauke | brandwerk - FDS Usergroup - Einwirkung eines Pkw-Brands auf eine Glasfassade



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...

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 . |

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“, <i>Front. Therm. Eng.</i> , Bd. 4, S. 1488206, Nov. 2024, doi: 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 <i>8th International Conference on the Applications of Structural Fire Engineering (ASFE 2024)</i> , 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“, <i>Fire Technol.</i> , Bd. 61, Nr. 4, S. 1613–1645, Juli 2025, doi: 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“, <i>Construction and Building Materials</i> , Bd. 181, S. 588–597, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.088 .

Brand vs. Glasfassade

Literatur III

[11]	Verein Deutscher Ingenieure, <i>VDI 2053 Blatt 2: Raumluftechnik – Garagen – Entrauchung (VDI-Lüftungsregel)</i> . 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-raumluftechnik-garagen-entrauchung-vdi-lueftungsregel
[12]	Deutscher Ausschuss für Stahlbau (DAST), „Untersuchung zur Tragsicherheit offener Parkgaragen in Stahl- und Verbundbauweise unter Brandeinwirkungen 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_bfsccommon_viewpdf%5Baction%5D=index&tx_bfsccommon_viewpdf%5Bcontroller%5D=ViewPdf&tx_bfsccommon_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“, <i>KSI Smart Brandschutz</i> , Sep. 2022.
[14]	Y. Wang, <i>Experimental and Numerical Study of Glass Facade Breakage Behaviour under Fire Conditions</i> , Hong Kong: Springer, 2019



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

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

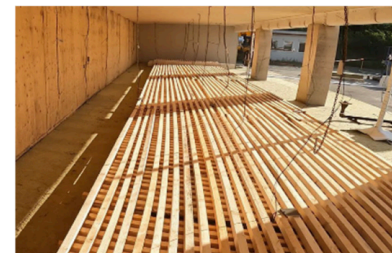


Illustration of FRIC test setup from A.S. Bøe et al (2023)



Spyro was developed by Jonathan Hodges and co-authors

Fire Safety Journal 141 (2023) 103990



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 real-time based analytical model, Spyro. The model is based on the concept of maintaining the shape of a



Method Overview

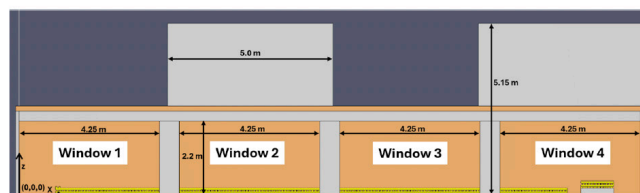
The overall approach for the analysis is structured in four steps

- **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)

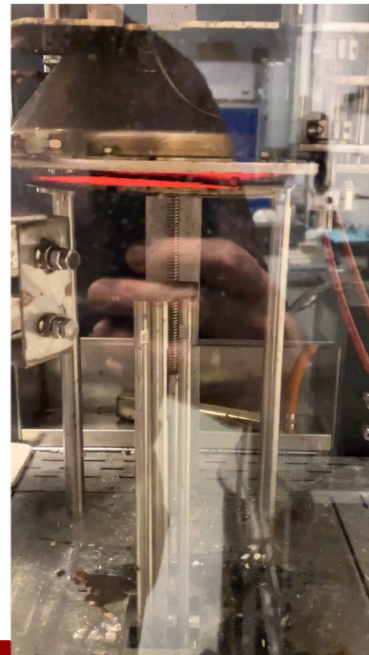
- The samples originally had a thickness of 100 mm, but this was reduced to 40 mm before the test in order for the samples to fit under the cone. The samples are made of a mix of spruce and pine with an average density of $393 \pm 11.6 \text{ kg/m}^3$. The specimens were tested with a heat flux directed 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/m^2 , 50 kW/m^2 and 35 kW/m^2 , 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/m^2).



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



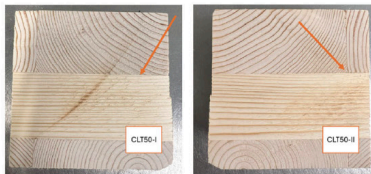
Danmarks Tekniske Universitet

12

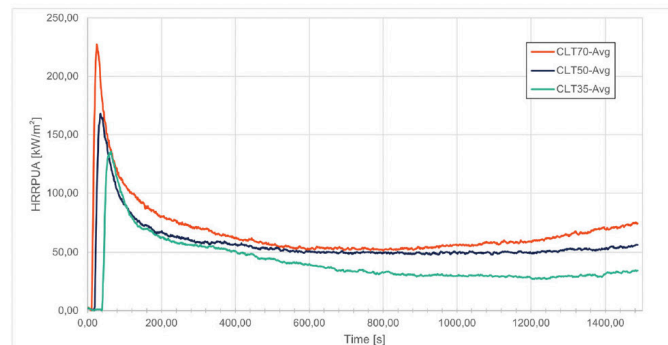


Method: Cone Calorimeter Tests at DBI

- 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



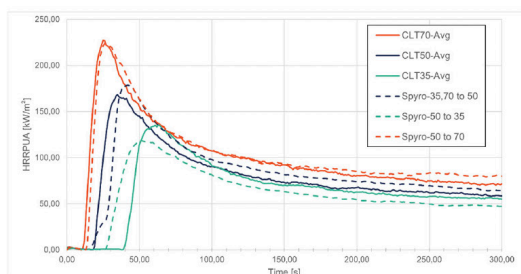
Average HRRPUA as a function of time from CLT cone calorimeter test



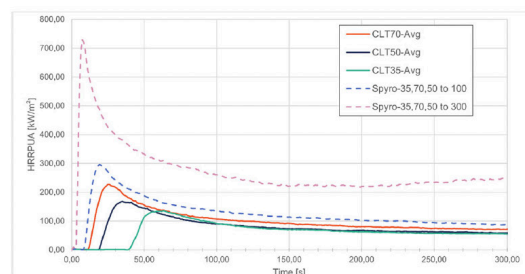
FDS Results - Validation of the Spyro Model

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



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 thickness

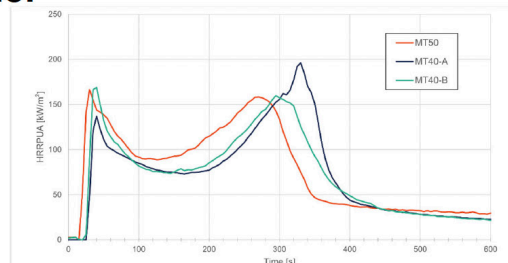
Overview of performed simulations using the Spyro model

Simulation	Wood crib		CLT ceiling and wall		
	Ignition temp. [°C]	HRRPUA [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

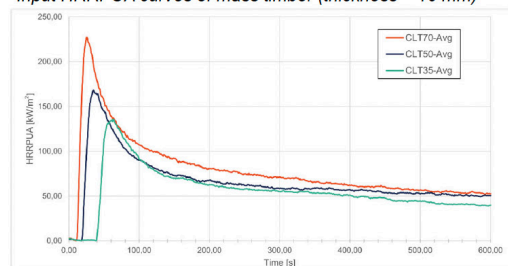
[†] Including wind conditions of 2 m/s

* 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 mass timber (thickness = 10 mm)



Input HRRPUA curves of CLT (thickness = 40 mm)



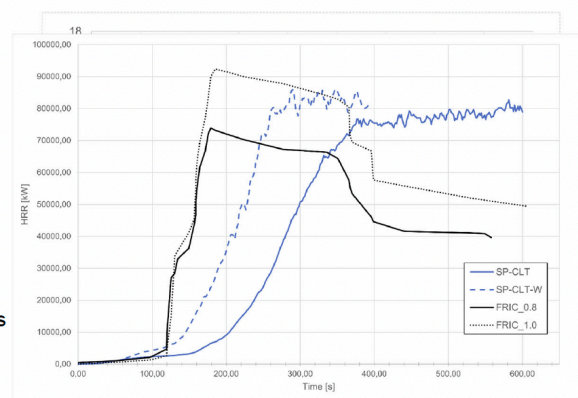
FDS Results Using the Spyro Model – Overall Findings for CLT

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

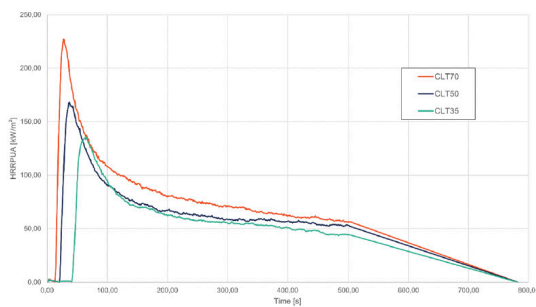


simulations employing CLT data with and without wind
HRR as a function of time (10 s Average) for the two Spyro simulations using CLT data with and without wind compared to the FRIC test

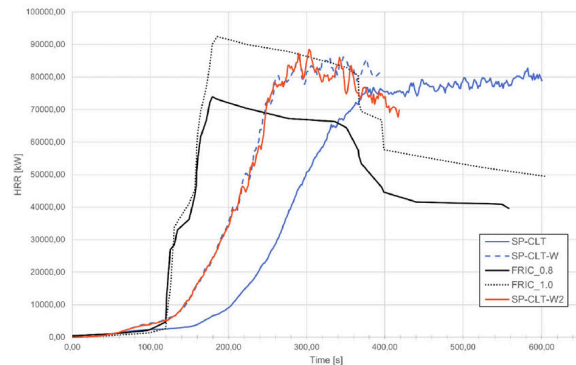


The Spyro Model – The Decay Phase

- 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

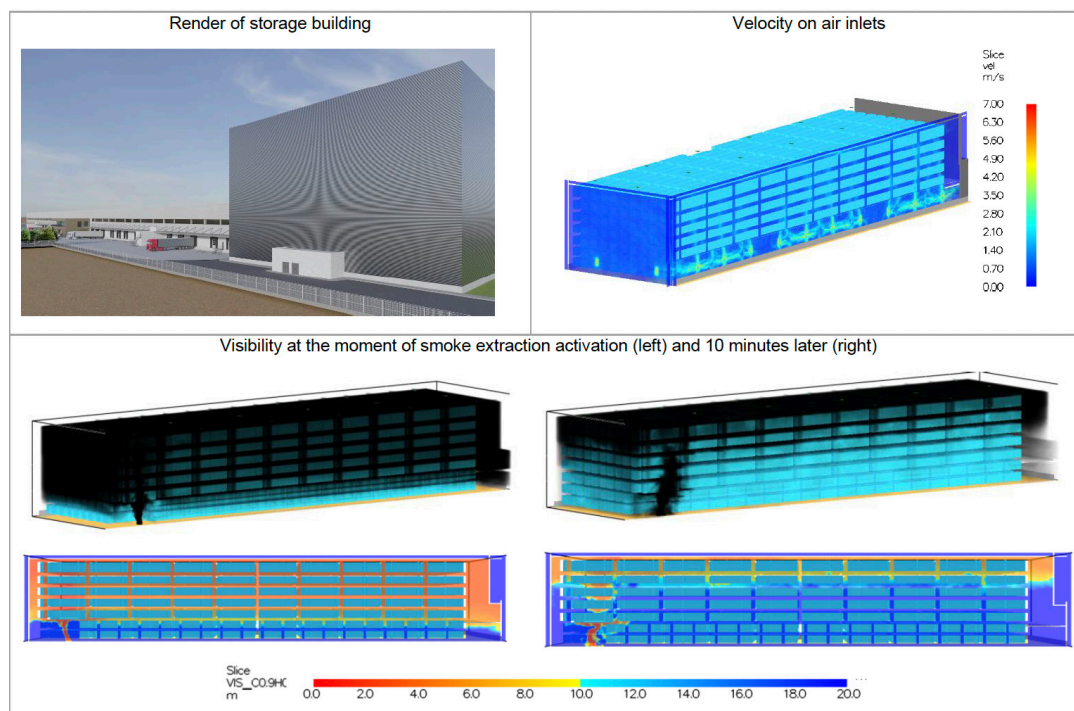
- Interested in my user manual to FDS scan the QR code



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.





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.

ARUP

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

ARUP

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

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

ARUP

Our markets



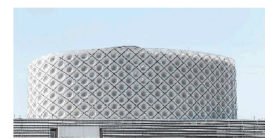
Cities



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

ARUP

Our services

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



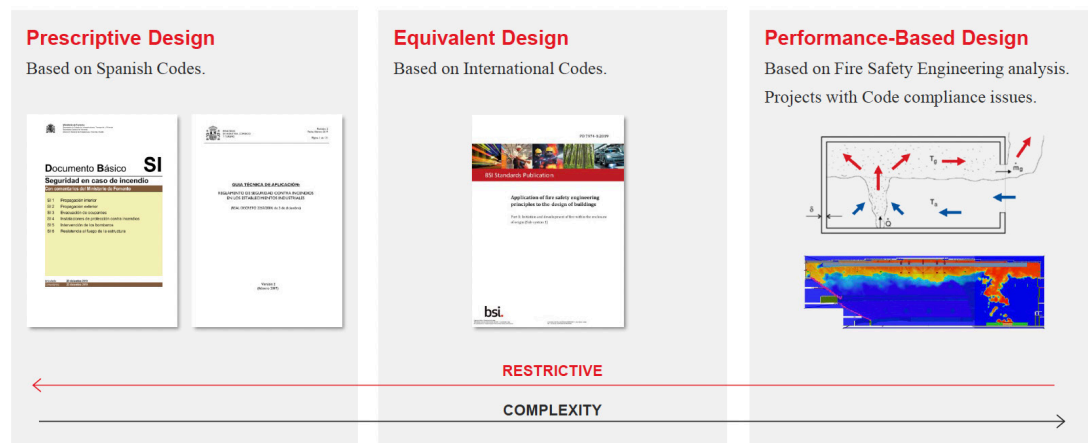
The Use of FDS in Fire Safety Engineering in Spain: Applications and Challenges

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



Extended travel distance



Smoke control system design



High occupancy



New use of spaces

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 2 m above the ground, during ASET: $\text{issus} < 60^\circ\text{C}$ Visibility > 10 m Radiation < 2.5 kW/m ² CO < 150 ppm	Improve the lighting of evacuation routes: - LED illumination of routes. - LED illumination of exits. Install a high sensitivity detection system (e.g. Class A or B aspiration detection system)
	Enabling intervention from within	At 1.8 m above the ground, during "Resistant" issue < 100°C Visibility > 10 m Radiation < 3 kW/m ²	Implement an emergency management that includes training of workers and regular drills.

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_a c_p T \sqrt{g}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Cell sizes in a ratio $D^*/s > \Delta > D^*/20$ (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.

	Polyurethane foam "GM37"
Material	
Formulation	CH1.200.2N0.28
Enthalpy of combustion _{net} (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.

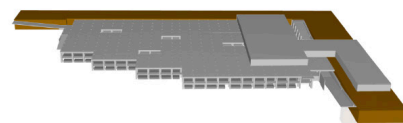
FDS simulations to calculate tenability conditions (visibility, temperature, toxicity and radiation) in order to assess evacuation (ASET) and fire services intervention.

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.

Parking FDS model



Perimetral Courtyard



Open Stairs



Visibility slice



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

15

ARUP

Some applications

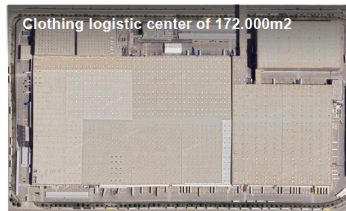
Optimization of smoke outlet vents

What?

Clothing logistic center of 172.000m².

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

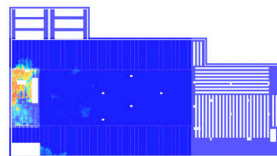
FDS simulations to reduce the number of smoke vents installed due to high maintenance costs.



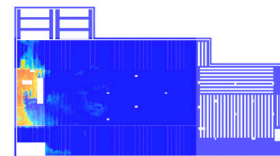
Why?

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

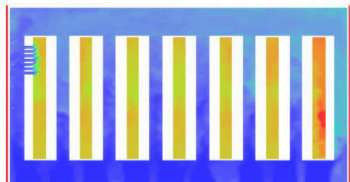
16

ARUP

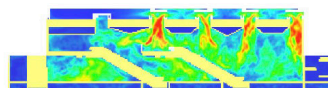
Some applications

More examples

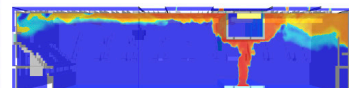
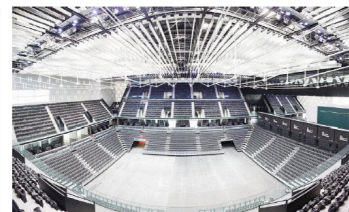
Data Centers



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

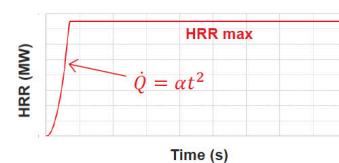
In most cases, the most important parameters to define the fire are:

- 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, FSRD).

Fire Curve Modelling



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.

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

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

19

The ARUP logo is centered within a large, solid red rectangular area. The word "ARUP" is written in a white, bold, serif typeface, with the letters closely spaced.

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

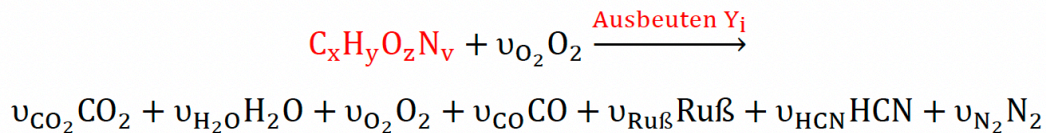
Die Herleitung von Bemessungsbränden bildet die Grundlage für die Simulation von Bränden im Rahmen ingenieurtechnischer Nachweise. Sie dienen der Quantifizierung von Brandszenarien im Hinblick auf die Freisetzung von Wärme und Rauch. Neben der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrate umfassen Bemessungsbrände 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 Normenreihe 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:

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

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

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.

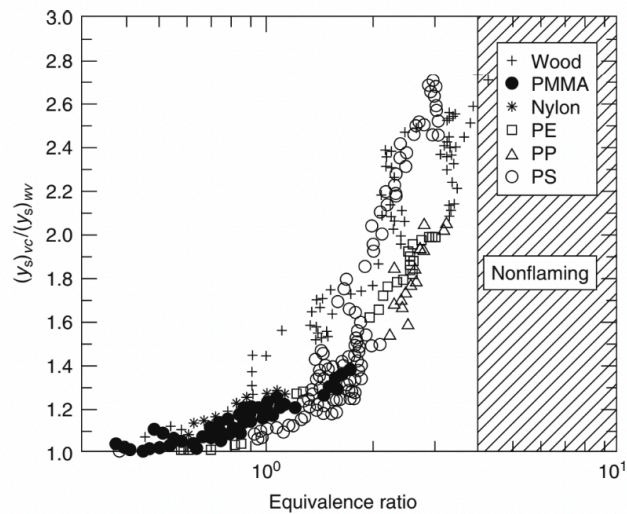


Abbildung 1: Verhältnis der Rußausbeute für brandlast- und ventilationsgesteuerte Bedingungen (Index vc steht für ventilationsgesteuerte und wv für brandlastgesteuerte Brände) [2]

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 Entrauchung 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 Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} und der effektiven Verbrennungswärme H_{eff} (auch als effektiver Heizwert bezeichnet) beschrieben werden. Somit spielen neben der Wärmefreisetzungsrate und den Ausbeuten der Verbrennungsprodukte auch die effektive Verbrennungswärme eine wesentliche Rolle bei der Modellierung der Verbrennungsreaktion.

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

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

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

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

$$H_{\text{eff}} \approx \nu_{\text{O}_2} W_{\text{O}_2} / \nu_F W_F \cdot E_{\text{O}_2}$$

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 Wärmefreisetzungsrate \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].

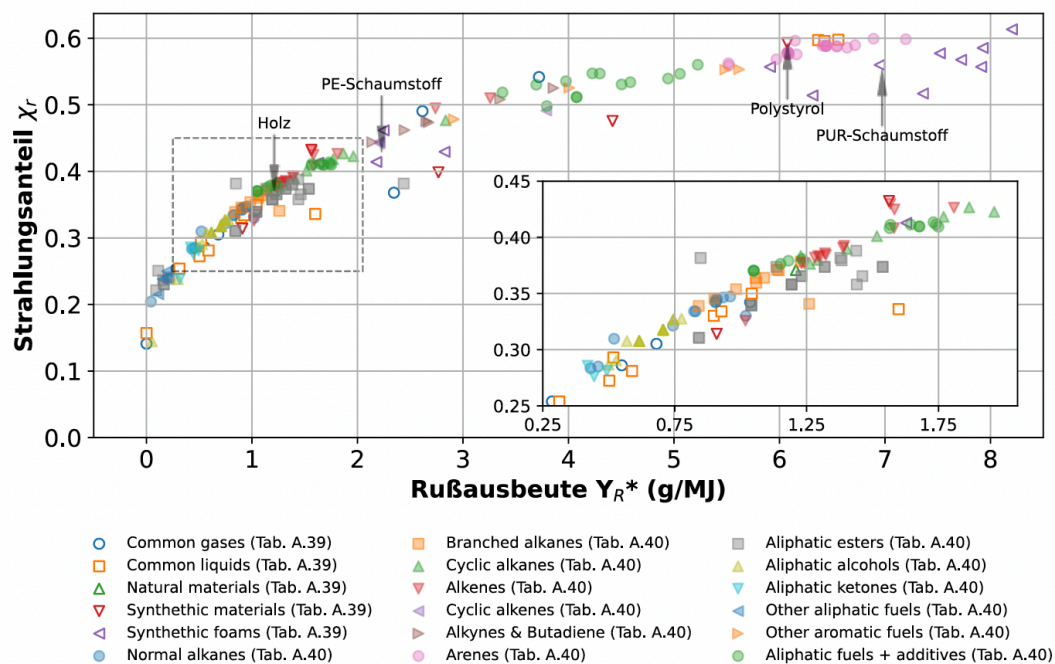


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Rußausbeute und Strahlungsanteil [3]

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 Rauchaussbeuten 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]	$C_6H_{10}O_6$	$C_{2,1}H_{3,9}O_{0,26}$	$C_8H_{7,9}O_{0,97}$	C_2H_3Cl
Effektive Verbrennungswärme H_{eff} (MJ/kg)	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 toxiologisch 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: $Y_{\text{CO,vc}} / Y_{\text{CO,wv}} = 10$ und $Y_{\text{s,vc}} / Y_{\text{s,wv}} = 2$, 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.

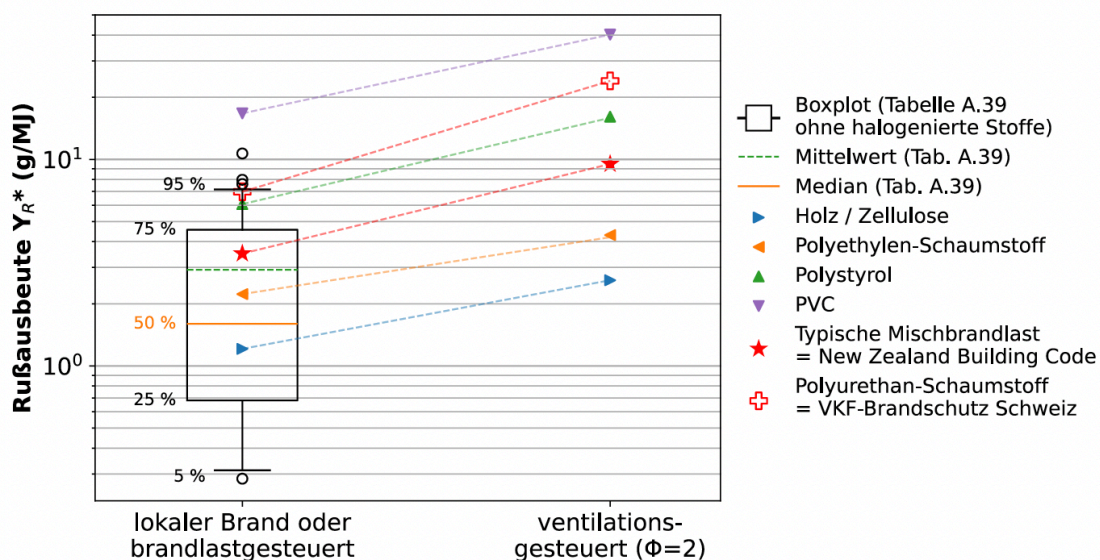


Abbildung 3: Zusammenfassung der Anhaltswerte für die Rußausbeuten

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 massespezifischen 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 Croarkin aus sieben Studien mit insgesamt 29 verschiedenen Brandstoffen mit flammender, stöchiometrischer oder überventilierter Verbrennung als Mittelwert erhoben. Die Untersuchungen umfassten photometrische Messungen der Lichttransmission 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 liegenden 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 Explosionsschutztag, 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/j.firesaf.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/j.firesaf.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/j.firesaf.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

Gregor Jäger

Benjamin Schröder

Kristian Börger

Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH

Görtzen Stolbrink & Partner mbB

Bergische Universität Wuppertal

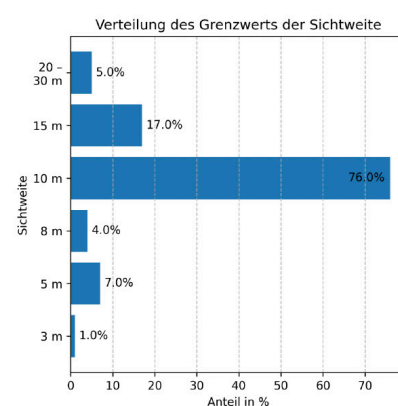
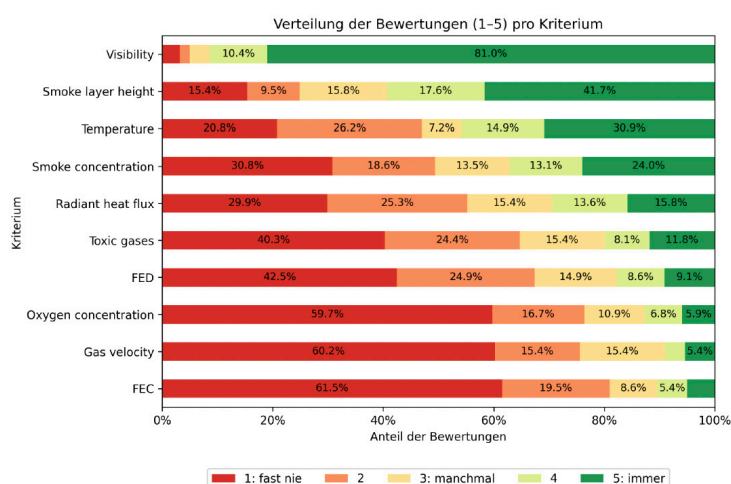


27.05.2025

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)



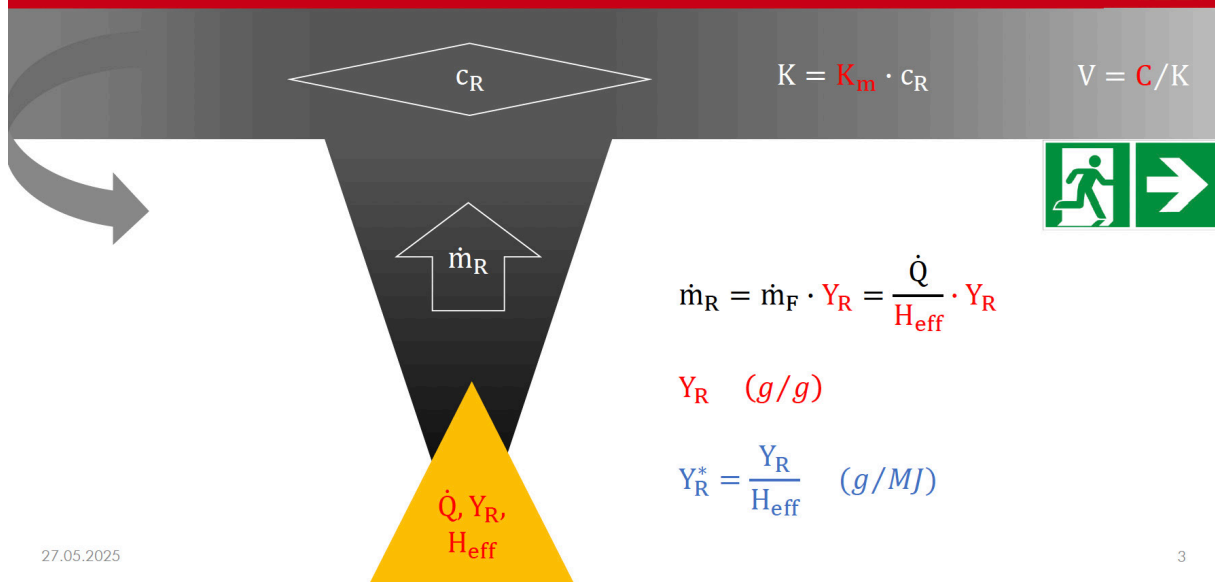
Gabriele Vigne et al. „The use of CFD and tenability criteria in Fire and Smoke Modelling in Performance Based Engineering processes – An Online Survey“. SFPE European Conference. Edinburgh, UK, 2025.

27.05.2025

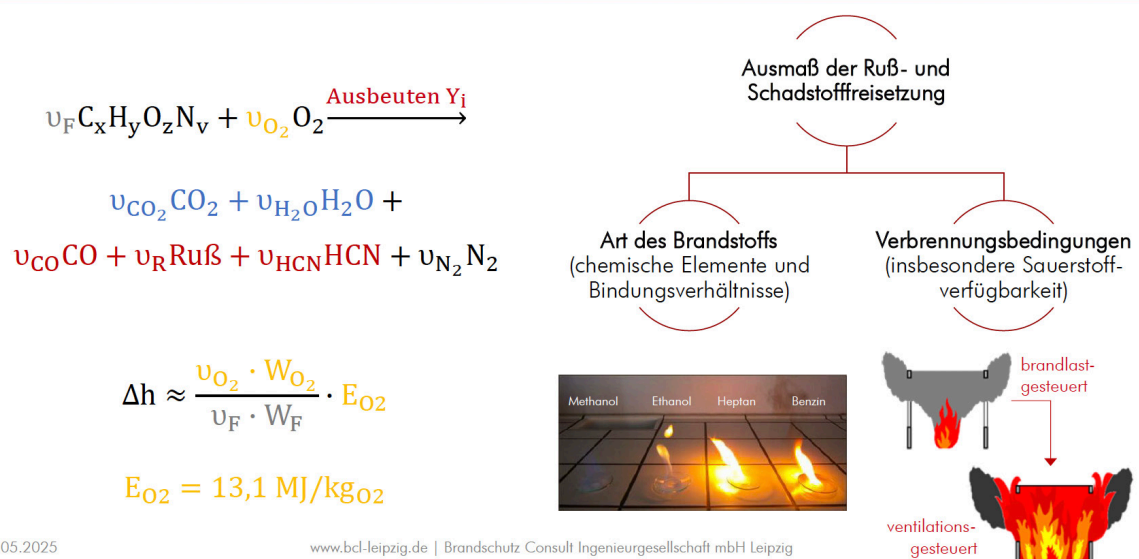
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

2

Ruß- und Schadstofffreisetzung bei Brandsimulationen



Verbrennungsmodellierung



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

Ventilations- bedingun- gen	Stoffgruppe	$h_{u,eff}$ [kJ/g] ¹	Y_{CO_2} [g/g]	Y_{CO} [g/g]	Y_{RuB} [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

27.05.2025

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

5

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 (§1 nach DIN EN 13501-1)
mittel	Polyethylen- Schaumstoff	Einrichtungen und Möbel aus Materialien mit geringem Kunststoffanteil, ungesättigte Kohlenwasserstoffe, Baustoffe mit mittlerer Rauchentwicklung (§2 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)

27.05.2025

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

6

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
Referenz-Brandstoff	Mischbrandlast	
Summenformel	$\text{CH}_{2,46}\text{O}_{0,61}$	
H_{eff} (MJ/kg)	20,0	14,8
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}	0,35 - 0,5	

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

Anwendung bei FED-Nachweisen

27.05.2025

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

9

Zusammenfassung der Anhaltswerte für Rußausbeuten

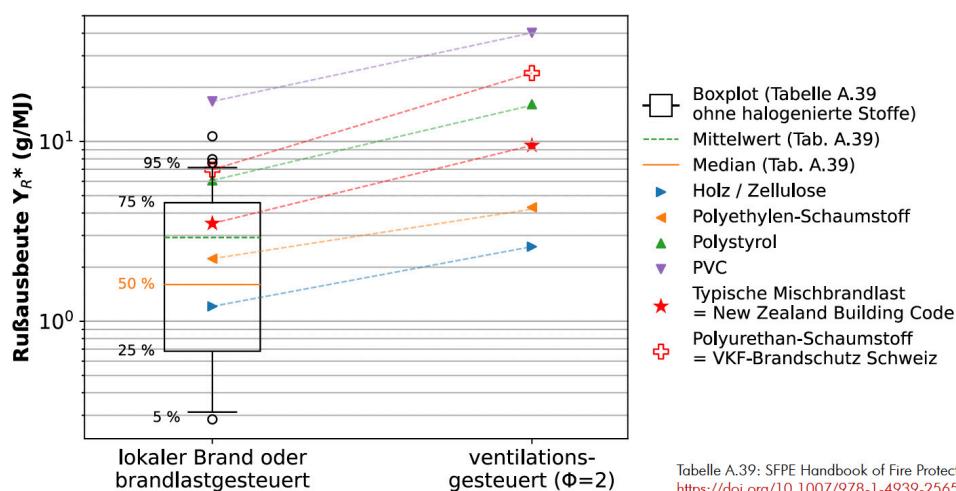


Tabelle A.39: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
<https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>

27.05.2025

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

10

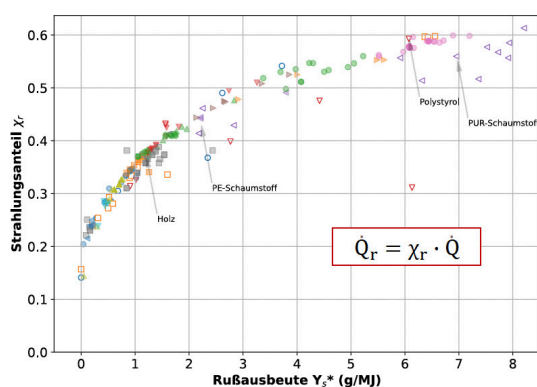
„Nebeneffekte“ der Verbrennungsmodellierung

27.05.2025

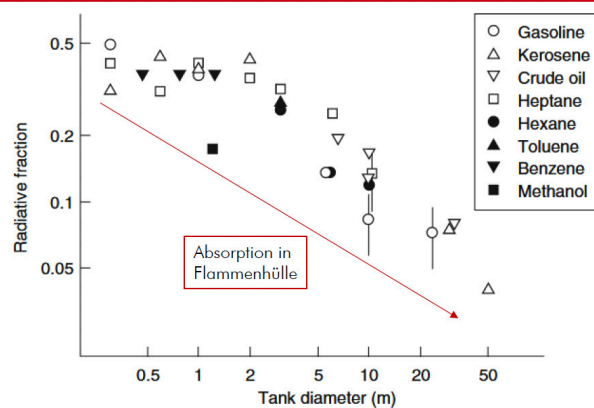
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

11

Strahlungswirkung der Flamme



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



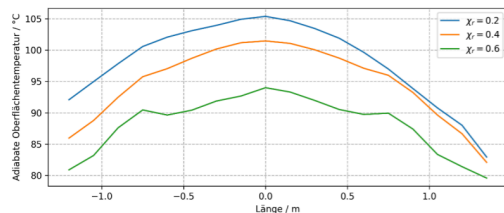
C. L. Beyler, „Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires“, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY: Springer New York, 2016, S. 2591–2663. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0.

27.05.2025

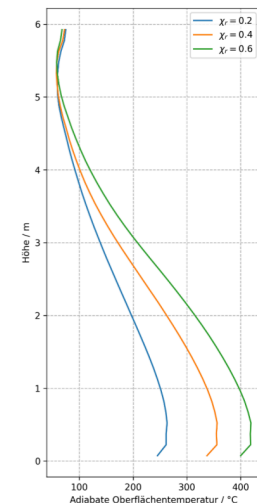
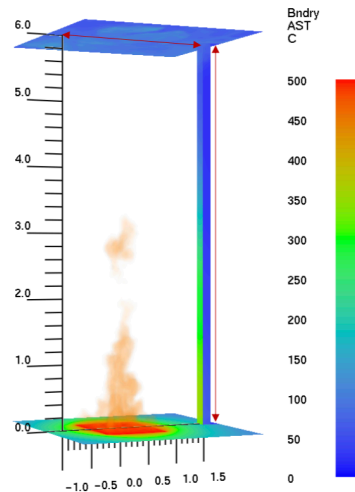
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

12

Strahlungswirkung der Flamme



\dot{Q}	X_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

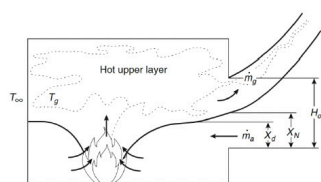


27.05.2025

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

13

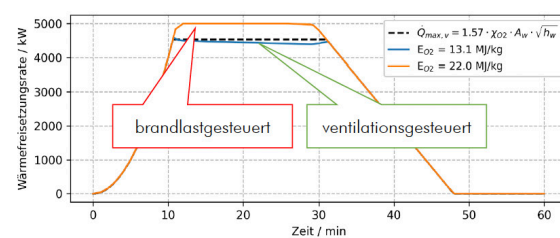
Einfluss der Stöchiometrie auf die Ventilationssteuerung



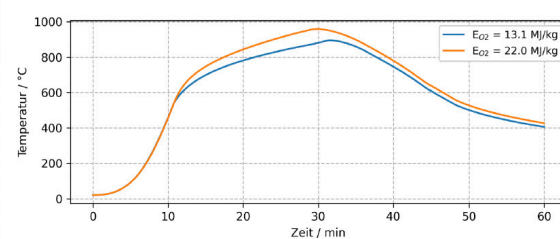
$$\dot{m}_a = 0,5 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$$

$$\dot{m}_{O_2} = 0,23 \cdot \dot{m}_a$$

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



Rauch- ausbeuten	H_{eff} (MJ/kg) Input	E_{O_2} (MJ/kg) Output	$\dot{Q}_{max,v}$ (MW) Prognose
brandlast- gesteuert	16,8	13,1	$= 1,57 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$
ventilations- gesteuert	10,0	13,1	$= 2,65 \cdot \chi_{O_2} \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w}$
	16,8	22,0	



27.05.2025

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

14



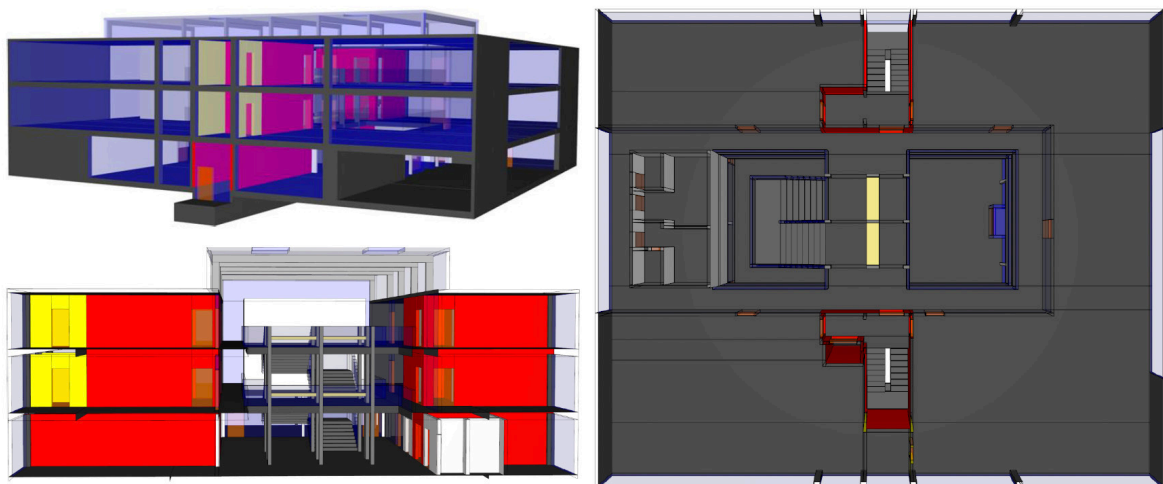
Anwendungsbeispiel und Methodenevaluierung

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

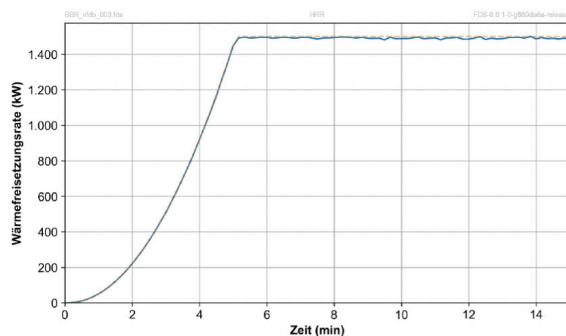
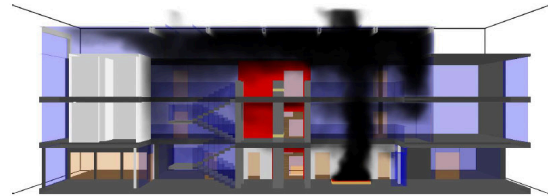
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

16

Bemessungsbrandszenario



Lokaler Brand im Erdgeschoss
Brandlastgesteuerte Bedingungen
Hohe Rußfreisetzung → *Polystyrol*



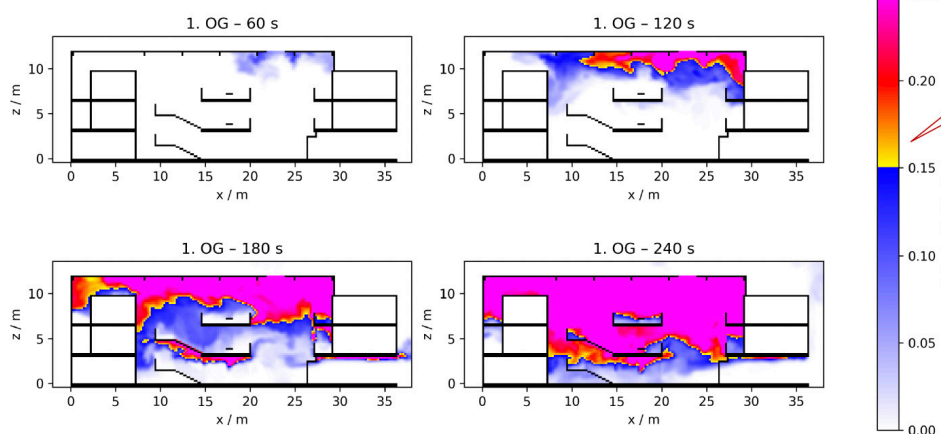
Referenz-Brandstoff	Polystyrol
Summenformel	$C_8H_{7,9}O_{0,97}$
Eff. Verbrennungswärme H_{eff} (MJ/kg)	27,0
CO-Ausbeute Y_{CO} (g/g)	0,060
Rußausbeute Y_R (g/g)	0,164

27.05.2025

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

17

Klassische Auswertung anhand der lokalen Verrauchung



27.05.2025

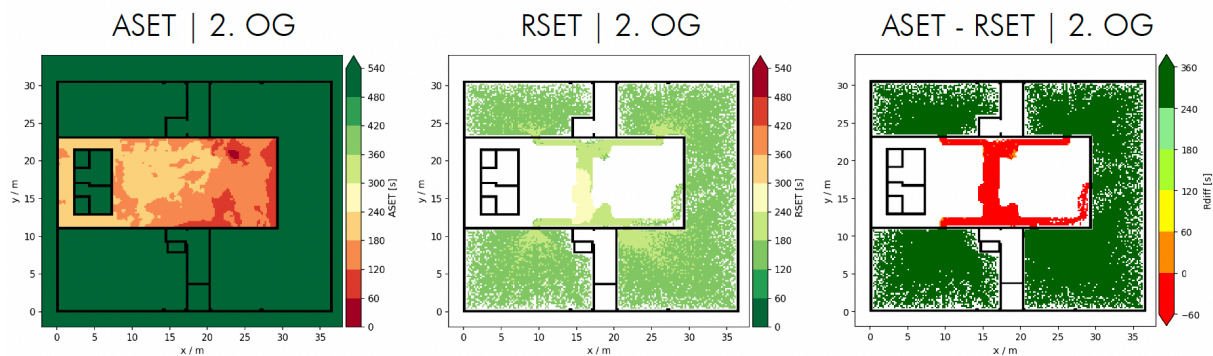
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

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



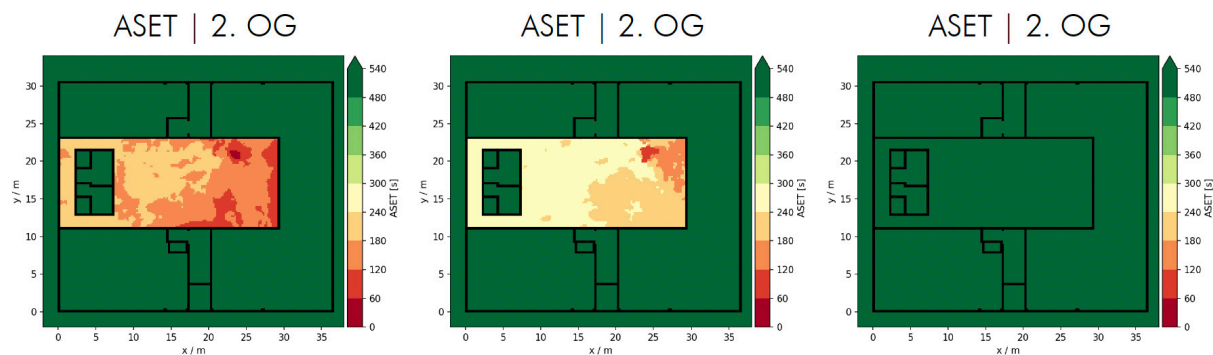
Hohe Rußfreisetzung
Referenz: Polystyrol



Mittlere Rußfreisetzung
Referenz: PE-Schaum



Geringe Rußfreisetzung
Referenz: Holz



27.05.2025

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

20

Ausblick

27.05.2025

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

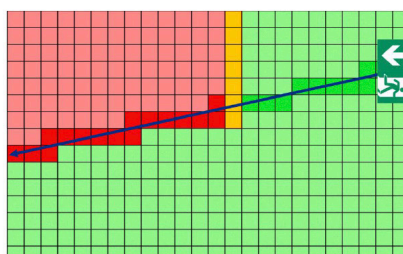
21

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>.

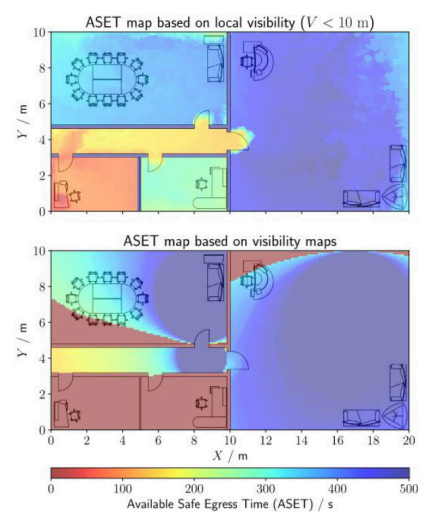
<https://github.com/FireDynamics/fdsvismap>



■ Concealed cells → Line of sight
■ Unconcealed cells → Waypoint

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

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

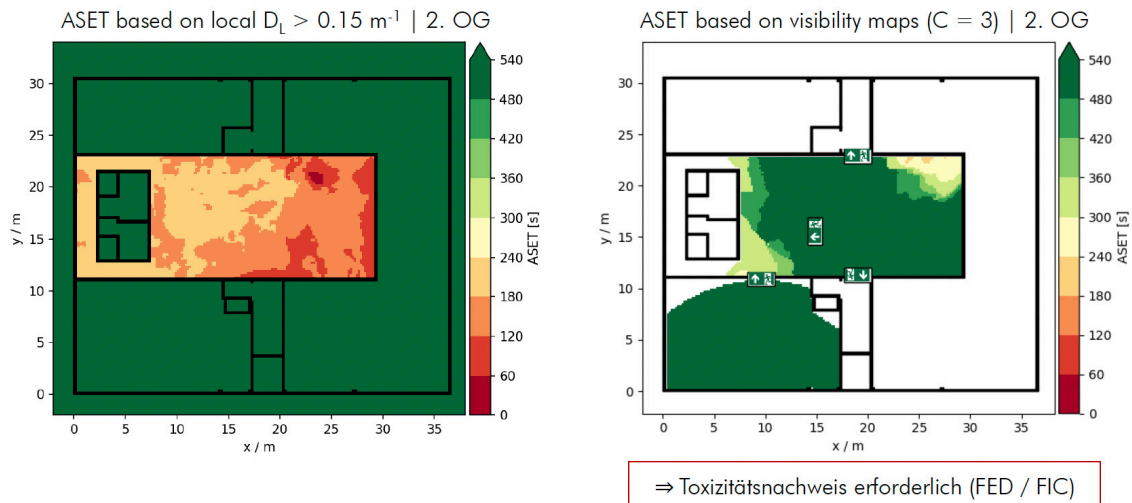


27.05.2025

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

22

Visibility Maps – Sichtweite als integrierte Größe entlang des optischen Pfads



27.05.2025

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

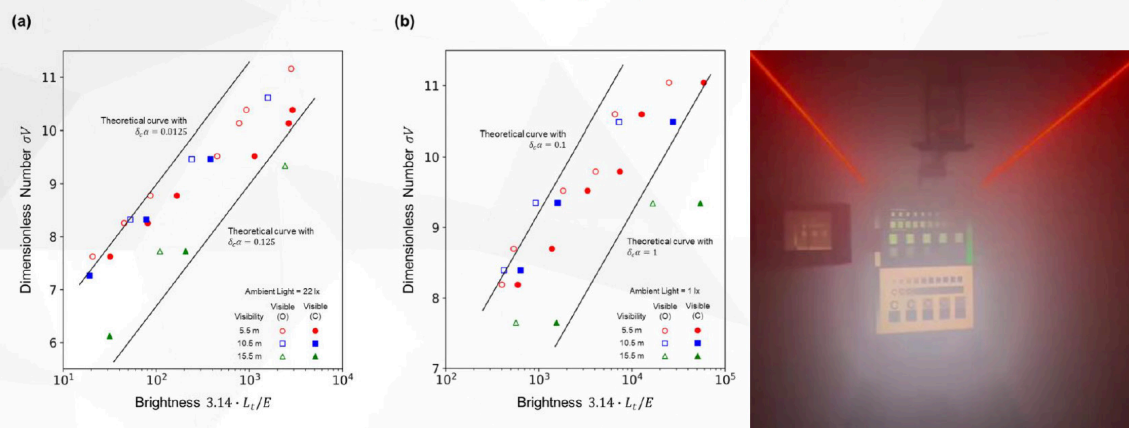
23

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.



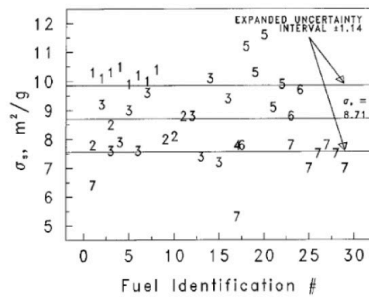
27.05.2025

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

24

Skalenabhängigkeit K_m 

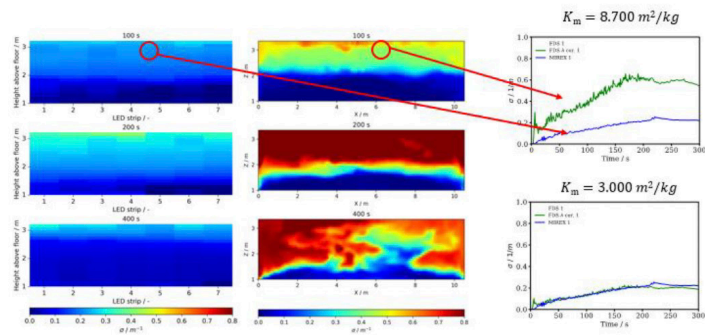
$$K = K_m \cdot c_R$$



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).

LEDSA (Experiment)

FDS (Simulation)



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, Alica, 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*

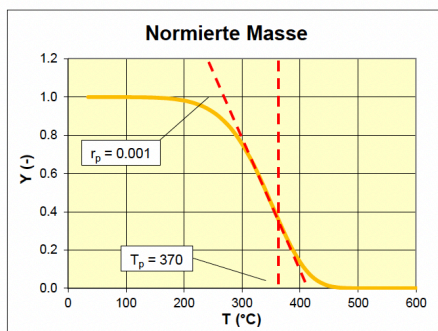
- TGA-Versuch:**
- Sehr geringe Probengröße, ca. 1 mm³.
 - Wärmeleitung vernachlässigbar, daher $T = T(t)$.
 - Lineare Aufheizrate, daher $\dot{T} = \text{const.}$
 - Messgröße: Normierte Masse $Y(t)$.

Vereinfachte Arrheniusgleichung:

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

$$Y(0) = 1$$

Zur Arrheniusgleichung



$$\dot{Y}(t) = -AY(t)e^{-E/RTt}, Y(0) = 1$$

Typischer TGA-Versuch für *einfaches* Material:

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

Formeln für A und E ¹:

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

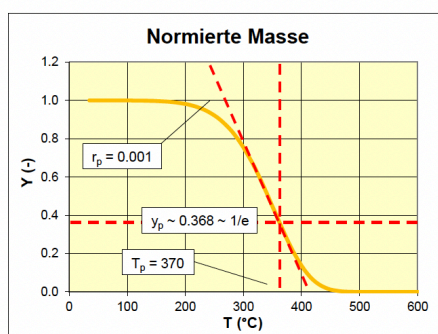
T_p , Referenztemperatur

r_p , Referenzrate

\dot{T} , Aufheizrate

¹ Siehe FDS User's Guide

Zur Arrheniusgleichung



$$\dot{Y}(t) = -AY(t)e^{-E/RTt}, Y(0) = 1$$

Typischer TGA-Versuch für *einfaches* Material:

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

Formeln für A und E :

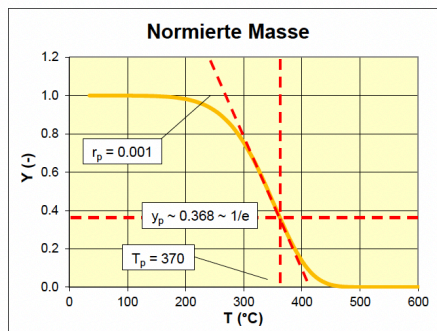
$$E = \frac{1}{y_p} r_p \frac{RT_p^2}{\dot{T}}, A = \frac{1}{y_p} r_p e^{E/RT_p}$$

T_p , Referenztemperatur

r_p , Referenzrate

\dot{T} , Aufheizrate

Zur Arrheniusgleichung



$$\dot{Y}(t) = -AY(t)e^{-E/RTt}, \quad Y(0) = 1$$

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 $\alpha = A, \beta = E/RT$ 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 $\alpha = A$, $\beta = E/RT$ 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 $\alpha = A$, $\beta = E/RT$ 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 $\alpha = A$, $\beta = E/RT$ 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 $\alpha = A$, $\beta = E/RT$ 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 $\alpha = A$, $\beta = E/RT$ 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 $\beta = E/R\dot{T}$ 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:

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

$Y(t_p)$ 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 $\alpha\beta$

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

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:

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

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:

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

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:

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

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:

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

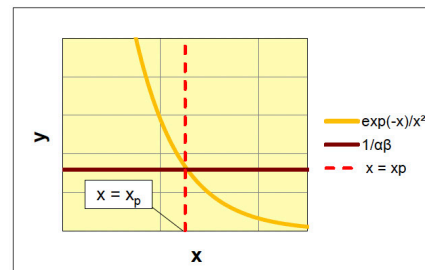
Zur Arrheniusgleichung

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

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

Zur Arrheniusgleichung

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

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

$$J \leq J_a$$

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**

Tunnel-Entrauchung:

Einfluss der natürlichen Längsströmung auf die
Entrauchungsstrategie

Frederik Buhk, hhpberlin



- 1 Fragestellung
- 2 Randbedingungen
- 3 Entwicklung eines Entrauchungskonzeptes
- 4 Besonderheiten der FDS-Simulation



Fragestellung

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

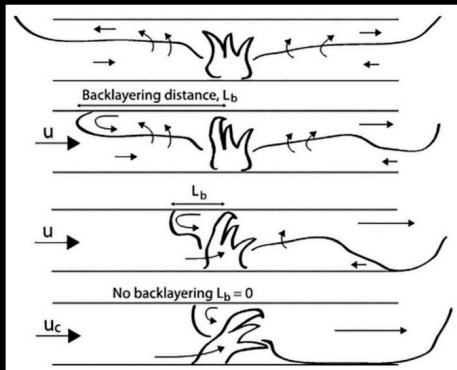


Randbedingungen

- 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



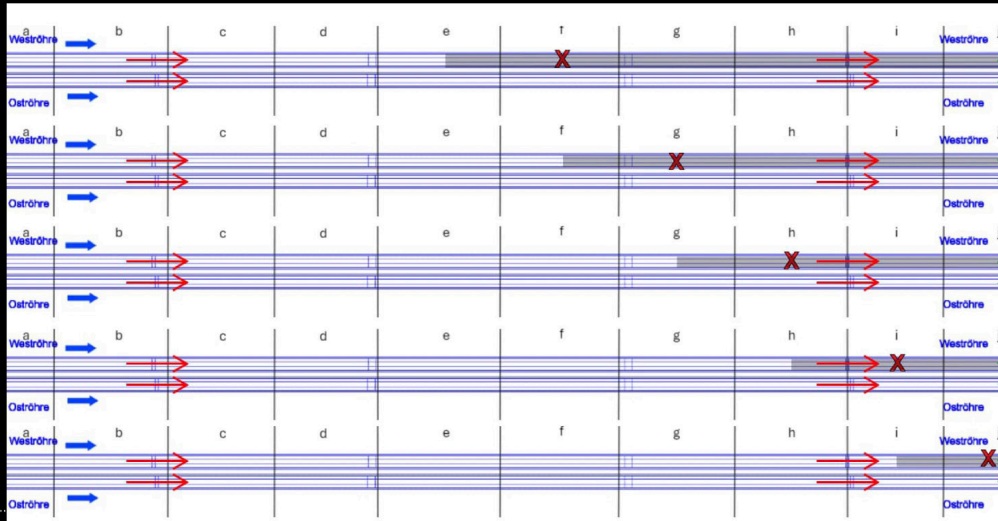
- Rauch strömt auch entgegen der Strömung
- Kritische Geschwindigkeit abhängig von Brand und Tunnel

2

Entwicklung
eines
Entrauchungs
konzeptes

3

Längsströmung < 1,5 m/s



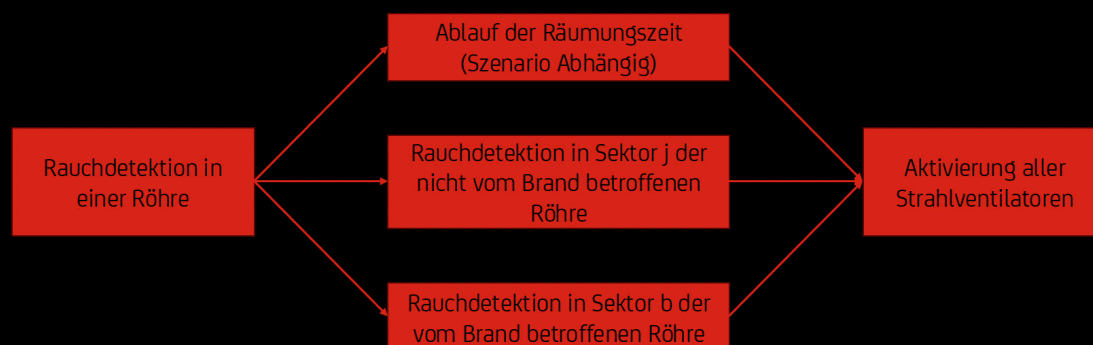
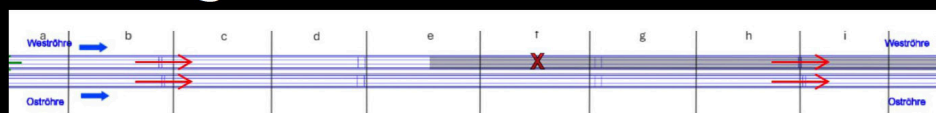
3

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



3

Ansteuerung



3

Besonderheiten
der FDS
Simulation

4

Besonderheiten der FDS Simulation

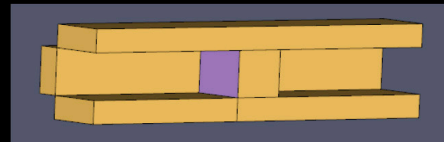
Abbildung der Grundströmung Rauchdurchlässig

- 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

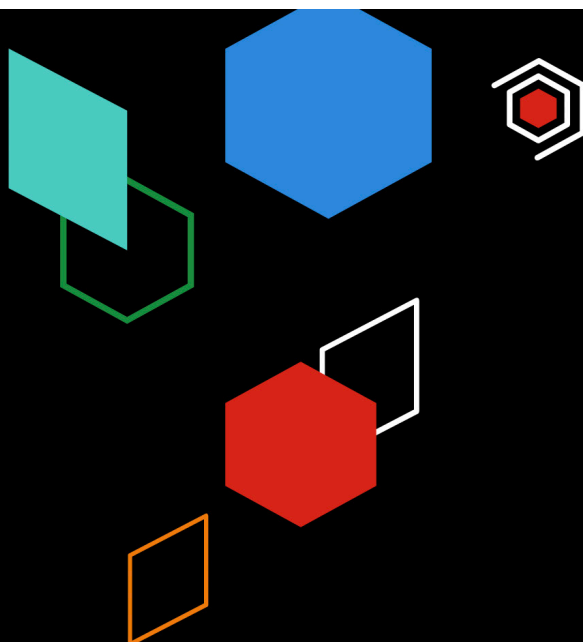
Impressum

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

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

Geschäftsführer:
Gregor Dunkel, M. Sc.
Ing. Joep Bruins
Britt Schuur, 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

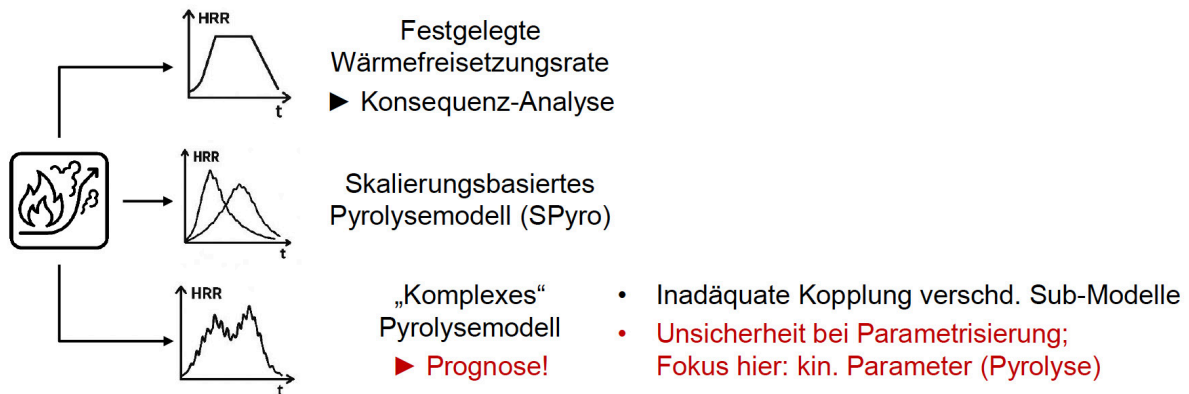
Felix Armbrust, Jochen Zehfuß, Olaf Riese (TU Braunschweig)

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 Zersetzungen (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

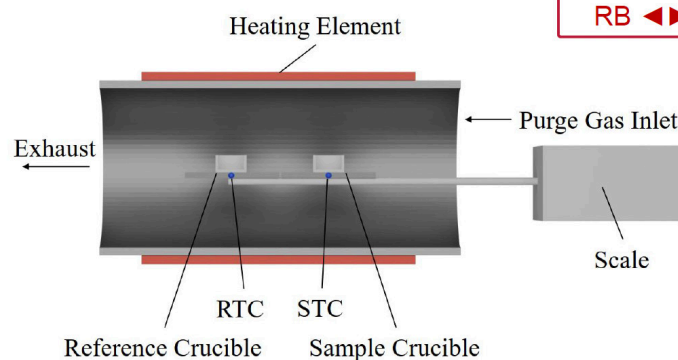
- Daten, die Reaktionsrate beschreiben, sollen nur von Kinetik abhängen
- Andere Transportphänomene (Wärmetrsp., Massentransport) sollen vernachlässigbar sein
- ▶ **0D-Annahme: instantane Erwärmung, instantaner Massenverlust**
- Bestimmung kinetischer Parameter
 - Modellbasierte Ansätze (nte-Ordnung,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

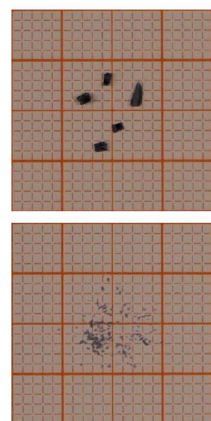
1. Wie sicherstellen, dass 0D-Annahme eingehalten wird? **ICTAC!**
2. Probenform beeinflusst maßgeblich Zersetzungsverhalten.
Welche Auswirkungen bestehen in Bezug auf eine Brandprognose?



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 7

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



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 8

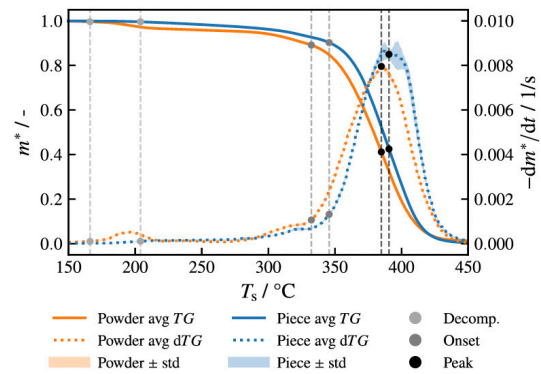
Zersetzungsverhalten von PMMA

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

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

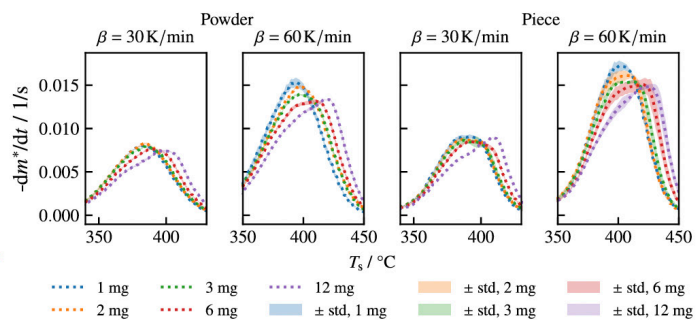
$$\Delta T_{\text{onset}} = 13,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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



Einfluss der Probenmasse

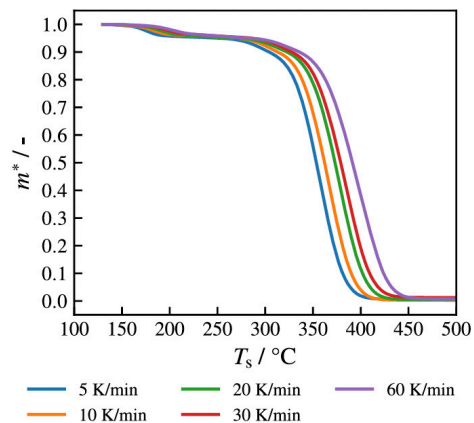
- Negative Auswirkungen v.a. bei $\uparrow m$ und $\uparrow \beta$ zu erwarten
- Untersuchungsschwerpunkt: 30 & 60 K/min
- Schrittweise Reduktion von m_0
- Kongruente Verläufe nur bei $\beta \leq 30 \text{ K/min}$ und $m \leq 3 \text{ mg}$
- Zstl. Aufsplitten des Peaks bei $\uparrow n$



► 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



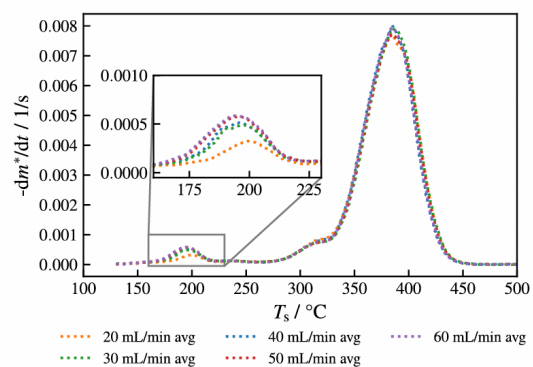
[Moukhina, 2012; Vyazovkin et al., 2014]



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 \downarrow 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

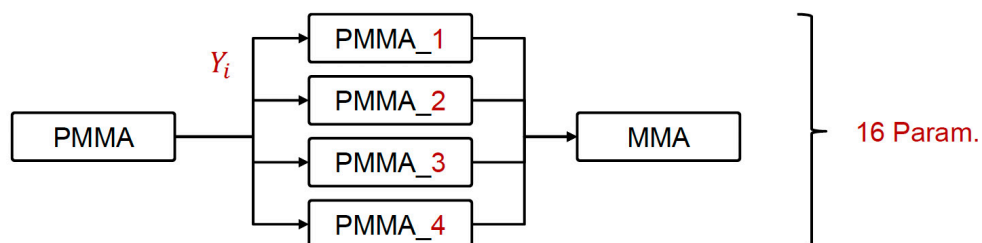


10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 13

Ableitung kinetischer Parameter

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

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

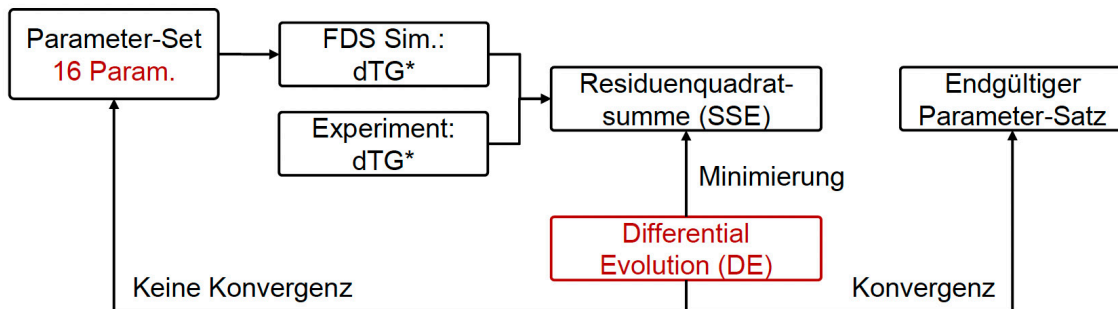


10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 14

[McGrattan et al., 2025]

Ableitung kinetischer Parameter

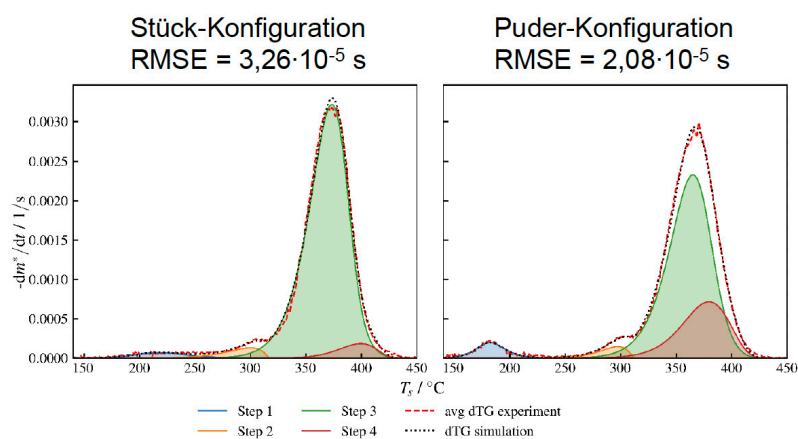
- Optimierungs-Workflow



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 15

*10 K/min, 3 mg

Ergebnis der Optimierung



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 16

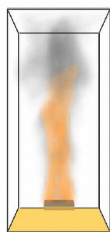
Konsequenz-Analyse

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



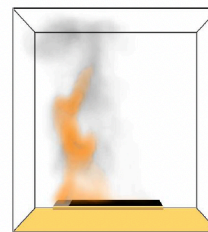
1) Inerte Zersetzung

- Probe 10x10x2 cm³
- Keine Gasphasen-Reaktion
- WSD: 20-75 kW/m²



2) Cone Kal. Experiment

- Probe 10x10x2 cm³
- Mit Gasphasen-Reaktion
- WSD: 20-75 kW/m²



3) Szenario für Brandausbreitung

- Probe 35x10x2 cm³
- Entzündung: 5x10 cm² mit 50 kW/m²
- Vorwärmung: 30x10 cm² mit 10 kW/m²
- Mit Gasphasen-Reaktion

[McGrattan et al., 2025b]



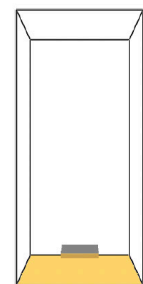
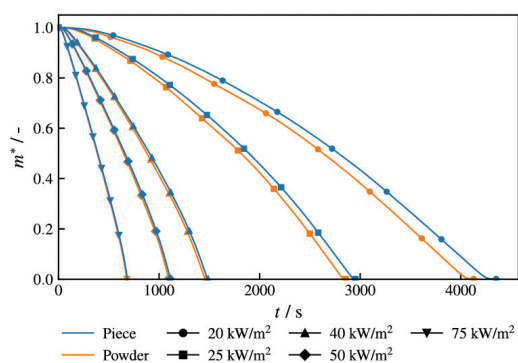
10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 17

Simulation – Inerte Zersetzung

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

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

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



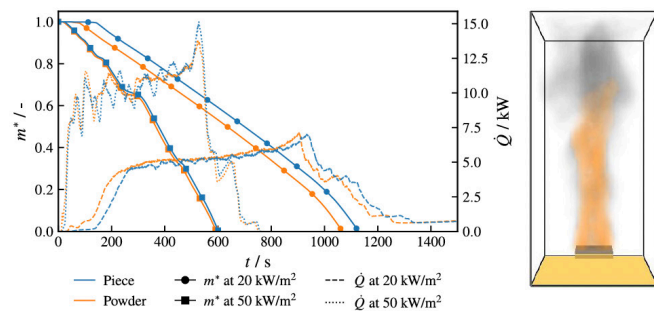
10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 18

Simulation – Cone Kalorimeter Experiment

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

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

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



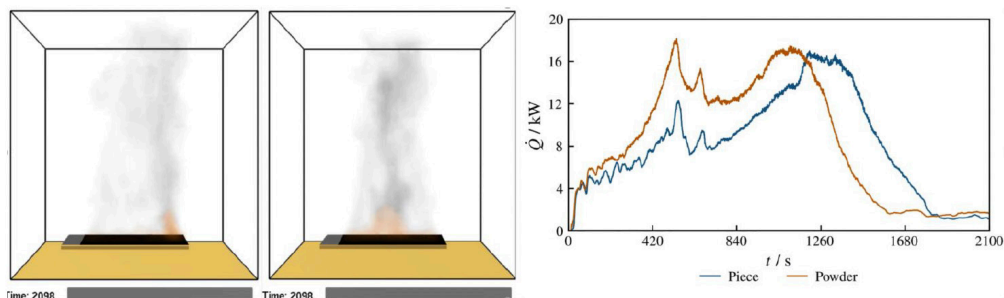
10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 19

Simulation – Szenario für Brandausbreitung

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

Stück-Konfiguration

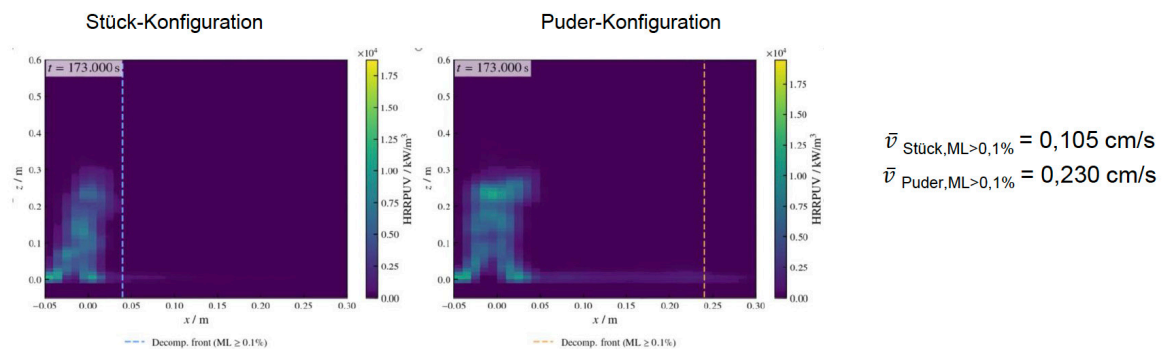
Puder-Konfiguration



10.10.2025 | Armbrust | Einflüsse experimenteller Randbedingungen auf die Parametrisierung eines Pyrolysemodells | S. 20

Simulation – Szenario für Brandausbreitung

- Auch in Bezug auf Ausbreitungsgeschwindigkeit der Zersetzungsfront



Diskussion & Fazit

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

► Weitere Untersuchungen notwendig

[Oswald & Wiedemann, 1977; DiDomizio & McKinnon, 2023]

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 recommendations 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



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 Kutschenreuter



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

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