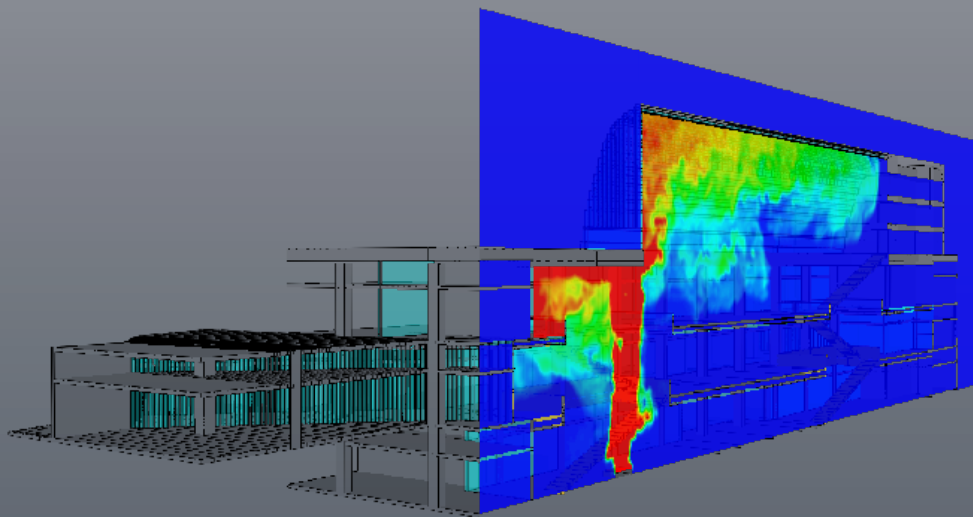


17. ANWENDERTREFFEN DER FDS USERGROUP

TAGUNGSBAND ZUSAMMENSTELLUNG DER VORTRÄGE

Datum:
09.11.2023

Ort:
Berlin + Microsoft-Teams
Konferenz



INHALT

Sensitivitätsanalyse und Validierung des vereinfachten Naturbrandmodells für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA Anna Troff	2
Wärmefreisetzung im ventilationsgesteuerten Raumbrand unter Berücksichtigung von Lithium-Ionen-Batterien und Bedeutung für die Bemessung nach Eurocode Burkhard Forell	11
Steuerung der Wärmefreisetzungsrate in FDS zur Optimierung der Sauerstoffausnutzung bei ventilationsgesteuerten Bränden Walter Klein-Heßling	24
Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen mittels KI-basierter Daten Patrick Lauer / Manuel Osburg	37
Entwicklung einer Schnittstelle zur Visualisierung von Brandsimulationen im virtuellen Raum Toni Nabrotzky	49
Simulation der Brandausbreitung an begrünten Fassaden - Erarbeitung von Voraussetzungen und Grundlagen Johannes Schliebe	56
Experiments and modeling of the spread of fire between containers on board a container ship using FDS Bjarne Husted	65
Abbildung von sichtbaren Holzoberflächen in Brandsimulationen - Modellierungsansätze und Validierungsberechnungen Sven Brunkhorst	80

Anna Troff

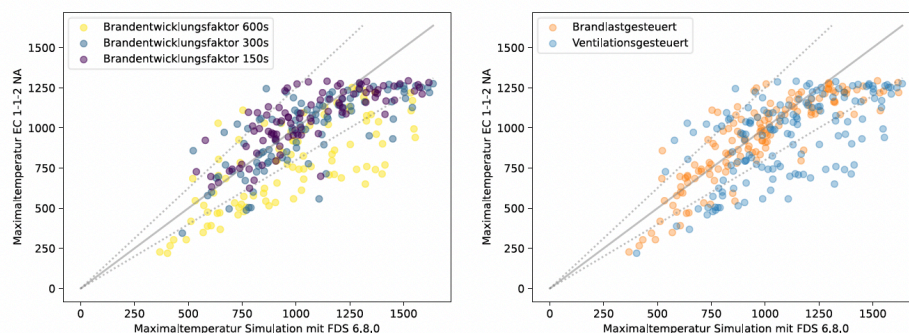
Sensitivitätsanalyse und Validierung des vereinfachten Naturbrandmodells für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA

Abstract:

Gegenüber allgemeinen Naturbrandmodellen (Zonen- oder Feldmodelle) können vereinfachte Naturbrandmodelle zeitabhängige Brandparameter mit einem deutlich geringeren Aufwand und einer begrenzten Anzahl betrachteter Eingabeparameter approximieren. [1] In Deutschland kann für vollentwickelte Raumbrände das im Anhang AA der DIN EN 1991-1-2/NA beschriebene Verfahren zur Bestimmung einer parametrischen Temperaturzeitkurve verwendet werden. Mit dieser können in den Anwendungsgrenzen des Modells die zur Bemessung anzusetzende Heißgastemperatur bestimmt werden und sie bietet so eine Alternative zur Bauteilbemessung mit der Einheits-Temperaturzeitkurve.

Validiert wurde dieses Modell anhand von Simulationen mit dem Zonenmodell CFAST und einer Reihe von dokumentierten Brandversuchen. Durch gestiegene Rechenkapazitäten besteht nun allerdings die Möglichkeit einer erneuten Untersuchung der parametrischen Temperaturzeitkurve durch das Feldmodell FDS.

Aus diesem Grund wurden Simulationsreihen mit FDS durchgeführt die den gesamten Anwendungsbereich des Modells nach EC 1-1-2/NA abdecken. Die sich dabei ergebenden Abweichungen wurden anhand verschiedener Methoden der Sensitivitätsanalyse untersucht und Parameter identifiziert, welche Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus FDS-Simulationen und der parametrischen Temperaturzeitkurve verstärken. In der untenstehenden Abbildung sind zwei Beispiele für die parameterabhängige Abweichung der Maximaltemperaturen dargestellt.



Durch die umfangreicheren Einstellungsmöglichkeiten bei der Modellierung des Bemessungsbrandes in FDS, konnten ebenfalls der Einfluss zusätzlicher Parameter betrachtet werden. Diese Parameter wurden bisher nicht oder nur am Rande in der parametrischen Temperaturzeitkurve betrachtet. Zu nennen sind hier die betrachteten Brandstoffe und Rußausbeuten sowie spezifische Geometrieparameter (zum Beispiel die räumliche Anordnung der Öffnungsflächen).

[1] Zehfuß, Jochen (2020): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. 4. Aufl. Hg. v. vfdb.

Sensitivitätsanalyse und Validierung des vereinfachten Naturbrandmodells für vollentwickelte Raumbrände nach DIN EN 1991-1-2/NA

Anna Troff

17. Anwender-Treffen der FDS Usergroup

09.11.2023

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

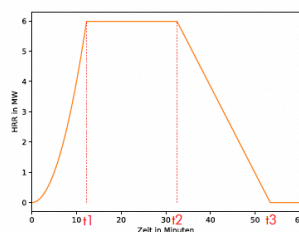


DIN EN 1991-1-2/NA

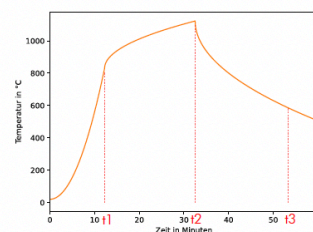


Was beinhaltet der nationale Anhang von DIN EN 1991-1-2?

- Enthält im Anhang AA ein vereinfachtes Naturbrandmodell für die zeitabhängige Temperatur in vollentwickelten Raumbränden
- Parameter: Raumgeometrie, Ventilation, Brandlast und die thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile



Verlauf der Wärmefreisetzung



Temperaturverlauf

09.11.2023

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

2

Parameter und Anwendungsgrenzen



- Für ventilations- und brandlastgesteuerte Szenarien abweichende Verfahren
- 9 Parameter wurden in jeweiligen Anwendungsgrenzen untersucht

Raumgeometrie		Ventilation		Brandlast		Thermische Eigenschaften	
Grundfläche (m ²)	[12,5; 400]	Öffnungsfläche (Anteil)	[0,125; 0,5]	Brandlastdichte (MJ/m ²)	[100; 1300]	Wärmespeichervermögen (J/(m ² *s ^{0,5} *K))	[500; 2500]
Seitenverhältnis des Brandraumes	[1; 3]	Öffnungshöhe (m)	[0,5; 2,3]	Brandentwicklungsfaktor (Sekunden)	[150; 600]		
Raumhöhe (m)	[2,5; 5]			Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate (MW/m ²)	[0,15; 0,5]		

09.11.2023

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

3

Schritte in der Masterarbeit



1. Sensitivitätsanalyse, um zu identifizieren, welche Parameter den größten Einfluss auf den Temperaturoutput haben
2. **Vergleich zwischen Temperaturoutputs der parametrischen Temperaturzeitkurve (PTZK) und korrespondierenden FDS-Simulationen**
 - Validierung des Modells mit FDS (ursprüngliche Validierung mit CFAST)
 - Identifikation von Parametern mit großem Einfluss auf die Übereinstimmung oder Abweichung von Modell und Simulation
3. Untersuchung zusätzlicher Parameter, die nicht im vereinfachten Naturbrandmodell betrachtet werden

09.11.2023

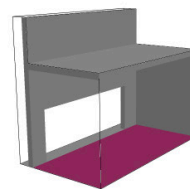
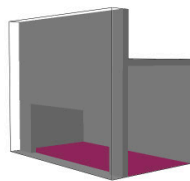
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

4

Durchführung - Validierungssimulationen mit FDS



- Durchführung und Auswertung von 300 Einzelsimulationen mit gleicher Anzahl von ventilations- und brandlastgesteuerten Szenarien
- Abdeckung des Anwendungsbereiches von EC 1-1-2/NA mit den gewählten Parameterkombinationen (Monte-Carlo Analyse)
- Bei einzelnen Parametern keine Gleichverteilung über den Anwendungsbereich möglich



09.11.2023

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

5

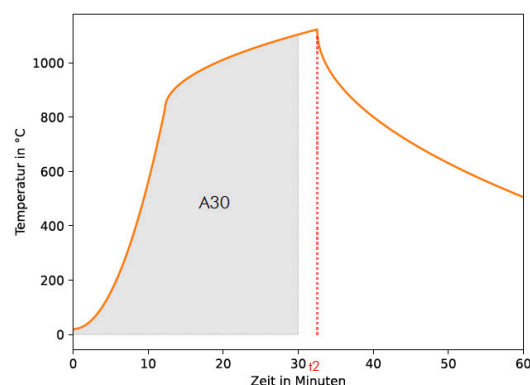
Durchführung - Übergreifende Einstellungen in FDS



- Gitterweite: 0,25 m
- Gesamte Raumfläche wird als Brandfläche angenommen
- Mittlere Adiabatische Oberflächen-temperatur der Decke
- Brandmodellierung mit vorgegebener Wärmefreisetzungsrate

Vergleichsparameter:

- Temperatur zum Zeitpunkt t_2
- Temperaturintegral über 30, 60, 90 and 180 Minuten
- Root Mean Square Error



09.11.2023

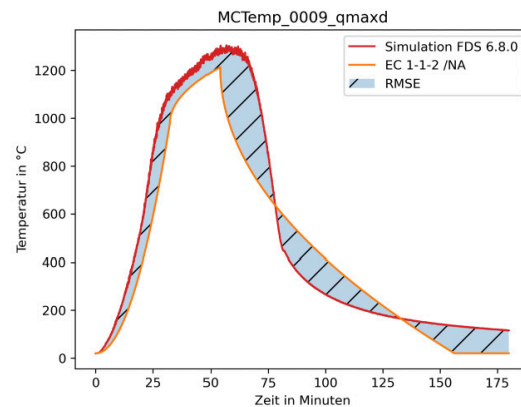
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

6

Durchführung - Root Mean Square Error



- Gibt die Abweichung von zwei Datensätzen mit gleicher Anzahl Einträgen an
- Normierung auf Maximalwert, um Vergleichbarkeit unter Simulationen zu schaffen



09.11.2023

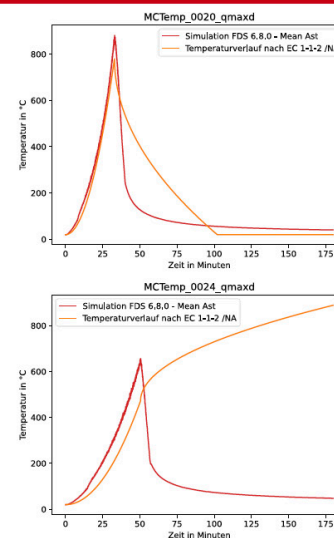
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

7

Durchführung - Beobachtete Sonderfälle



- Nach EC 1-1-2/NA teilweise höhere Temperaturen zum Zeitpunkt t3 errechnet als zum Zeitpunkt t2
- Für bessere Vergleichbarkeit in diesen Fällen T3 auf 50% von T2 heruntergesetzt



09.11.2023

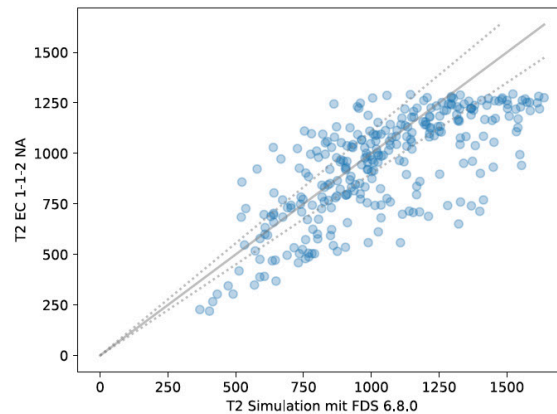
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

8

Ergebnisse - Validierungssimulationen mit FDS



- Scatterplots mit Vergleichsparameter
- Abweichungen außerhalb der Unsicherheit für Temperaturbestimmungen in FDS
- Tendenziell größere Temperaturen in FDS



09.11.2023

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

9

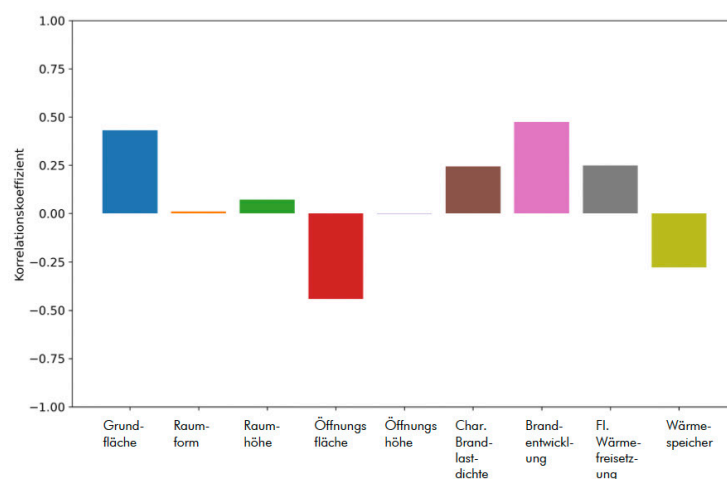
Ergebnisse - Parametereinfluss auf RMSE



- Rankanalyse der Korrelation von Parameterausprägung und RMSE nach Spearman

Große Abweichungen der Temperaturverläufe bei:

- Großen Grundflächen
- Kleinen Öffnungsflächen (Ventilationssteuerung)
- Großen Brandentwicklungsfaktoren

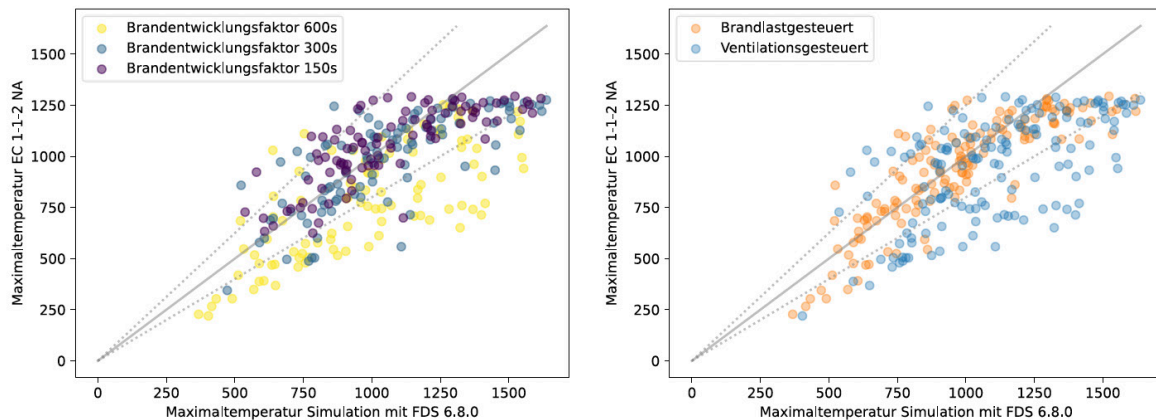


09.11.2023

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

10

Ergebnisse – Brandentwicklungsfaktor und Ventilationssteuerung



09.11.2023

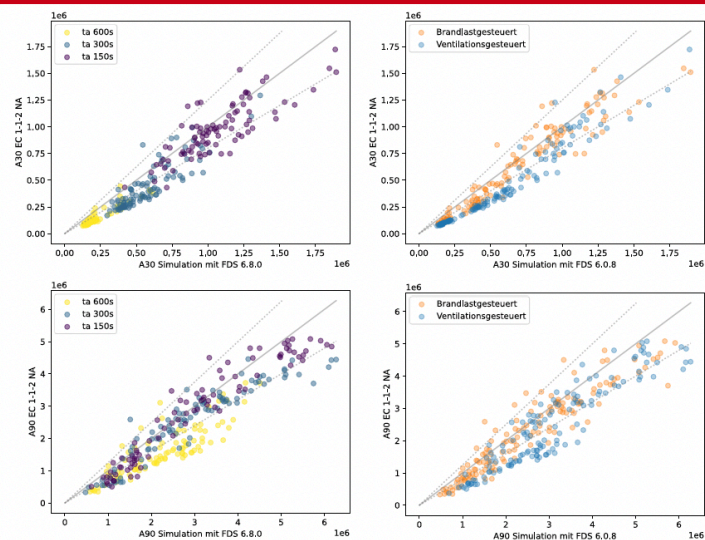
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

11

Ergebnisse – Brandentwicklungsfaktor und Ventilationssteuerung



- Am Beispiel der Temperaturintegrale nach 30 und 90 Minuten Vergleich zwischen PTZK und FDS-Simulation
- Einfärbung nach Brandentwicklungsfaktor und Ventilationssteuerung



09.11.2023

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

12

Vergleich zur ursprünglichen Validierung



CFAST:

- Höherer grad der Übereinstimmung mit geringerer Streuung
- Nicht alle hier betrachteten Parameter wurden variiert
 - Brandentwicklung
 - Flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate
- Vermehrte Betrachtung von brandlastgesteuerten Szenarien

Dokumentierte Brandversuche:

- Deutlich größere Streuung als in CFAST (Vergleichbar mit FDS-Simulationen)
- Bei 6 von 24 Brandversuchen lagen ventilationsgesteuerte Bedingungen vor

09.11.2023

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

13

Fazit



- Tendenziell größeren Temperaturen in FDS Simulationen
- Abweichungen treten vermehrt auf bei:
 - Ventilationsgesteuerten Brandverläufen
 - Niedriger Brandausbreitungsgeschwindigkeit
- Kein Widerspruch zu ursprünglicher Validierung mit CFAST aufgrund von Unterschieden in Verteilung der betrachteten Parameter

09.11.2023

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

14



Hauptquellen:

Zehfuß, Jochen ; Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes: TB 04-01. 4.Auflage. März 2020

Zehfuß, Jochen: Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, Februar 2004

DIN-Normenausschuss Bauwesen: DIN EN 1991-1-2/ NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1. Berlin, September 2015

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Burkhard Forell, Walter Klein-Heßling

Wärmefreisetzung im ventilationsgesteuerten Raumbrand unter Berücksichtigung von Lithium-Ionen-Batterien und Bedeutung für die Bemessung nach Eurocode

Abstract:

Im Beitrag werden Besonderheiten von Bränden von Lithium-Ionen-Batterien im Vergleich zu üblichen organischen Brandlasten betrachtet. Bei üblichen organischen Brandlasten beträgt die Wärmefreisetzung pro eingesetztem Kilogramm Verbrennungsluft in guter Näherung 3,03 MJ/kg. Da beim thermischen Durchgehen von Lithium-Ionen-Batterien Wärme auf Grund von Redox-Reaktionen und möglichen Metallreaktion etc. zusätzlich Wärme frei wird, wird dieser Anteil bei der weit verbreiteten Bestimmung mittels Sauerstoffverbrauchskalorimetrie nicht erfasst.

Es werden verschiedene Versuche zur Wärmefreisetzung von Lithium-Ionen-Batterien wiedergegeben. Aus der Kombination der verschiedenen veröffentlichten Versuchsergebnisse lässt sich ein Faktor von 1,2 bis 1,5 abschätzen, mit dem Ergebnisse aus der Sauerstoffverbrauchskalorimetrie multipliziert werden müssen, um die vollständige Wärmefreisetzung zu erfassen.

Da im Brandschutzingenieurwesen die Wärmefreisetzungsrate (HRR) im Vollbrand über den ventilationsgesteuerten Brand abgeschätzt wird und entsprechende Gleichungen teilweise direkt in Bemessungsverfahren implementiert sind, kann eine Unterschätzung der Wärmefreisetzung auftreten, falls der Anteil von Lithium-Ionen-Batterien an der Gesamtbrandlast relevant ist. Es wirken sich aber noch andere Faktoren wie die Gasproduktion pro Wärmemenge und die Mischungsbedingungen im Brandraum auf die mögliche maximale Wärmefreisetzung aus.

Aktualisierte Gleichungen für die HRR im ventilationsgesteuerten Brand im EC 1 und im vfdb-Leitfaden sind physikalisch korrekter, können aber nicht jeden Einzelfall berücksichtigen. Falls der charakteristische Wert der HRR bereits an eine physikalische Obergrenze stößt, ist ein Sicherheitsbeiwert $\gamma > 1$ zur Erhöhung der HRR nicht sinnvoll.

Da sich die ventilationsgesteuerte HRR wie beschrieben nicht einfach festlegen lässt, wurde ein Modell zur Steuerung der HRR in FDS entwickelt (vgl. Beitrag W. Klein-Hessling, GRS).

Wärmefreisetzung im ventilationsgesteuerten Raumbrand unter Berücksichtigung von Lithium-Ionen-Batterien und Bedeutung für die Bemessung nach Eurocode

Ein inhaltlich überlappenden schriftlicher Beitrag zum Vortrag findet sich hier:
https://www.researchgate.net/publication/375519982_Beruecksichtigung_von_Redox-Reaktionen_bei_der_Waermefreisetzung_und_Brandmodellierung_von_Lithium-Ionen-Batterien

Dr. Burkhard Forell, Walter Klein-Hessling
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, Köln

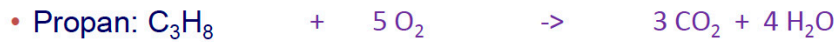
17. Treffen der FDS Usergroup
9. November 2023

Inhalt

- Brand organischer Brandlasten
- Eurocode 1, ventilationsgesteuerter Brand
- Einflüsse auf die Sauerstoffausnutzung
- Brand einer Li-Ionen-Batterie
- Modellierung der Redoxreaktionen und Steuerung mit FDS
- Schlussfolgerungen

Brand organischer Brandlasten

- Stöchiometrischer Luft-/Sauerstoffbedarf



$$3 \cdot 12 \text{ g} + 8 \text{ g} \quad 5 \cdot 32 \text{ g} \quad r_{\text{O}_2} = 160 \text{ g}_{\text{O}_2} / 44 \text{ g}_{\text{Br}} = 3,636 \text{ g}_{\text{O}_2} / \text{g}_{\text{Br}}$$

$$\Delta H_c = 50,35 \text{ MJ/kg} \quad r_{\text{Luft}} = r_{\text{O}_2} / 0,23 \text{ g}_{\text{O}_2} / \text{g}_L = 15,8 \text{ g}_L / \text{g}_{\text{Br}}$$



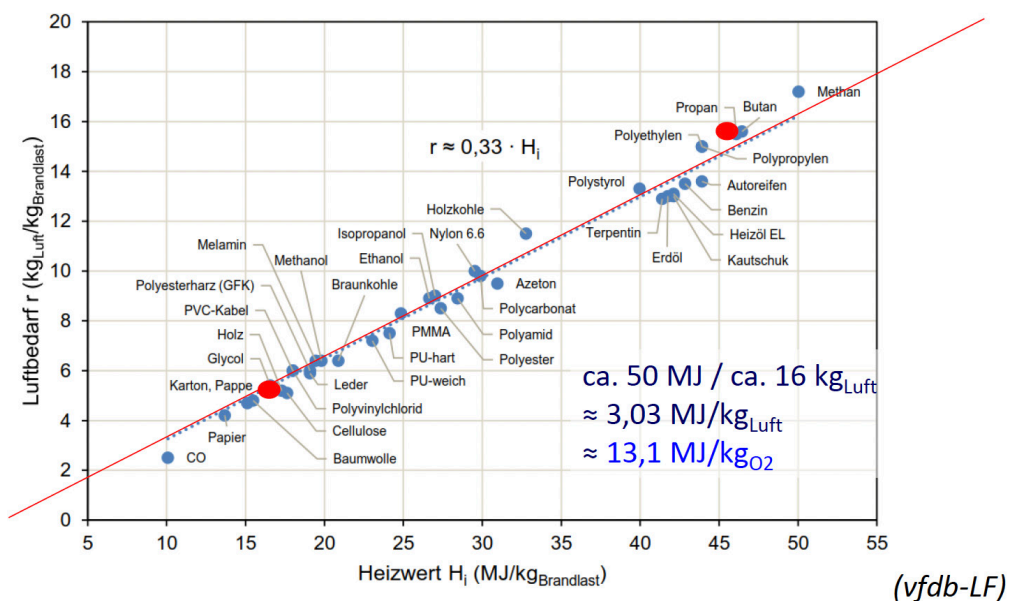
$$6 \cdot 12 \text{ g} + 10 \text{ g} + 5 \cdot 16 \text{ g} \quad 6 \cdot 32 \text{ g} \quad r_{\text{O}_2} = 192 \text{ g}_{\text{O}_2} / 162 \text{ g}_{\text{Br}} = 1,19 \text{ g}_{\text{O}_2} / \text{g}_{\text{Br}}$$

$$\Delta H_c = 17,47 \text{ MJ/kg} \quad r_{\text{Luft}} = r_{\text{O}_2} / 0,23 \text{ g}_{\text{O}_2} / \text{g}_L = 5,15 \text{ g}_L / \text{g}_{\text{Br}}$$

- Hinweis: Massen gerundet C: 12 g/mol, H: 1 g/mol, O: 16 g/mol
Indexe: O2: Sauerstoff, L: Luft, Br: Brennstoff

Brand organischer Brandlasten

- Stöchiometrischer Luft-/Sauerstoffbedarf



Brand organischer Brandlasten

Abbrandrate

brennstoffabhängig, stark unterschiedliche Werte

Abbrandgesteuerter Brand: $\dot{Q} = \dot{m}_f \cdot X \cdot H_u$

Ventilationsgesteuerter Brand: $\dot{Q} = \dot{m}_L \cdot X_{O_2} \cdot E_L = \dot{m}_{O_2} \cdot X_{O_2} \cdot E_{O_2}$

Ventilationsrate
(Luft, Sauerstoff)

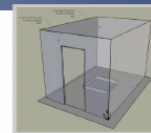
praktisch-universal !

$E_L = 3 \text{ MJ/kg}_{\text{air}}$
 $E_{O_2} = 13.1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

5

EC1, Heißbemessung



alt: $Q_{\max} = 0,10 \cdot \dot{m} \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}} \quad [\text{MW}]$

(E.6)

- In der alten Fassung des EC1 wurde der ventilationsgesteuerte Brand über den eff. Heizwert bestimmt, was unphysikalisch war, da das Sauerstoffangebot (und nicht das Brennstoffangebot) die HRR limitiert

neu: $Q_{\max} = 1,57 \cdot \dot{m}_{O_2} \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}} \quad [\text{MW}]$

(E.6)

Dabei ist

A_v die Öffnungsfläche [m²];

h_{eq} die mittlere Höhe der Öffnungen [m];

$\chi_{O_2} = \dot{m}_{O_2}$ der Faktor für den Sauerstoffverbrauch mit $\dot{m}_{O_2} = 0,8$.

neue Gleichung ist besser als alte, allerdings ist der Sauerstoffausnutzungsfaktor $\dot{m}_{O_2}$ keine Konstante (vgl. vfdb-Leitfaden, 4. Aufl., Gl. 4.11, dort $0,68 < \chi_{O_2} < 0,89$)
=> 0,8 kann schon unter-ventiliert sein

- $A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}}$ prop. zum Luftmassenstrom durch Türen/Fenster im Vollbrand

- Semi-empirischer Faktor: $1,57 = 0,52 \cdot 0,23 \text{ kg}_{O_2}/\text{kg}_{\text{Luft}} \cdot 13,1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

6

EC1, Heißbemessung

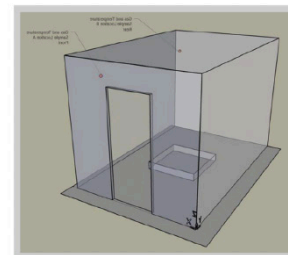
- HRR für den ventilationsgesteuerten Brand

(5) Falls es sich um einen ventilationsgesteuerten Brand handelt, sollte dieses Plateau entsprechend dem verfügbaren Sauerstoffgehalt reduziert werden. Dies kann entweder automatisch bei Verwendung eines Computerprogramms mit Ein-Zonen-Modell erfolgen oder durch die vereinfachte Gleichung:

neu: $Q_{\max} = 1.57 \cdot m_{O_2} \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}}$ [MW] (E.6)

Dabei ist

- A_v die Öffnungsfläche [m²];
- h_{eq} die mittlere Höhe der Öffnungen [m];
- m_{O_2} der Faktor für den Sauerstoffverbrauch mit $m_{O_2} = 0.8$.



- Semi-empirischer Faktor: $1.57 = 0.52 \cdot 0.23 \text{ kg}_{O_2}/\text{kg}_{\text{Luft}} \cdot 13.1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$

Sauerstoffausnutzung, Ignition-Index

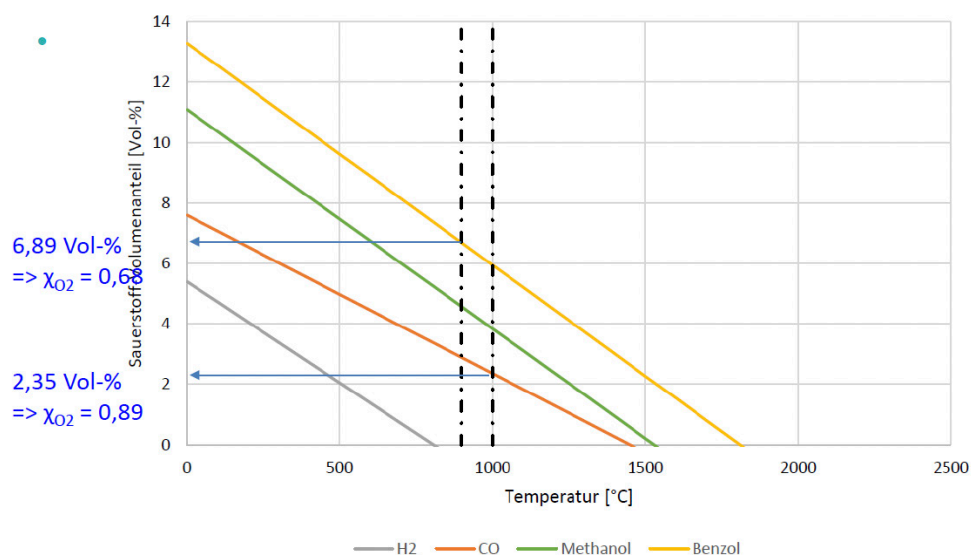


Bild 4.5 Aufrechterhaltung der Verbrennung in Abhängigkeit der Temperatur und des Sauerstoff-Volumenanteils nach [4.20] => „Ignition Index“ nach Beyler, SFPE

(vfdb-LF)

Sauerstoffausnutzung, FDS-Suppression-Modell

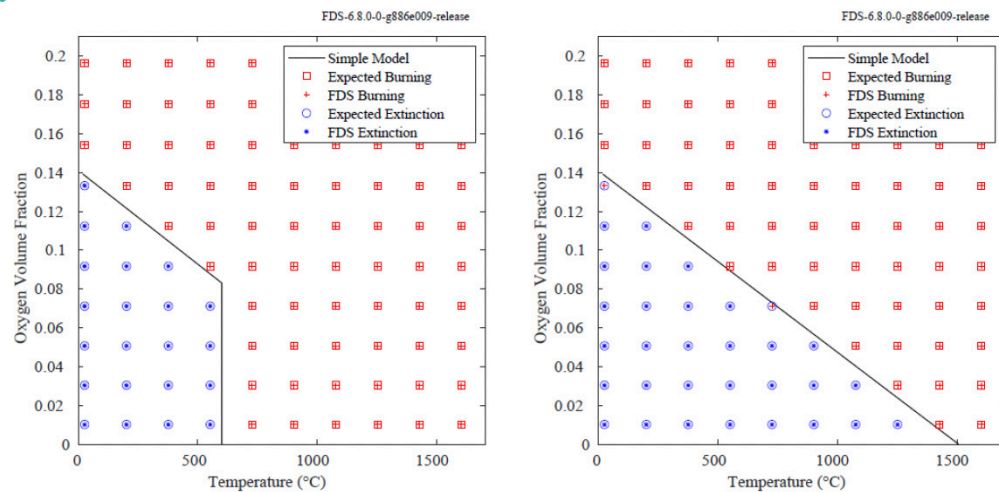
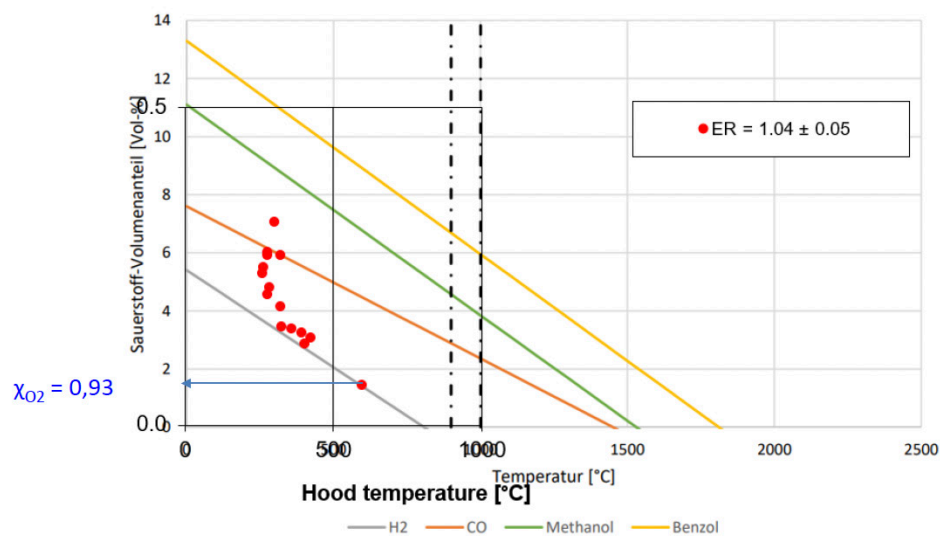


Figure 13.3: Result of 'EXTINCTION 1' (left) and 'EXTINCTION 2' (right) for the given initial temperatures and oxygen concentrations.

(FDS-UG)

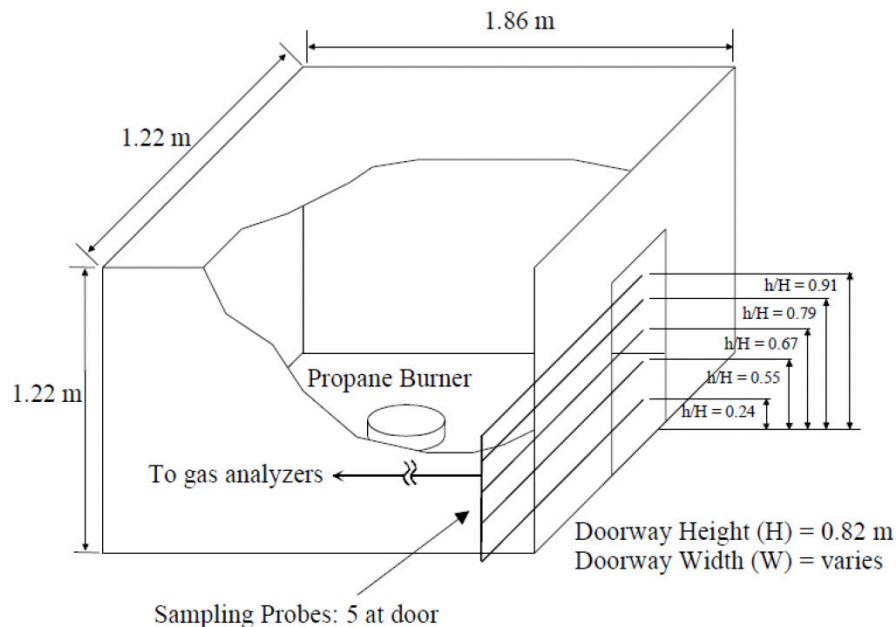
Sauerstoffausnutzung, Haubenexperimente

- Vergleich mit Daten aus Zukoski et al., Methan, GER = 1,04, Haubenexperimente
=> Sauerstoff-Umsetzung höher als nach Ignition-Index



Sauerstoffausnutzung, Wieczorek's quasistat. Raumbrände

- Propan, Öffnungsfläche und GER verändert

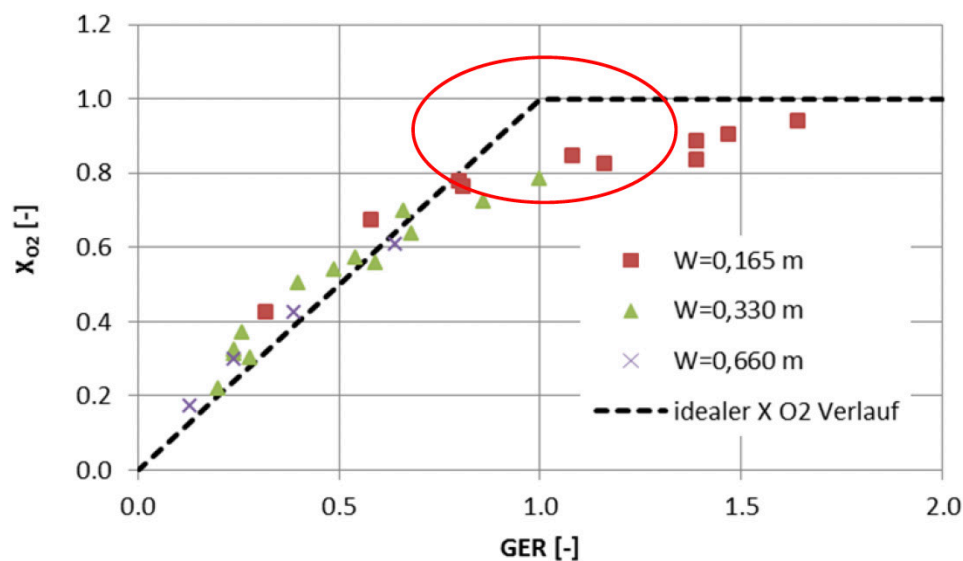


17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

11

Sauerstoffausnutzung, Wieczorek's quasistat. Raumbrände

- Um GER = 1 die fehlende Vermischung von Ox und Propan als limitierender Faktor

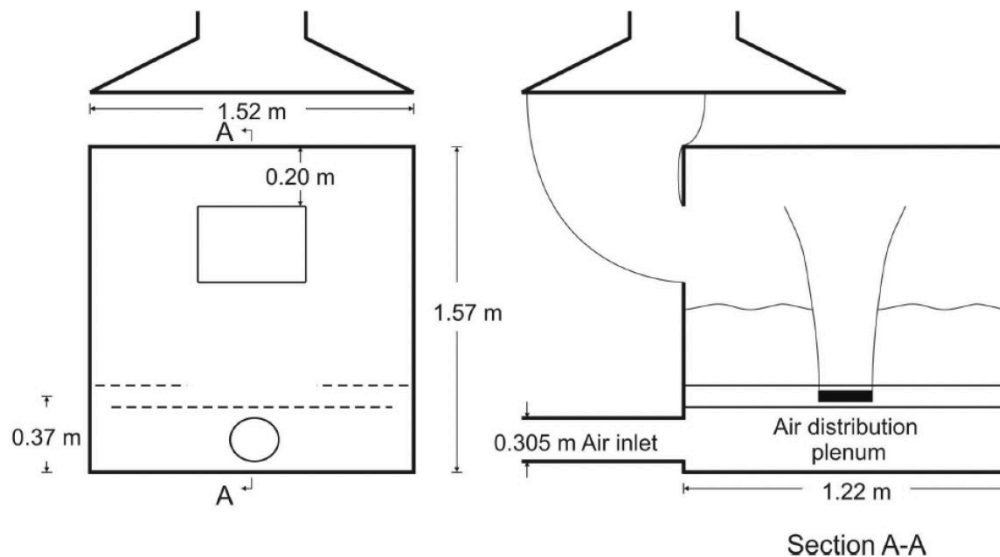


17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

12

Sauerstoffausnutzung, Gottuk's Brandraum mit Plenum

- Sauerstoffversorgung von unten, GER und Brennstoffe verändert

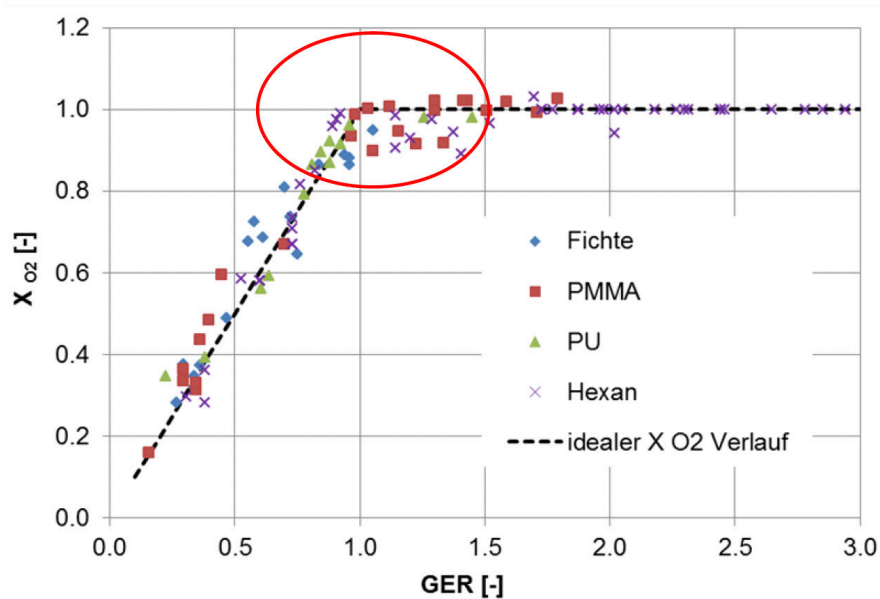


17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

13

Sauerstoffausnutzung, Gottuk's Brandraum mit Plenum

- Um GER = 1 deutlich besserer Ausbrand



17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

14

EC1, Heißbemessung

E DIN EN 1991-1-2:2021-10
prEN 1991-1-2:2021 (D)

- Entwurf -

- Brandlast

E.4.2 Definitionen

(1) Die charakteristische Brandlast ist definiert durch:

$$Q_{fi,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \Psi_i = \sum Q_{fi,k,i} \quad [MJ] \quad (E.2)$$

Dabei ist

$M_{k,i}$ die Menge der brennbaren Stoffe [kg], nach (3) und (4);

H_{ui} die Netto-Verbrennungswärme des Baustoffs [MJ/kg], siehe (E.4.4);

$[\Psi_i]$ der wahlfreie Beiwert zur Bewertung geschützter Brandlasten, siehe (E.4.3).

E.4.4 Netto-Verbrennungswärme

(1) Die Netto-Verbrennungswärme sollte nach EN ISO 1716:2002 ermittelt werden.

- Bombenkalorimeter



17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

15

Brand organischer Brandlasten

- Sauerstoffverbrauchskalorimetrie ist standardisiertes Messverfahren für Versuchseinrichtungen Bauwesen (Room Corner Test, Cone Calorimeter etc.)
- Bestimmung der HRR auf Basis des Sauerstoffverbrauchs $\times 13,1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$
- Nicht für Li-Ionen-Batterien geeignet, wenn ein Teil der Wärme durch RedOx-Reaktionen frei wird
 - Sauerstoff wird nicht der Luft entzogen



Sauerstoffverbrauchs-
kalorimetrie

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

16

Versuch an Standardzellen Typ 18650

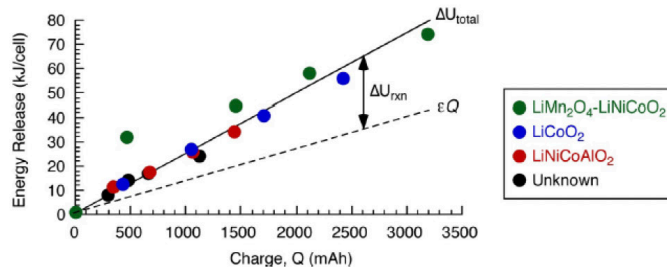


Figure 7. Energy release versus charge for the 18650 LIBs

- Messung der Wärmefreisetzung in einem Bombenkalorimeter unter [Stickstoffatmosphäre](#), Zündung durch Kurzschluss
- Lineare Abhängigkeit von el. gespeicherter Energie und Wärmeenergie
- 3200 mAh (bei 3,7 V => 42,6 kJ_{el}) führen zu 80 kJ Wärmefreisetzung
- $E_{therm, inert} / E_{el} = 80,0 \text{ kJ}_{therm} / 42,6 \text{ kJ}_{el} = 1,88$
- Beitrag nicht über Sauerstoffverbrauchskalorimetrie erfassbar

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

18

Versuch an Standardzellen Typ 18650

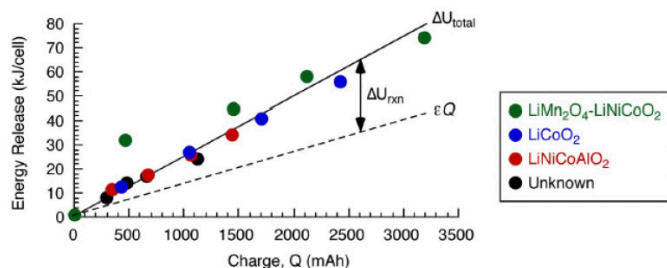


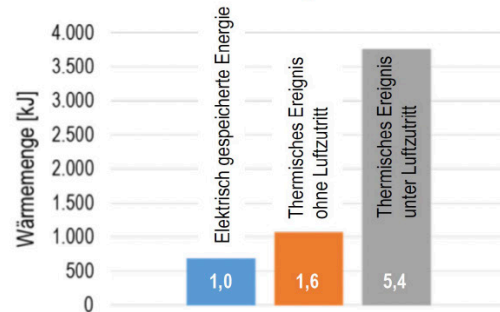
Figure 7. Energy release versus charge for the 18650 LIBs

- Messung der Wärmefreisetzung in einem Bombenkalorimeter unter [Stickstoffatmosphäre](#), Zündung durch Kurzschluss
- Lineare Abhängigkeit von el. gespeicherter Energie und Wärmeenergie
- 3200 mAh (bei 3,7 V => 42,6 kJ_{el}) führen zu 80 kJ Wärmefreisetzung
- $E_{therm, inert} / E_{el} = 80,0 \text{ kJ}_{therm} / 42,6 \text{ kJ}_{el} = 1,88$
- Beitrag nicht über Sauerstoffverbrauchskalorimetrie erfassbar

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

18

Versuch im Automobilbereich (von BMW veröffentlicht)



- „thermisches Ereignis ohne Luftzutritt“: $E_{therm, inert} / E_{el} = 1,6$
- „thermisches Ereignis mit Luftzutritt“: $E_{therm, Luft} / E_{el} = 5,4$
- Anteil ohne Luftzutritt beträgt im Schnitt $1,74 \cdot E_{el}$
- Im Verhältnis zu E_{el} mit O_2 -Verbrauchskalorimetrie bestimmbar:
 $(5,4 - 1,74) = 3,66$ bis $(10 - 1,74) = 8,26$
- Messergebnis der O_2 -Verbrauchskalorimetrie zu erhöhen um
 $5,4 / 3,66 \approx 1,5$ bis $10 / 8,26 \approx 1,2$

vgl. 1,88 aus
Kleinversuch,
im Mittel 1,74

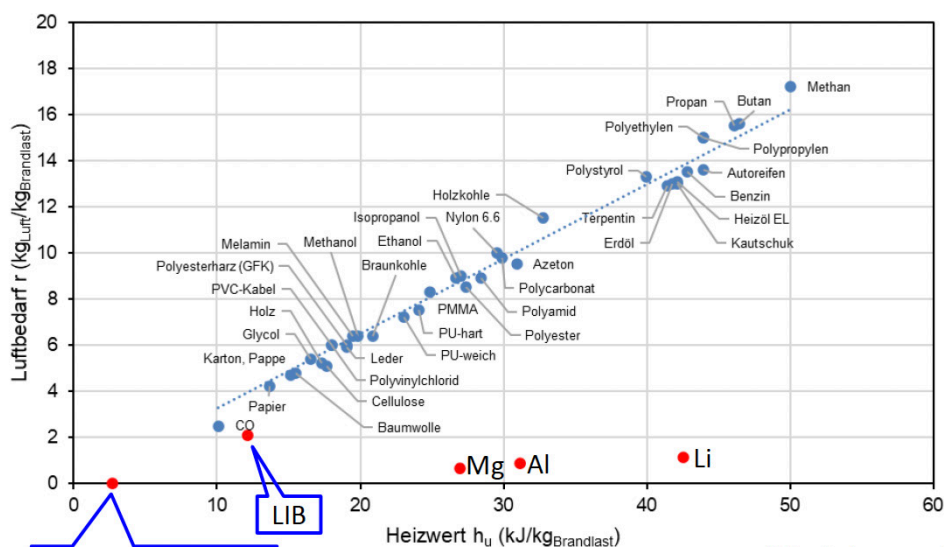
vgl. 6 bis 10
(Kunkelmann)

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

19

Brand von nicht-organischen Brandlasten

- Stöchiometrischer Luft-/Sauerstoffbedarf



(M. Osburg, vfdb-LF)

17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

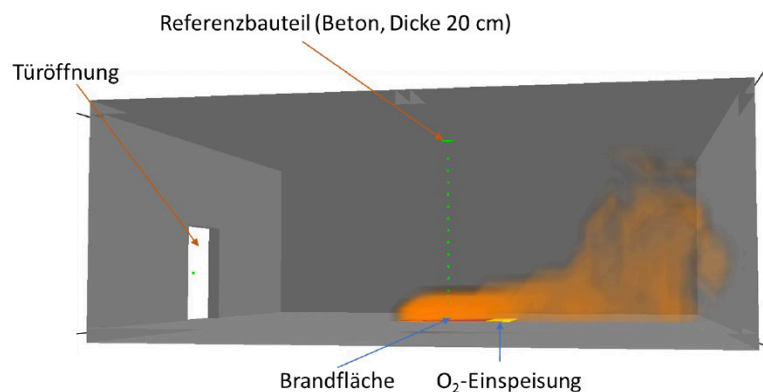
20

Brand einer Li-Ionen-Batterie

- Heizwert (Netto-Verbrennungswärme) von Li-I-Batterien höher als durch Sauerstoffverbrauchkalorimetrie im Standardverfahren erfassbar
- Im vorliegenden Fall ca. 20 % bis 50 % zusätzliche Wärmefreisetzung aus Redox-Reaktionen
- Wie bei der Brandmodellierung bei ventilationsgesteuerten Bränden berücksichtigen?
 - Hochsetzen der EPUMO auf über $E_{O_2} > 13,1 \text{ MJ/kg}_{O_2}$?
 - Geht, aber unterschätzt die Abgasvolumenströme (konservativ)
 - Alternativ Umsetzung durch die Implementierung einer Sauerstoffzudosierung und Steuerung im Brandsimulationsprogramm FDS

Modellierung der Redoxreaktionen und Steuerung mit FDS

- Ventilationsgesteuerter Brand
- Anwendungsbeispiel mit Sauerstoffeinspeisung in Feuerplume der Batterie



Schlussfolgerungen

- Gleichung E.6 im EC 1 für den ventilationsgesteuerten Brand nicht immer anwendbar
- Sauerstoffausnutzung im Raumbrand als Funktion
 - der Brandraumtemperatur und
 - insbesondere der Mischungsverhältnisse
- Heizwert (Netto-Verbrennungswärme) von Li-I-Batterien höher als durch Sauerstoffverbrauchskalorimetrie im Standardverfahren erfassbar
- Zusätzliche Wärmefreisetzung aus Redox-Reaktionen kann HRR im Brandraum erhöhen, allerdings spielt auch Abgasvolumen eine Rolle
- Steuerung der Wärmefreisetzung in Abhängigkeit des Sauerstoffangebotes => **Vortrag Walter Klein-Hessling**

Walter Klein-Heßling, Burkhard Forell

Steuerung der Wärmefreisetzungsrate in FDS zur Optimierung der Sauerstoffausnutzung bei ventilationsgesteuerten Bränden

Abstract:

Im Beitrag wird eine Methode dargestellt, wie bei ventilationsgesteuerten Bränden die Wärmefreisetzungsrate eines Bemessungsbrandes in FDS berechnet werden kann. Exemplarische Ergebnisse werden mit den Ergebnissen des Bemessungsbrandes nach Eurocode bzw. ohne Steuerung verglichen. Die dargestellte Methode kann für beliebige Ventilationsbedingungen verwendet werden und ist auch in der Lage Redox-Reaktionen, wie sie Bränden von Lithium-Ionen-Batterien auftreten, zu berücksichtigen.

Für die Berechnung einer konservativen Bemessungstemperatur ist es notwendig, die maximal mögliche Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max}$ des Bemessungsbrandes zu bestimmen. Für einen Brandraum mit einer Türöffnung kann die maximale Wärmefreisetzungsrate nach Gl. E.6 des EC 1 (Entwurf) [3] durch

$$\dot{Q}_{max} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} A_v \sqrt{h_v}$$

abgeschätzt werden, wobei eine Sauerstoffausnutzung $\chi_{O_2} = 0,8$ angenommen wird. Obwohl die aktualisierte Gleichung des EC 1 physikalisch korrekter ist als die bisherige Gleichung, gibt es weiterhin Unsicherheiten in der Abschätzung der maximalen HRR. Diese resultieren z. B.

- aus der vereinfachten Abschätzung des Massenstroms über den Ventilationsfaktor $A_v \sqrt{h_v}$,
- die bei einigen Brennstoffen auftretenden Redox-Reaktionen und
- dem brennstoffabhängigen Rauchvolumen pro Energiefreisetzung.

Aus diesen Gründen muss die mit obiger Gleichung bestimmte HRR u. U. angepasst werden, um einen konservativen Bemessungsbrand zu simulieren. Beim im Beitrag vorgestellten FDS-Syntax erfolgt die Anpassung automatisch durch das Modell FDS.

Die vorgestellte Steuerung in FDS besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen:

- a) Die Bilanzierung der gesamten Brandlast
- b) Die Steuerung der Wärmefreisetzungsrate aufgrund des verfügbaren Sauerstoffmassenstroms

Um die Umsetzung der gesamten Brandlast im Brandraum zu garantieren, erhält der Sollwert der Wärmefreisetzungsrate einen eigenen Zeitstempel t' . Sobald die tatsächliche Wärmefreisetzungsrate aufgrund des verfügbaren Sauerstoffs reduziert wird, wird der Zeitfortschritt dt' in der Solltabelle entsprechend verlangsamt („Verlangsamung der Brandprozesse“).

Steuerung der Wärmefreisetzungsrate in FDS zur Optimierung der Sauerstoffausnutzung bei ventilationsgesteuerten Bränden

Walter Klein-Hessling, Dr. Burkhard Forell
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH, Köln
9. November 2023
17. Treffen der FDS Usergroup

Inhalt

- Zielsetzung
- Vorgehen nach Eurocode
- Steuerung in FDS
- Anwendungsbeispiel anhand eines Li-Ionen-Batteriebrandes
- Schlussfolgerungen

Zielsetzung der FDS-Steuerung

- Berechnung der optimalen Wärmefreisetzungsrate eines Bemessungsbrandes
- Für beliebige Geometrien des Brandraums und Ventilationsbedingungen
- Mögliche Berücksichtigung von Redox-Reaktionen

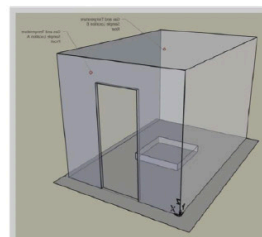
Vorgehen nach Eurocode

Eurocode

- Max. Wärmefreisetzungsrate (HRR) für einen Brandraum mit einer Türöffnung (Gl. E.6 des EC1)

$$\dot{Q}_{max} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} A_v \sqrt{h_v}$$

- mit der Fläche A_v und Höhe h_v der Türöffnung und dem Sauerstoffausnutzungsfaktor χ_{O_2}



- Unsicherheiten
 - Vereinfachte Abschätzung des Sauerstoffmassenstroms für bestimmte Raumgeometrie
 - Keine Berücksichtigung von Redox-Reaktionen
 - Einfluss durch brennstoffabhängiges Rauchvolumen pro Energiefreisetzung

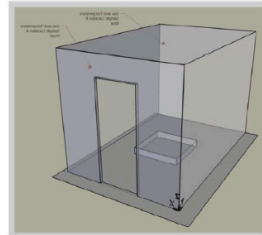
Vorgehen nach Eurocode

Eurocode

- Max. Wärmefreisetzungsrate (HRR) für einen Brandraum mit einer Türöffnung (Gl. E.6 des EC1)

$$\dot{Q}_{max} = 1,57 \cdot \chi_{O_2} A_v \sqrt{h_v}$$

- mit der Fläche A_v und Höhe h_v der Türöffnung und dem Sauerstoffausnutzungsfaktor χ_{O_2}

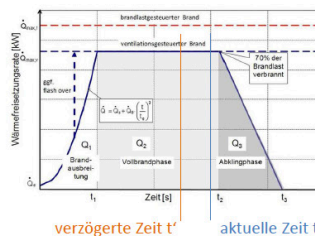


- Unsicherheiten
 - Vereinfachte Abschätzung des Sauerstoffmassenstroms für bestimmte Raumgeometrie
 - Keine Berücksichtigung von Redox-Reaktionen
 - Einfluss durch brennstoffabhängiges Rauchvolumen pro Energiefreisetzung

Steuerung in FDS

Bilanzierung der umgesetzten Brandlast

- Zeitstempel t'
 - Soll-Wärmefreisetzungsrate erhält einen separaten Zeitstempel t' : $HRR_{Soll} = HRR(t')$
 - Interpretation: „Durch die Sauerstoffreduktion laufen die Prozesse langsamer“
 - Einhaltung der gesamten Brandlast
 - HRR-Verlauf bleibt weitgehend ähnlich



- Berechnung: $t' = \int f \cdot dt$ mit Reduktionsfaktor $f = \frac{HRR_{Red}(t)}{HRR_{Soll}(t')}$ ← Tatsächlich in FDS berechnete Rate

Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Rampe der Soll-Wärmefreisetzungsrate HRR_{Soll} zur Zeit t'

```
/ Brandlast Soll-HRR /
&RAMP ID = HRR-Brand, T = 0,      F = 0, CTRL_ID = 'HRR_TIME' /
&RAMP ID = HRR-Brand, T = 18.75,  F = 0.0006 /
&RAMP ID = HRR-Brand, T = 37.5,   F = 0.0025 /
...
&RAMP ID = HRR-Brand, T = 7520,   F = 0 /
```

t' : HRR_TIME

Argument t wird durch t' (HRR_TIME) ersetzt

Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Bestimmung von $f = \frac{HRR_{Red}(t)}{HRR_{Soll}(t')}$ mit der in FDS berechneten aktuellen Rate $HRR_{Red}(t)$

```
/ aktuelle HRR zur Zeit t /
&DEVC ID = 'FDS_TIME', XYZ=1.,1.,1., QUANTITY='TIME' /
&DEVC ID = 'FDS_HRR', QUANTITY = 'HRR', XB = 0, 17.2, 0, 17.2, 0.4, 6.4 /
```

t: FDS_TIME
HRR_{Red}: FDS_HRR
Brandraum: XB

Brandraum

- Berechnung von $HRR_{Soll}(t')$

```
/ HRR Soll zur Zeit t /
&CTRL ID='Soll-F', FUNCTION_TYPE='CUSTOM', INPUT_ID='FDS_TIME', RAMP_ID='HRR-Brand' /
&CTRL ID='Soll-HRR', FUNCTION_TYPE='MULTIPLY', INPUT_ID = 'Soll-F', 'CONSTANT', CONSTANT = 25000 /
```

Wird ignoriert, HRR_TIME wird verwendet

Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Vermeidung einer Division durch Null
 - Modifizierung: $HRR_{Soll}(t') \rightarrow \max(HRR_{Soll}(t'), 0) + \epsilon$

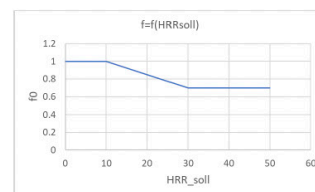
```
/ Propagationsfaktor f0/
&CTRL ID='Soll-HRR+', FUNCTION_TYPE='MAX' , INPUT_ID = 'Soll-HRR' , 'CONSTANT', CONSTANT = 0. /
&CTRL ID='Soll-HRR+e', FUNCTION_TYPE='SUM' , INPUT_ID = 'Soll-HRR+', 'CONSTANT', CONSTANT = 1.e-6 /
&CTRL ID='f0', FUNCTION_TYPE='DIVIDE', INPUT_ID = 'FDS_HRR' , 'Soll-HRR+e' /
```

Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Stabilisierung von f für kleine $HRR_{Soll} \rightarrow$ Ziel: keine Reduktion für kleine HRR, d.h. $f = 1$ für $HRR \leq 10$

- Definition der Funktion $h' = \begin{cases} 0 & HRR_{Soll} \leq 10 \\ HRR_{Soll} - 10 & 10 < HRR_{Soll} \leq 30 \\ 20 & HRR_{Soll} > 30 \end{cases}$



- Die resultierende Funktion h' liegt somit zwischen 0 und 20.

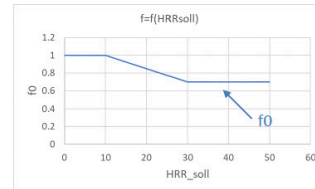
h' : Soll-HRR-x

```
/ Hilfsfunktion h'/
&CTRL ID='Soll-HRR-' , FUNCTION_TYPE='SUBTRACT', INPUT_ID = 'Soll-HRR' , 'CONSTANT', CONSTANT = 10 /
&CTRL ID='Soll-HRR-x1', FUNCTION_TYPE='MAX' , INPUT_ID = 'Soll-HRR-' , 'CONSTANT', CONSTANT = 0. /
&CTRL ID='Soll-HRR-x', FUNCTION_TYPE='MIN' , INPUT_ID = 'Soll-HRR-x1', 'CONSTANT', CONSTANT = 20 /
```

Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Stabilisierung von f für kleine HRR_{Soll}
 - Linearisierung des Propagationsfaktors f_h
 - f_h gegen 1 für h' gegen 0 und f_h gegen f_0 für h' gegen 20.
 - Gleichung: $f_h = \left(1 - \frac{h'}{20}\right) \cdot 1 + \frac{h'}{20} \cdot f_0 = \frac{h'}{20} \cdot (f_0 - 1) + 1$

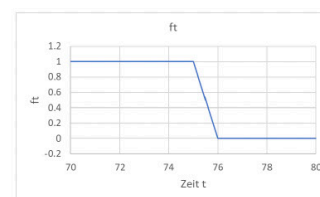


```
/ Linearisierung /
&CTRL ID='y1', FUNCTION_TYPE='SUBTRACT', INPUT_ID = 'f0', 'CONSTANT' , CONSTANT = 1. /
&CTRL ID='m', FUNCTION_TYPE='DIVIDE' , INPUT_ID = 'y1', 'CONSTANT' , CONSTANT = 20 /
&CTRL ID='y2', FUNCTION_TYPE='MULTIPLY', INPUT_ID = 'm', 'Soll-HRR-x' /
&CTRL ID='fh', FUNCTION_TYPE='SUM' , INPUT_ID = 'y2', 'CONSTANT' , CONSTANT = 1. /
```

Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Zeitsteuerung
 - Für niedrige Raten wird in FDS HRR_{Red} auf Null gesetzt
 - Daher muss zu Beginn die Steuerung „ausgeschaltet“ werden (hier für $t < 75$ s)
 - Verwendete Gleichung: $f_t = \text{Max}(0; 1 - \text{Max}(0; t - 75))$



```
/ Zeitsteuerung /
&CTRL ID='t1', FUNCTION_TYPE='SUBTRACT' , INPUT_ID = 'FDS_TIME', 'CONSTANT', CONSTANT = 75 /
&CTRL ID='t2', FUNCTION_TYPE='MAX' , INPUT_ID = 't1', 'CONSTANT' , CONSTANT = 0. /
&CTRL ID='t3', FUNCTION_TYPE='SUBTRACT' , INPUT_ID = 'CONSTANT', 't2' , CONSTANT = 1. /
&CTRL ID='ft', FUNCTION_TYPE='MAX' , INPUT_ID = 't3', 'CONSTANT' , CONSTANT = 0. /
```

- Resultierender Faktor: $f = \text{Max}(f_h, f_t)$

```
/ Propagationsfaktor f /
&CTRL ID='f', FUNCTION_TYPE='MAX', INPUT_ID = 'fh', 'ft' /
```


Steuerung in FDS

Bilanzierung der Brandlast – Umsetzung in FDS

- Berechnung der Zeit t' (HRR_TIME) durch Integration $t' = \int f \cdot dt$

```
/ Zeit t' /  
&CTRL ID='HRR_TIME',          FUNCTION_TYPE='PID', INPUT_ID='f', PROPORTIONAL_GAIN=0,  
    DIFFERENTIAL_GAIN=0, INTEGRAL_GAIN=1 /
```

Steuerung in FDS

Steuerung der HRR

- Verfügbare Sauerstoffquellen
 - Vorhandener Sauerstoff im Brandraum
 - Annahme: Faktor fällt linear zwischen 8 und 4 Vol-%
 - Sauerstoffzufuhr über Öffnungen (hier Tür)
 - „Sauerstoffzufuhr“ aufgrund einer Redox-Reaktion

Steuerung in FDS

Steuerung der HRR

- Vorhandener Sauerstoff im Brandraum → Faktor f_{ox}

```
/ Faktor fox /
&DEVC ID='OXY', XB = 0, 17.2, 0, 17.2, 0.4, 6.4, QUANTITY = 'VOLUME FRACTION', SPEC_ID = 'OXYGEN',
      SPATIAL_STATISTIC='MEAN' /
&CTRL ID='ox1', FUNCTION_TYPE='SUBTRACT', INPUT_ID = 'OXY', 'CONSTANT', CONSTANT = 0.04 /
&CTRL ID='ox2', FUNCTION_TYPE='MAX', INPUT_ID = 'ox1', 'CONSTANT', CONSTANT = 0. /
&CTRL ID='ox3', FUNCTION_TYPE='MIN', INPUT_ID = 'ox2', 'CONSTANT', CONSTANT = 0.04 /
&CTRL ID='fox', FUNCTION_TYPE='DIVIDE', INPUT_ID = 'ox3', 'CONSTANT', CONSTANT = 0.04 /
```

- Sauerstoffzufuhr

```
/ Sauerstoffmassenstrom mox /
&DEVC ID = 'MOX1', XB = -0.4, -0.4, 7.2, 10, 0.4, 3.6, QUANTITY = 'MASS FLOW +', SPEC_ID = 'OXYGEN' /
&DEVC ID = 'MOX2', QUANTITY = 'MASS FLUX', XB = 10, 10.8, 7.2, 10, 0.4, 0.4, SURF_ID = 'O2-Burn',
      SPEC_ID = 'OXYGEN', SPATIAL_STATISTIC = 'SURFACE INTEGRAL' /
&CTRL ID = 'MOX', FUNCTION_TYPE='SUM', INPUT_ID = 'MOX1', 'MOX2' /
```

Tür

Redox-Reak.

Steuerung in FDS

Steuerung der HRR

- „verfügbare“ Wärmefreisetzungsrate aufgrund der Sauerstoffzufuhr $\dot{Q}_{O_2} = \frac{H_u X_{O_2}}{r_{O_2}} \cdot \dot{m}_{O_2}$
- Daraus folgt der Reduktionsfaktor $f_{fox} = \min(\frac{\dot{Q}_{O_2}}{HRR_{Soll}(t)}; 1)$

```
/ Reduktionsfaktor ffox /
&CTRL ID='Red-HRR-ox', FUNCTION_TYPE='MULTIPLY', INPUT_ID = 'MOX', 'CONSTANT', CONSTANT = 9562.16932571429 /
&CTRL ID='fx', FUNCTION_TYPE='DIVIDE', INPUT_ID = 'Red-HRR-ox', 'Soll-HRR-e' /
&CTRL ID='ffox', FUNCTION_TYPE='MIN', INPUT_ID = 'fx', 'CONSTANT', CONSTANT = 1. /
```

- Resultierender Faktor $f_{fox} = \max(f_{ox}, f_{fox})$
- Resultierender Reduktionsfaktor $f = f_{Soll} \cdot f_{fox}$ für HRR

f: Red-F

```
/ resultierender Reduktionsfaktor ffox und reduzierte HRR /
&CTRL ID='ffox', FUNCTION_TYPE='MAX', INPUT_ID = 'fox', 'ffox' /
&CTRL ID='Red-F', FUNCTION_TYPE='MULTIPLY', INPUT_ID = 'Soll-F', 'ffox' /
&CTRL ID='Red-HRR', FUNCTION_TYPE='MULTIPLY', INPUT_ID = 'Soll-HRR', 'ffox' /
```

Steuerung in FDS

Steuerung der HRR

- Anwendung des Reduktionsfaktors f
 - Umweg über Rampe notwendig. Daher Definition einer $y = x$ – Rampe

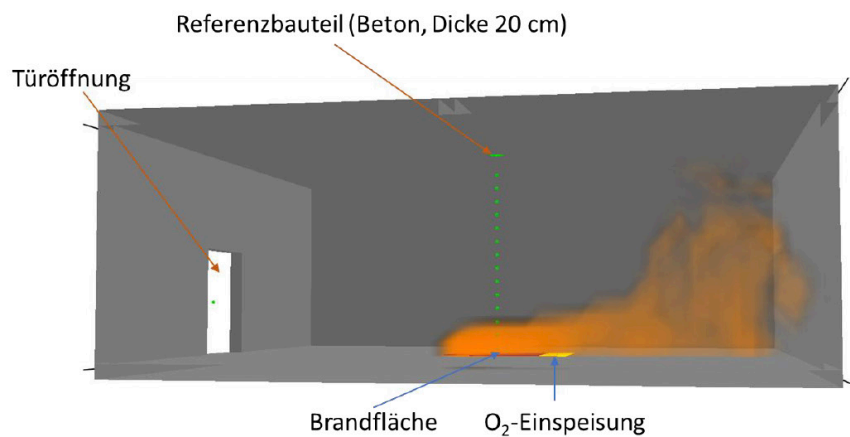
```
/ Lineare Rampe /
&RAMP ID='HRR-Red', T=    0 , F=    0, CTRL_ID = 'Red-F' /
&RAMP ID='HRR-Red', T=   100, F=   100 /
```

- Anwendung der Rampe im Datensatz für Brand und Redox-Reaktion

```
/ resultierende Wärmefreisetzungsrate und Sauerstoffeinspeisung wg. Redox-Reaktion /
&SURF ID = 'Burn', COLOR = 'RASPBERRY', HRRFUA = 3190.56337528605, RAMP_Q = HRR-Red /
&SURF ID = 'O2-Burn', COLOR = 'YELLOW', SPEC_ID(1)='OXYGEN', MASS_FLUX(1) = 0.170488119290094,
      RAMP_MF = 'HRR-Red' /
```

Anwendungsbeispiel anhand eines Li-Ionen-Batteriebrandes

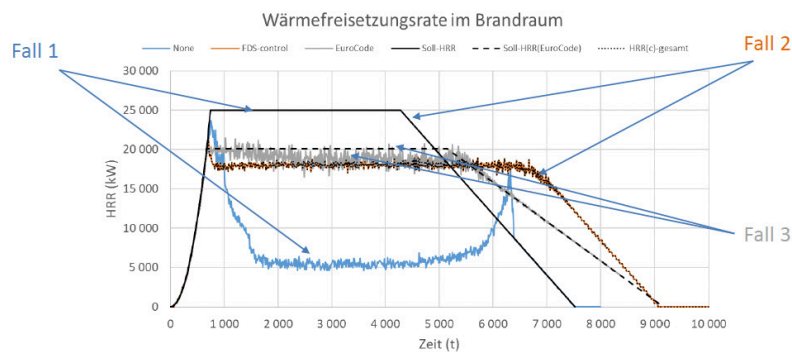
Raumgeometrie



Anwendungsbeispiel anhand eines Li-Ionen-Batteriebrandes

Untersuchte Fälle & Wärmefreisetzungsraten

- Fall 1: Soll-HRR von 25 MW und keine Steuerung
- Fall 2: Soll-HRR von 25 MW mit FDS-Steuerung + Redox-Reaktion (Sauerstoff-Zufuhr)
- Fall 3: Soll-HRR nach EC1 (ca. 20,1 MW) und keine Steuerung



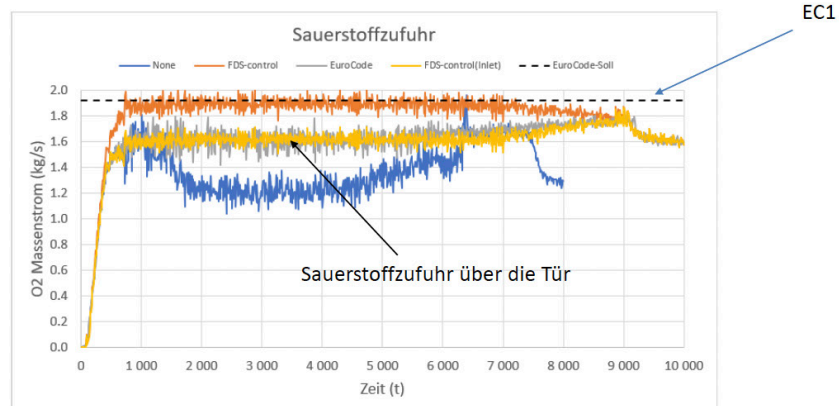
17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

19

Anwendungsbeispiel anhand eines Li-Ionen-Batteriebrandes

Vergleich der Sauerstoffzufuhr

- Zufuhr über Tür ist niedriger als durch EC1 berechnet
- Fall 2 (FDS-control) enthält zusätzlich die Redox-Reaktion



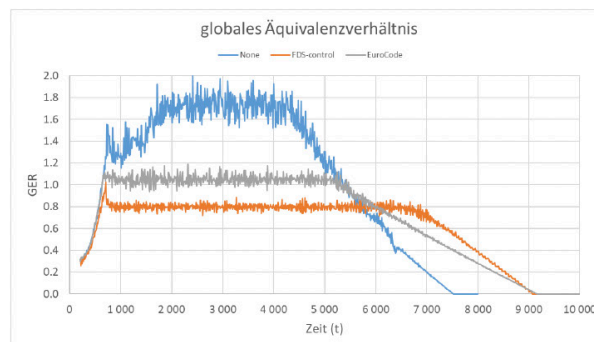
17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

20

Anwendungsbeispiel anhand eines Li-Ionen-Batteriebrandes

Vergleich der globalen Äquivalenzverhältnisse (GER)

- Definition: $GER = \frac{\dot{m}_{fuel}}{\dot{m}_{O_2}} \cdot r_{O_2}$
- Fall 1 (FDS-control) erreicht den Vorgabewert χ_{O_2} von 0.8
- Fall 3 berechnet ein höheres GER, da die Sauerstoffzufuhr und somit HRR, $\dot{m}_{fuel}$ überschätzt wird



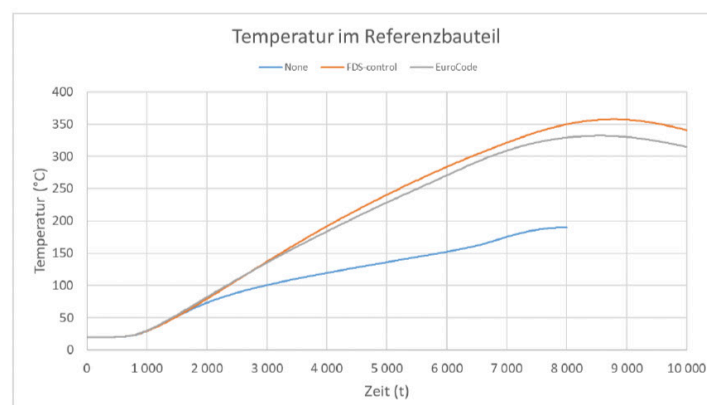
17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

21

Anwendungsbeispiel anhand eines Li-Ionen-Batteriebrandes

Vergleich der Temperatur im Referenzbauteil

- Fall 1 mit Steuerung berechnet etwas höhere Temperaturen



17. Treffen der FDS Usergroup - 9. November 2023

22

Schlussfolgerungen

Zusammenfassung

- Gleichung E.6 im EC 1 für den ventilationsgesteuerten Brand nicht immer anwendbar
- FDS Steuerung berücksichtigt
 - Tatsächliche Strömungsbedingungen (Öffnungen, Ventilation) und beliebige Geometrien
 - Mögliche Redox-Reaktionen (z. B. bei Li-I-Batteriebränden)
 - Einhaltung der gesamten Brandlast

Ergänzung

- Einfluss der Sauerstoffausnutzung
 - Wert wird vorgegeben
 - Allerdings sind 80 % schon eine gute Näherung
- Einfluss der vorgegebenen Wärmefreisetzungsrate
 - Resultierende HRR ist „unabhängig“ vom vorgegebenen Sollwert

Patrick Lauer / Manuel Osburg:

Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen mittels KI-basierter Daten

Abstract:

Brände in Schienenfahrzeugen sind aufgrund des regulatorisch festgelegten hohen Sicherheitsniveaus in der Realität seltene Ereignisse. Um bewerten zu können, ob bei einem Brandereignis die Schutzziele des Brandschutzes gewährleistet werden, können Brandsimulationen ein hilfreiches Instrument sein.

Im ersten Teil dieses Beitrags werden die aktuell verwendeten Methoden zur Simulation von Bränden in Schienenfahrzeugen mit CFD-Modellen als Stand der Technik vorgestellt und diskutiert. Es werden offene Fragestellungen herausgearbeitet. Ein Grund, warum die beschriebenen Methoden aktuell keine weitere Verbreitung finden, ist der hohe materielle, personelle und finanzielle Aufwand zur Durchführung. Das Forschungsprojekt BESKID hat das Ziel, die Durchführung von Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen mittels KI-basierter Daten zu ermöglichen. Dabei soll bei Reduzierung des Aufwandes eine angemessene Mindestmodellgüte erreicht werden. Das Ergebnis des Projekts sollen zwei AI-Systeme sein, eins zur Beschreibung der Brandeigenschaften von brennbaren Materialien und eins zur Modellierung der Brandausbreitung. Es werden umfangreiche Brandversuche über mehrere Skalen zur Erzeugung und Validierung der AI-Systeme durchgeführt. Diese AI-Systeme werden dann in Relation zu normativen Bemessungsbränden und über die zuvor vorgestellten Methoden ermittelten Bemessungsbrände gesetzt. Im zweiten Teil des Beitrags werden der geplante Umfang, der aktuelle Stand und die bisher erlangten Erkenntnisse des Forschungsprojekts vorgestellt.

Vorstellung des BMBF-Verbundprojekts



Bemessungsbrandsimulationen in
Schienenfahrzeugen mittels KI-basierter Daten

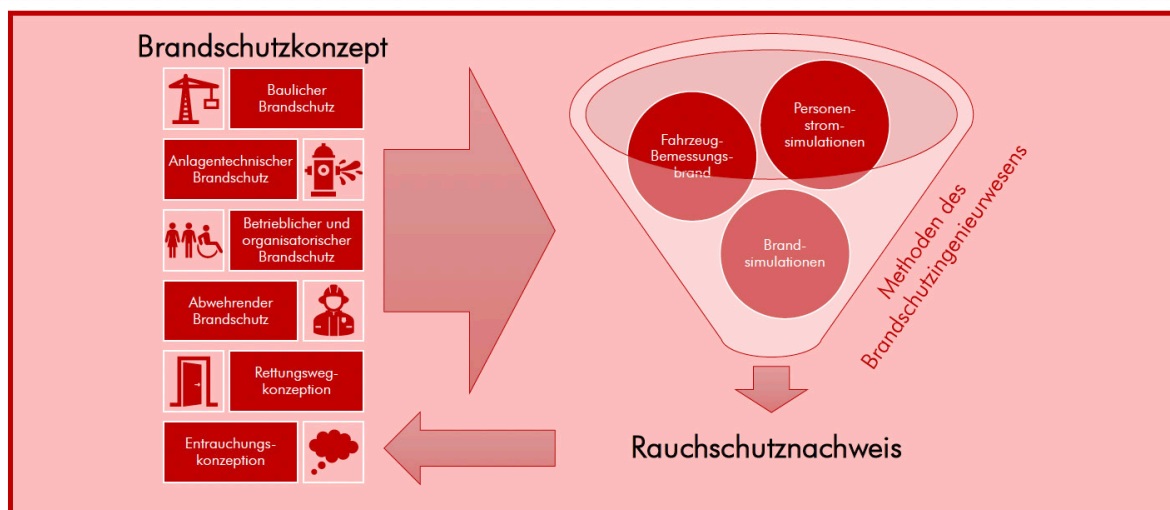
Manuel Osburg

09.11.2023

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



Brandschutzbemessung für Bauwerke des Schienenverkehrs

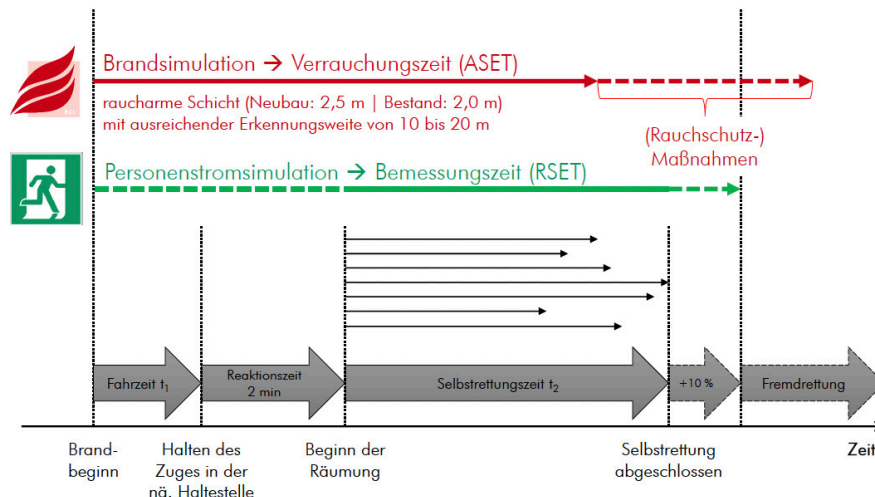


09.11.2023

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

2

Brandschutzbemessung für Bauwerke des Schienenverkehrs



09.11.2023

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

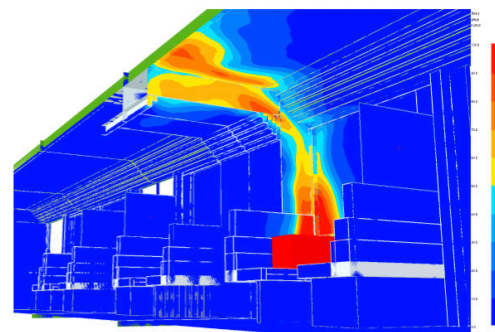
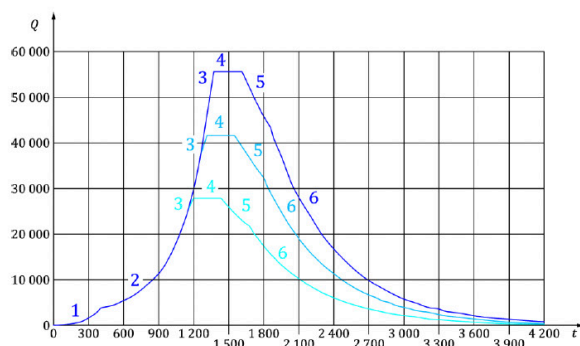
3

Fahrzeug-Bemessungsbrand



Standard-Bemessungsbrand

Individueller Bemessungsbrand

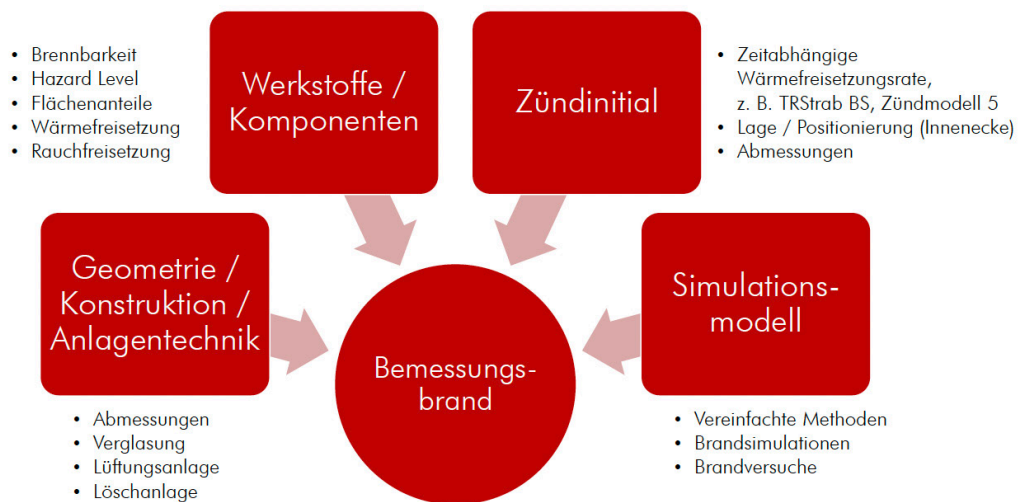


09.11.2023

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

4

Fahrzeug-Bemessungsbrand



09.11.2023

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

5

Fahrzeug-Bemessungsbrand



Kapitel 5.3.1 TRStrab BS / Kapitel 6.3.3.3.2 DIN 5647: Individuelle Brandverlaufskurven können durch die folgenden drei verschiedenen Verfahren bestimmt werden:

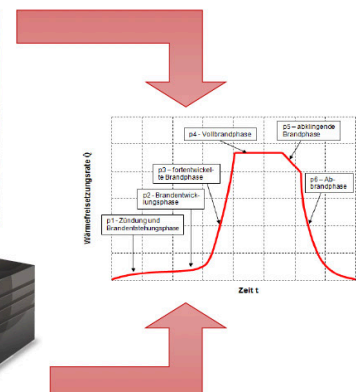
(1) Fahrzeug-Brandversuche,



(2) Brandsimulationen auf der Grundlage von Materialprüfungen oder



(3) Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung von Materialdaten.

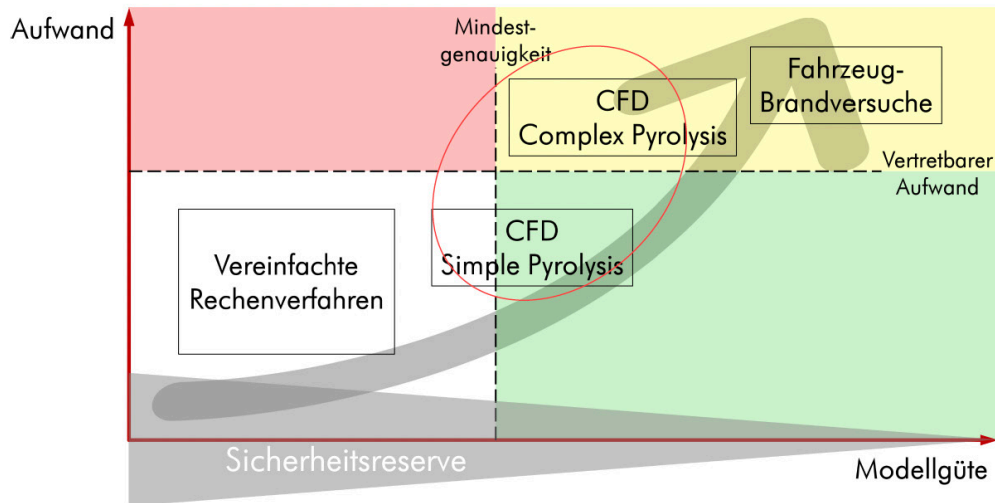


09.11.2023

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

6

Modelle für die Brandausbreitungsprognose



09.11.2023

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

7

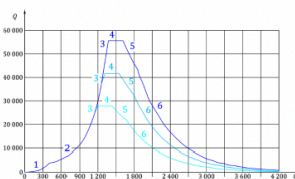
Modelle für die Brandausbreitungsprognose

Quelle: Lukas Arnold,
Herausforderungen und Methoden
der Brandausbreitungsmodellierung,
Fire Safety Engineering, 8. Mai 2023



Bemessungsbrand

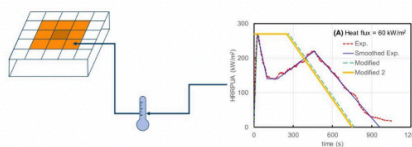
- Vollständig vorgegebener Verlauf
- Brandausbreitung ist ausschließlich zeitabhängig
- Keine Individualität
- Keine Prognose der Brandausbreitung
- Ermittelte Brandwirkungen werden oft überschätzt



09.11.2023

Simple Pyrolysis

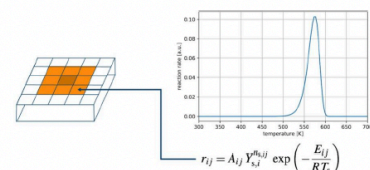
- Spezifische HRR-Kurve stammt aus Experimenten (Cone Calorimeter)
- Zündtemperatur startet HRR-Kurve
- Nach Zündung findet keine Rückkopplung mit der Umgebung statt
- Lokaler Abbrand wird nicht beeinflusst
- Neuer Ansatz: *Scaling the Burning Rate by the Heat Flux*



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

Complex Pyrolysis

- Pyrolyse folgt dem reaktionskinetischen Arrhenius-Ansatz
- Kontinuierliche Wechselwirkung mit der Umgebung
- Inverse, komplexe und aufwändige Modellierung, da keine Vorgabe messbarer Brandparameter
- hoher Rechenaufwand

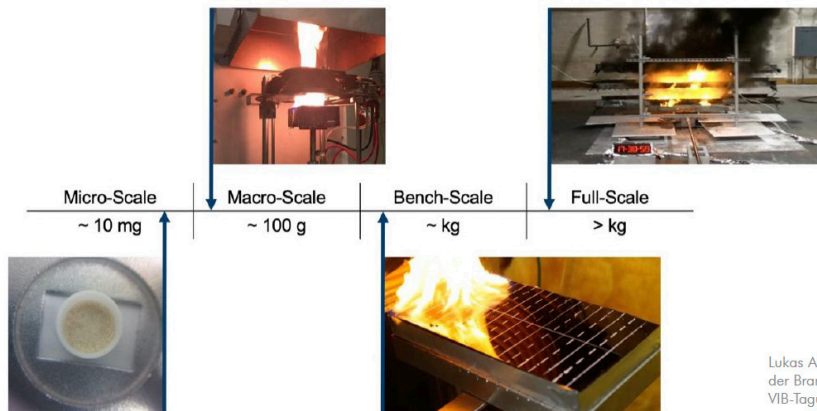


8

Modellierung der Brandausbreitung



Ermittlung von Brandparametern (vor allem Pyrolyseparameter) erfordert die Durchführung von Experimenten auf verschiedenen Skalen:



Lukas Arnold: Herausforderungen und Methoden der Brandausbreitungsmodellierung, VIB-Tagung Fire Safety Engineering, 8. Mai 2023

09.11.2023

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

9

Experimente auf verschiedenen Skalen



Skala	Experiment	Annahmen / Einschränkungen	Beobachtbare / messbare Parameter			Ableitbare Parameter / Zielstellung
			Masse / Heizwert	Zeitabhängige Wärmefreisetzung	Temperaturverteilung / Flammenposition	
Micro-Scale	TGA	Keine Wärmeleiteffekte	X			Reaktionsraten der Pyrolyse
Macro-Scale	Cone Calorimeter	Ideale Randbedingungen	X	X		Validierung auf kleiner (idealisierter) Skala
Bench-Scale	Brandausbreitungsexperiment, z. B. Furniture Calorimeter (< 1 MW)	Kontrollierte Randbedingungen	X	X	X	Validierung auf mittlerer Skala
Real-Scale	Brandausbreitungsexperiment, z. B. Raum- / Fassadenbrand	eingeschränkte Reproduzierbarkeit und eingeschränktes Messinstrumentarium			X	Validierung auf großer Skala

Lukas Arnold: Herausforderungen und Methoden der Brandausbreitungsmodellierung, VIB-Tagung Fire Safety Engineering, 8. Mai 2023

09.11.2023

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

10

Verbundprojekt BESKID



Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen
mittels KI-basierter Daten (BESKID)

Verbundpartner:

- Bergische Universität Wuppertal (zwei Lehrstühle)
- Forschungszentrum Jülich
- TÜV SÜD Rail GmbH
- Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

Gefördert vom BMBF im Rahmen der Bekanntmachung
„Künstliche Intelligenz in der zivilen Sicherheitsforschung II“

Förderzeitraum: Oktober 2022 bis September 2025

Förderkennzeichen: 13N16390 bis 13N16393

Gesamtzuwendung: 2,2 Mio. Euro

<https://www.beskid-projekt.de/de>



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



JÜLICH
Forschungszentrum



GEFÖRDERT VOM



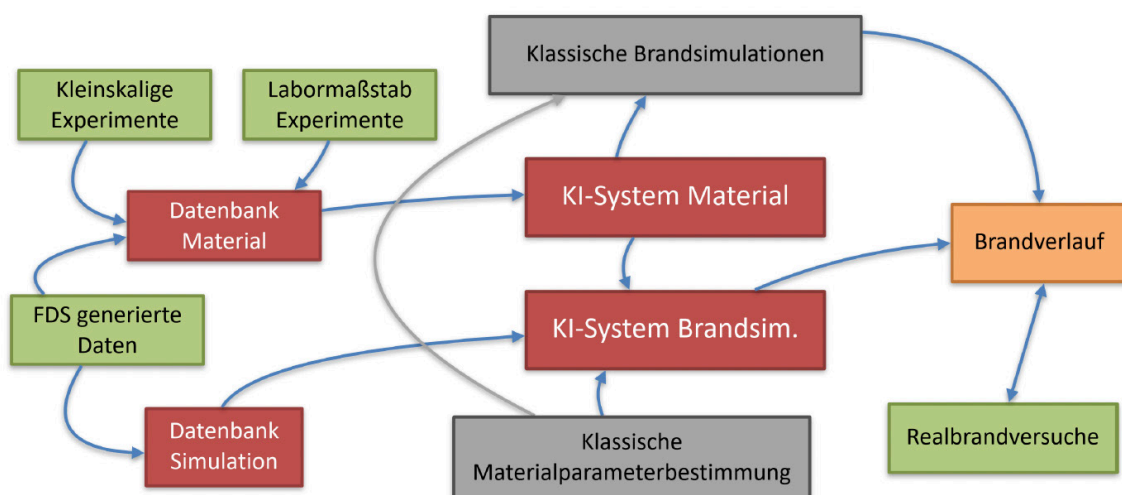
Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

09.11.2023

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

11

Ziele des Verbundprojekts BESKID



09.11.2023

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

12

Ziele des Verbundprojekts BESKID



Entwicklung zweier KI-Systeme zur Ermöglichung von schnellen Brandsimulationen in Schienenfahrzeugen auf Grundlage weniger experimenteller Daten.



Reduzierung des Aufwands bei gleichzeitiger Steigerung der Genauigkeit.



Ressourcenschonender Einsatz von Simulationen (Zeit- und Kostenersparnis).



Verwendung detaillierterer und schnellerer Simulationen eröffnet u. a. die umfassende Quantifizierung intrinsischer und extrinsischer Einflüsse auf den Brandverlauf.



Schnelle und praktikable Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten.



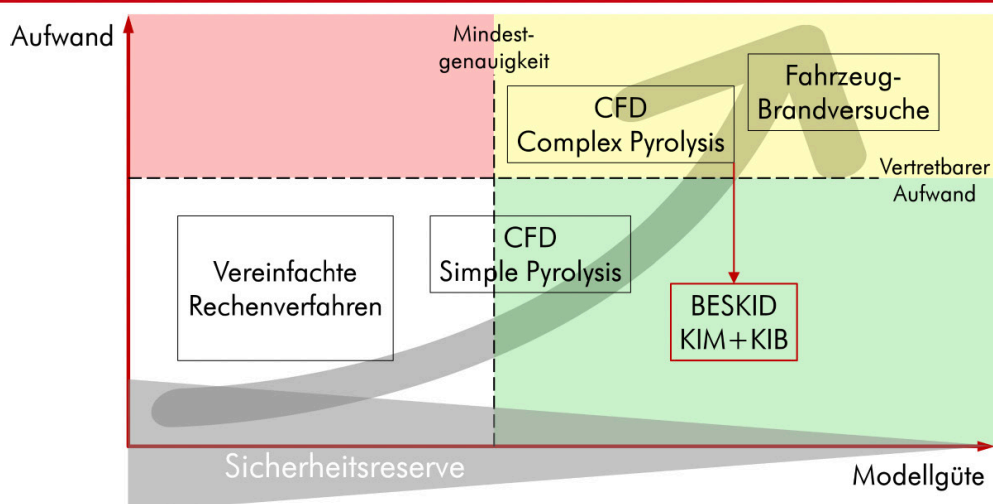
Entwicklung methodischer Standards.

09.11.2023

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

13

Ziele des Verbundprojekts BESKID



09.11.2023

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

14

Arbeitspakete und Zeitplan



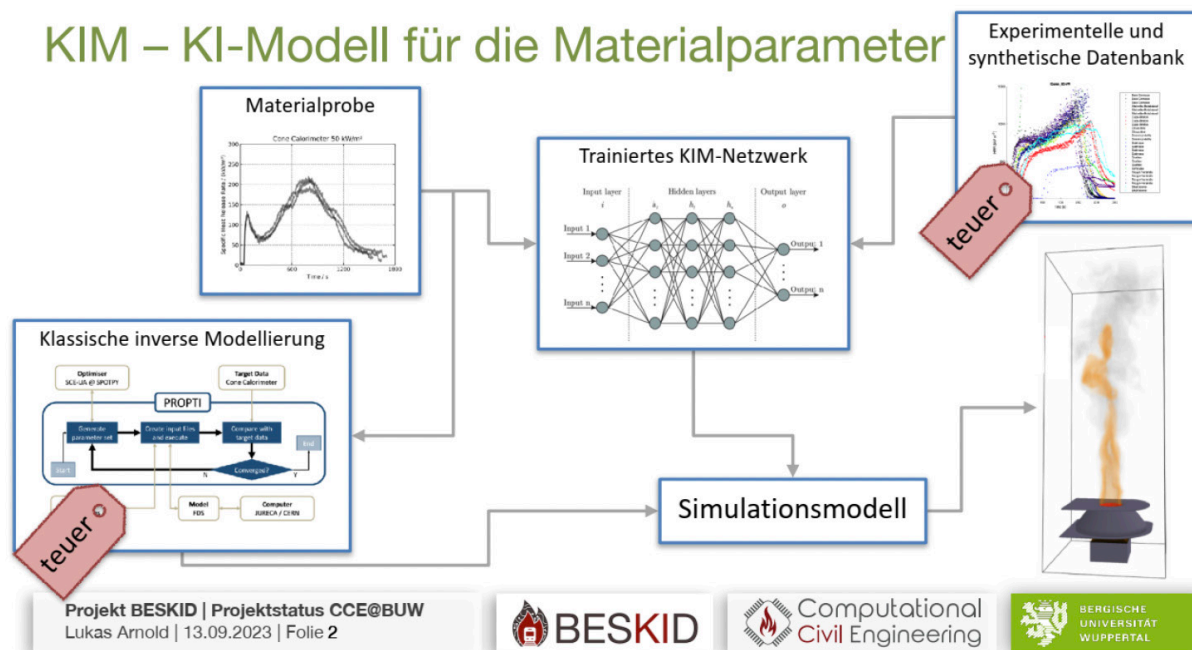
Arbeitspaket	Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3				Personalressourcen der geförderten Partner
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
AP 1 – Definition der Anforderungen und der Szenarien													BUW (1 PM), BCL (1 PM), FZJ (1 PM), TÜV (1 PM)
AP 2 – Erstellung der Trainingsdatenbanken													BUW (6 PM), FZJ (2 PM)
AP 3 – KI-basierte Materialparameterbestimmung													BUW (30 PM)
AP 4 – Entwurf der KI-basierten Brandsimulation													BUW (30 PM)
AP 5 – Kleinskalige Referenzexperimente													FZJ (16 PM)
AP 6 – Validierungsexperimente im Labormaßstab													FZJ (24 PM), TÜV (2 PM)
AP 7 – Realbrandexperimente													BCL (3 PM), FZJ (10 PM)
AP 8 – Simulation eines Bemessungsbrandes													BCL (3 PM), TÜV (3 PM)
AP 9 – Markanalyse im Hinblick auf eine Ausgründung													BUW (1 PM)
AP 10 – Öffentlichkeitsarbeit													BUW (4 PM), BCL (3 PM), FZJ (1 PM), TÜV (2 PM)
KT: Kick-Off-Treffen VT: Verbundtreffen MT: Meilensteintreffen. AV: Abschlussveranstaltung													Summe: BUW (72 PM), BCL (10 PM), FZJ (54 PM), TÜV (8 PM)

09.11.2023

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

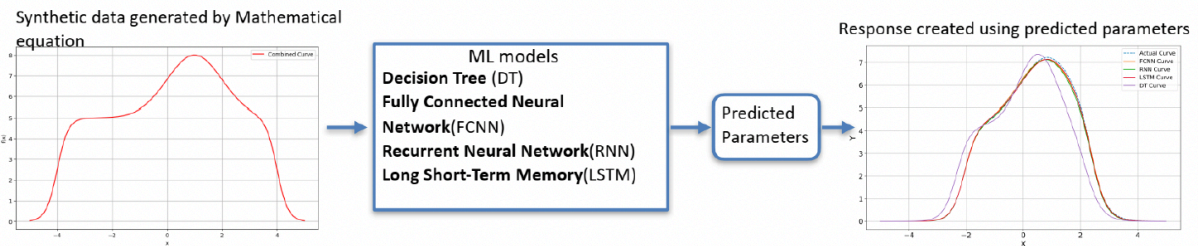
15

KIM – KI-Modell für die Materialparameter



Model Testing- The First Step.

Pyrolysis parameter prediction is a complex and resource-intensive process. To streamline this, simplified representations of pyrolysis data like curves resembling the Heat Release Rate (HRR) from cone calorimeter tests, are employed to evaluate various Machine Learning (ML) models.



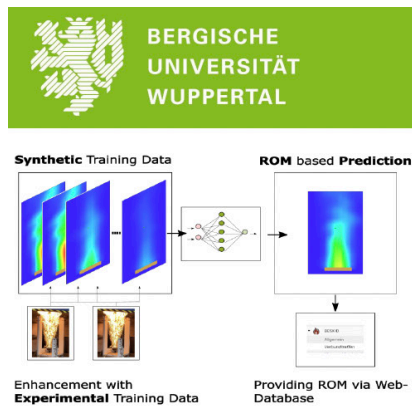
Models were trained to predict parameters from the mathematical equation used to create synthetic data, and the results were promising, suggesting that tailored fine-tuning could yield accurate material parameter predictions.

Projekt BESKID | Projektstatus GCE@BUW

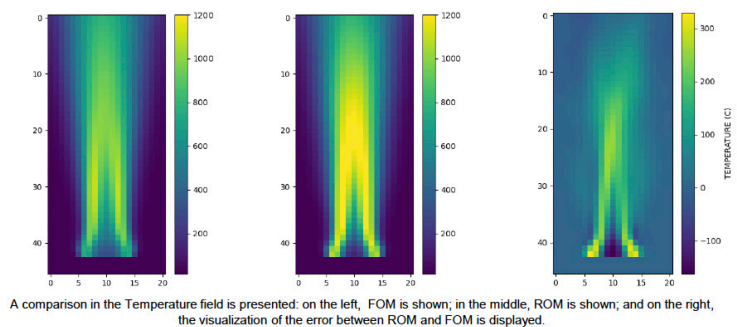
1

Computational
Civil Engineering

BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



Temperature Comparison FOM ROM



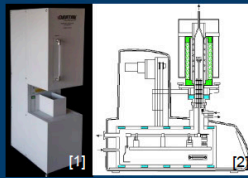
ROM

- Objective:
 - Develop a fast and efficient fire spreading model
 - Utilize Reduced Order Model
 - Utilize synthetic data from Fire Dynamic Simulator (FDS)

EXPERIMENTS OVERVIEW

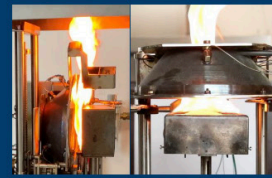
Micro scale: MCC and TGA

→ i.e. Reaction kinetics, heat of combustion



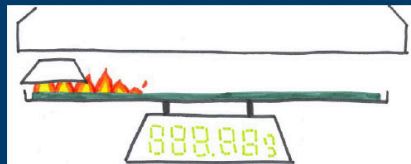
Small scale: cone calorimeter

→ Thermo physical properties



Medium scale: horizontal flamespread

→ Flamespread behaviour



Multi-scale
experimental approach:
PMMA, ABS, Listolan™

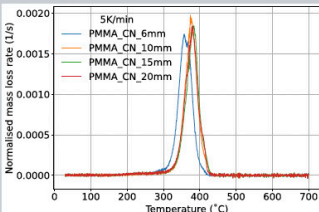
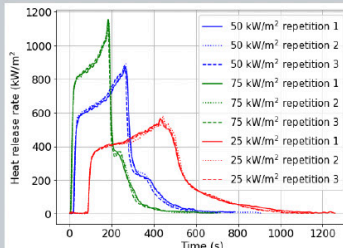
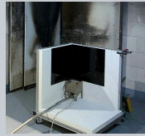
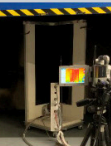
Large scale:
idealized geometries & train chairs



Member of the Helmholtz Association

JULICH
Forschungszentrum

FIRST EXPERIMENTAL RESULTS: PMMA

TGA	Cone calorimeter	Idealized geometries
5 K/min and 10 K/min - Different masses: 4 mg until 8.5 mg - Same material ordered in different thicknesses ➢ Shift in peak temperature ➢ Difficult to compare influence of thickness in other experiments 	- Horizontal and vertical standard experiments - Thickness: 6 mm and 10 mm - Heat flux: 25 kW/m², 50 kW/m² and 75 kW/m² Horizontal, 6 mm thick 	- Preliminary experiments - Different geometries considered Small room corner (with/ without insulated edges)   Small corner (ceiling)  Large room corner (with / without ceiling)  

Member of the Helmholtz Association

JULICH
Forschungszentrum

Simulation der Brandausbreitung | *Idealisierte Geometrien***Blind Calculation**

Der Modellbenutzer erhält eine grundlegende (nicht exakte) Beschreibung des zu modellierenden Szenarios; er ist verantwortlich für die Entwicklung geeigneter Modelleingaben aus der Problembeschreibung.

**Specified Calculation**

Der Modellbenutzer erhält eine vollständige und detaillierte Beschreibung der Modelleingaben, einschließlich Geometrie, Materialeigenschaften und Brandbeschreibung.

**Open Calculation**

Dem Modellbenutzer werden die vollständigsten Informationen über das Szenario zur Verfügung gestellt, einschließlich der Geometrie, der Materialeigenschaften, der Beschreibung des Brandes und der Ergebnisse von experimentellen Tests.

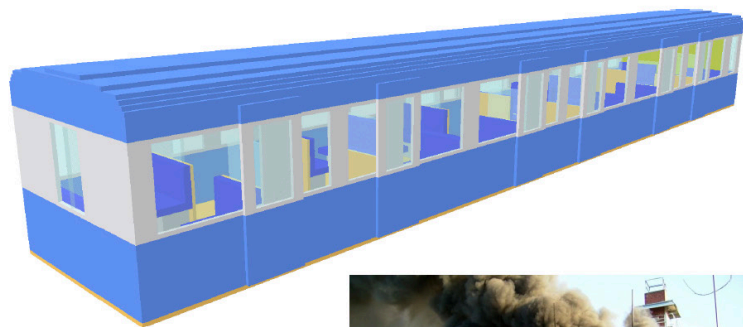
09.11.2023

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

21

Simulation der Brandausbreitung | *Referenzfahrzeug*

Innenverkleidung		
Fußboden		
Sitze		



Quelle: Osburg, 2010

09.11.2023

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

22

Toni Nabrotzky:

Entwicklung einer Schnittstelle zur Visualisierung von Brandsimulationen im virtuellen Raum

Abstract:

Im Rahmen der Anwendung von Methoden des Brandschutzingenieurwesens kommt häufig das Feldmodell Fire Dynamics Simulator (FDS) zur Prognose der Rauchausbreitung und/oder der Brandeinwirkungen zum Einsatz.

Die Ergebnisse der berechneten Simulationen lassen sich in FDS bislang nicht in Virtual Reality (VR) betrachten. Zwar gibt es bereits bestehende Workflows, um die Daten einer FDS-Simulation z. B. in der Unreal Engine [1] oder blender [2] darzustellen, doch sind diese Workflows nicht voll funktionsfähig und technisch veraltet, sodass eine aktuell einsatzfähige Schnittstelle fehlt.

Initiiert von der Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig (BCL) wurde zu dieser Problemstellung eine Masterarbeit [3] im Studiengang „Bauingenieurwesen“ an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig erarbeitet. Ziel sollte es sein, ein Konzept zur Übertragung der Daten von FDS-Simulationen in VR-fähige Software zu entwickeln, damit darauf aufbauend eine funktionsfähige Schnittstelle entwickelt und diese in bestehende Prozesse der Brandschutzplanung integriert werden kann.

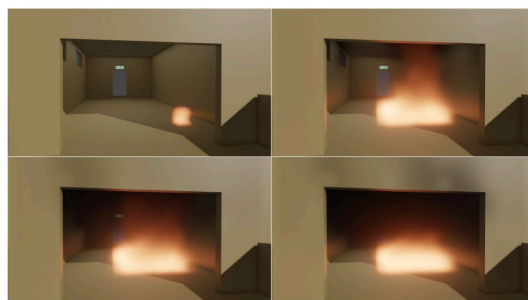


Abbildung 1: Reduzierte Sichtweite durch Darstellung der FDS-Daten in blender

Das entwickelte Konzept konnte erfolgreich umgesetzt werden, sodass darauf aufbauend eine automatisierte Schnittstelle als Addon für die Grafiksoftware blender entwickelt und um weitere Funktionalitäten erweitert wird.

In diesem Beitrag soll der aktuelle Stand der Entwicklung und die noch offenen Herausforderungen vorgestellt werden. Außerdem soll zu einem Austausch über die Potenziale des Werkzeugs für die Anwendung in Brandschutzplanung, Gebäudebetrieb und Brandbekämpfung eingeladen werden.

Literatur:

[1] Jan Vogelsang. GitHub - FireDynamics/VRSmokeVis. Aug. 2021. url: <https://github.com/FireDynamics/VRSmokeVis> (besucht am 16.09.2023).

[2] Ian Fong. FDS/SMV to Paraview to Houdini to Blender Tutorial : bare-bonesversion - YouTube. März 2023. url: <https://www.youtube.com/watch?v=Kfqr33i2LBI> (besucht am 16. 09.2023)

[3] Toni Nabrotzky. Entwicklung einer Schnittstelle zur Visualisierung von Brandsimulationen im virtuellen Raum, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Masterarbeit, Oktober 2018

Visualisierung von Brandsimulationen in VR



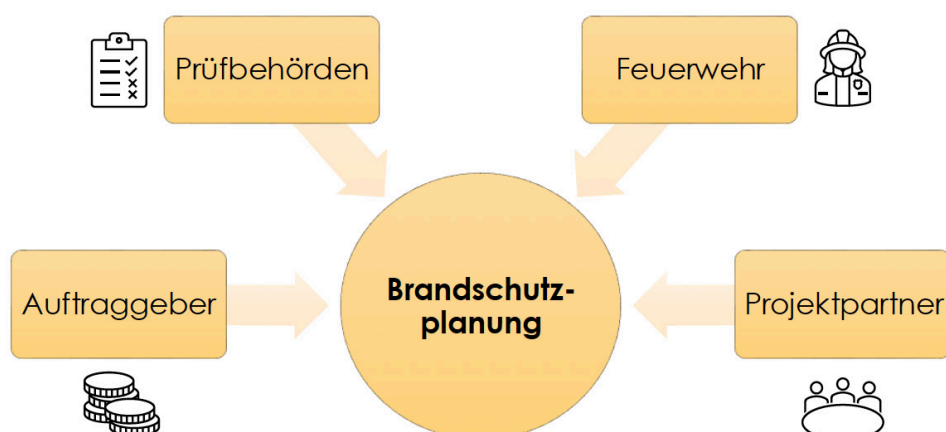
17. Anwendertreffen der FDS-Usergroup

M. Sc. Toni Nabrotzky

09.11.2023
Berlin

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

Motivation



09.11.2023
Berlin

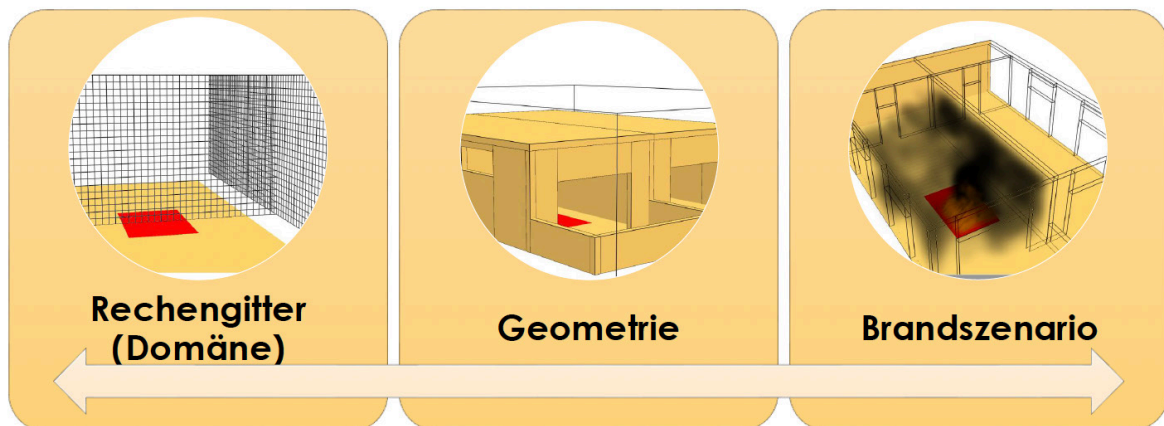
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

2

Aufbau einer FDS-Simulation



Generieren von Simulationsdaten



09.11.2023
Berlin

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

3

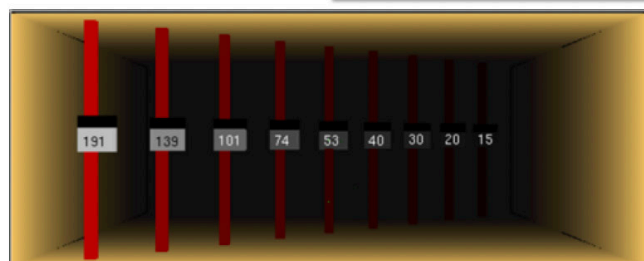
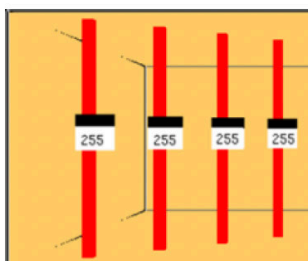
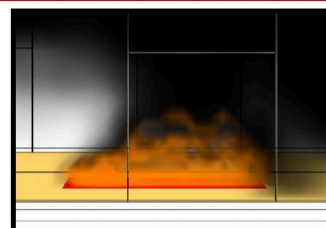
Aufbau einer FDS-Simulation



Visualisierung in Smokeview

Flamme: Wärmefreisetzungsrate (HRRPUV)

Rauch: optische Dichte (Soot Density)



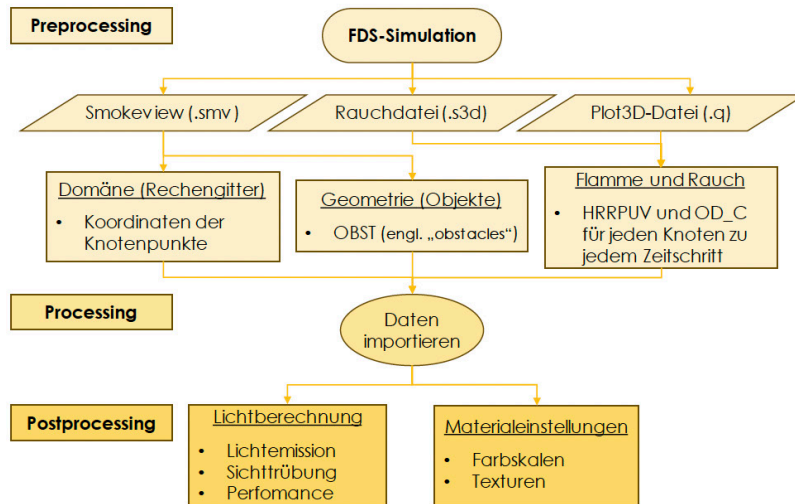
Kevin McGrattan u. a.: Fire Dynamics Simulator User's Guide S.271

09.11.2023
Berlin

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

4

Konzept zur Datenübertragung



09.11.2023
Berlin

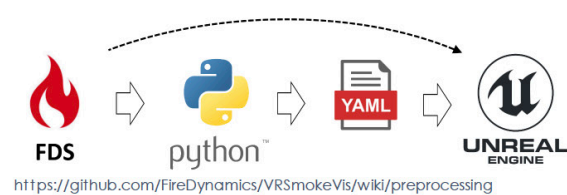
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

5

Bestehende Workflows



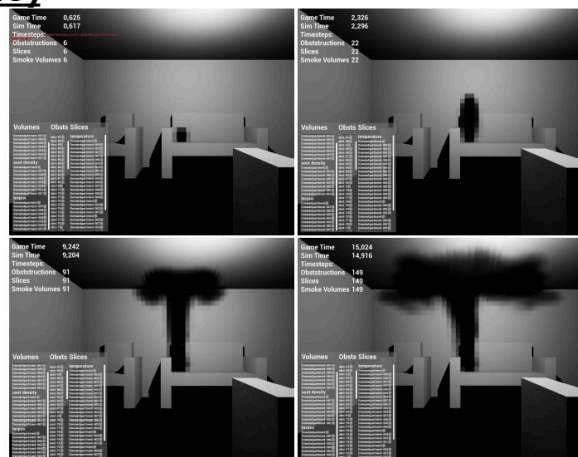
VR-SmokeVis (Plugin Unreal Engine)



Hoher Automatisierungsgrad

Plugin technisch veraltet

Keine Weiterentwicklung



09.11.2023
Berlin

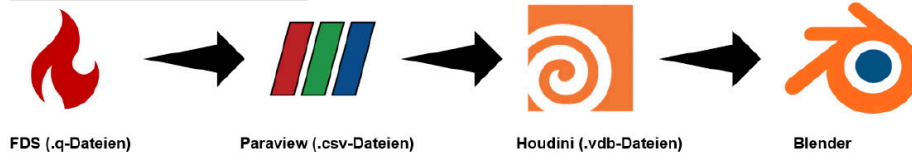
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

6

Bestehende Workflows



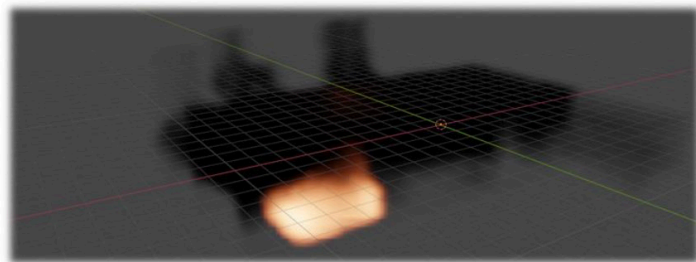
Blender-Workflow



Hoher manueller Aufwand

Abhängigkeit von 3D-Plots

Sehr große Datenmengen



09.11.2023
Berlin

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

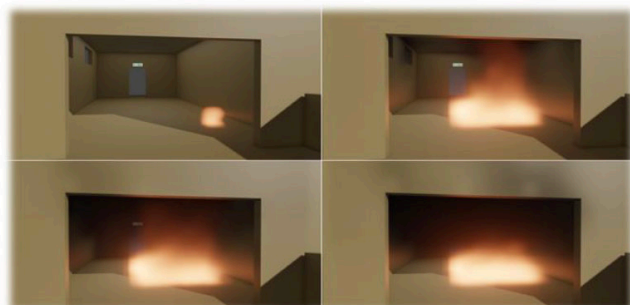
7

Aktueller Stand



Entwicklung Schnittstelle

- Implementierung der fundamentalen Funktionen
- Gestaltung intuitives UI



09.11.2023
Berlin

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

8

Visualisierung FDS in Blender

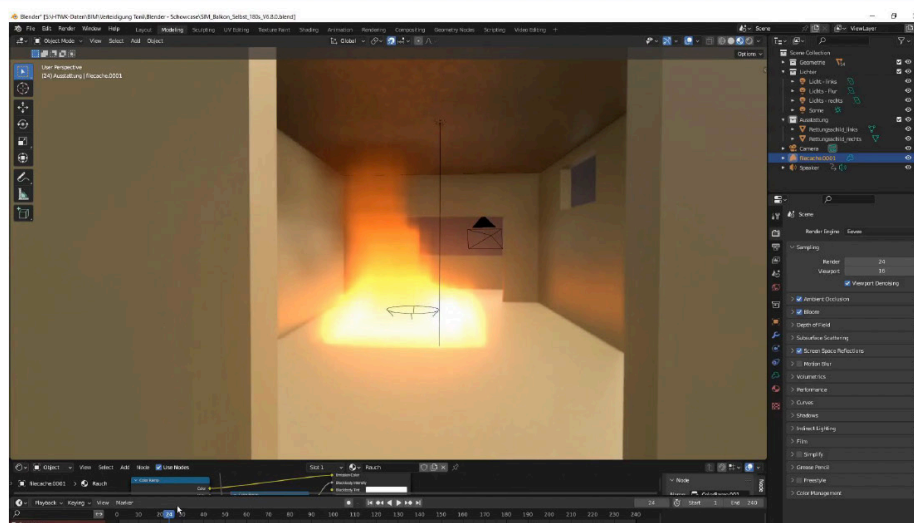


09.11.2023
Berlin

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

9

Visualisierung FDS in Blender (VR)



09.11.2023
Berlin

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

10

Potenzielle Anwendungsfälle



Verständnis schaffen

- Steigerung Akzeptanz von Simulationen
- Eintauchen in realistische Daten



Einsatzübungen/Training
Feuerwehr

- Virtuelles, ortsungebundenes Training



Schulung Betriebspersonal

- Training organisatorischer Maßnahmen
- Sicherheitsgefühl erlebbar machen



Generierung
Forschungsdaten

- Günstige, effizientere Versuchsdurchführung



09.11.2023
Berlin

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

11

Nächste Schritte



Veröffentlichung
des Addons

Integration in
zukünftige
Projekte

Einbau weiterer
Funktionen

Optimierung der
Performance

Validierung der
Erkennungsweiten

09.11.2023
Berlin

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

12

Johannes Schliebe:

Simulation der Brandausbreitung an begrünten Fassaden - Erarbeitung von Voraussetzungen und Grundlagen

Abstract:

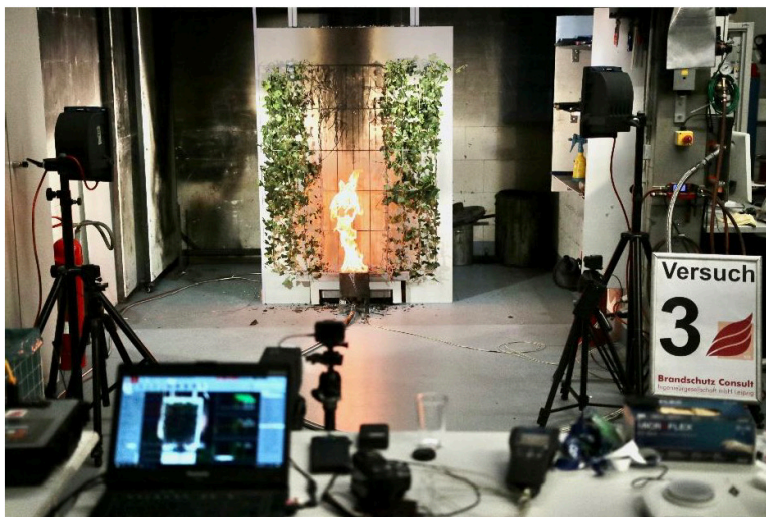
Begrünte Fassaden stellen in Städten eine ökologische Maßnahme zur Minderung der Feinstaubbelastungen, Schallimmissionen, Temperaturregulierung u.v.m. dar. Allerdings dürfen Grünfassaden bauordnungsrechtliche Belange des Brandschutzes nicht beeinträchtigen.

Gegenwärtig wird das Brandausbreitungsverhalten an Grünfassaden ausschließlich im Rahmen realmaßstäblicher Brandversuche untersucht. Computergestützte Brandsimulationen bieten hingegen eine kosten- und zeiteffiziente Möglichkeit, das Brandausbreitungsverhalten unter Variation der Bedingungen zu berechnen.

Mit Hilfe des Brandsimulationsprogramms "Fire Dynamics Simulator" (FDS) und der darin enthaltenen "Complex Pyrolysis Models" kann die Brandausbreitung in Abhängigkeit der Brennstoffeigenschaften und der Umgebungsbedingungen berechnet werden. Für die Simulation von Vegetationsbränden existiert u. a. das sogenannte "Particle Model", bei dem die Vegetation durch Lagrangesche Partikel repräsentiert wird.

Im Rahmen einer Masterarbeit im Studiengang Sicherheit und Gefahrenabwehr an der Hochschule Magdeburg-Stendal werden Grundlagen zur Anwendung des Pyrolysemodells "Particle Model" für die Simulation der Brandausbreitung auf mit Efeu begrünten Fassaden geschaffen.

Die Inhalte des Beitrags umfassen die statistische Erfassung geometrischer und gravimetrischer Eigenschaften von Efeu sowie die experimentelle Ermittlung der Brandparameter von Efeu auf verschiedenen Skalen.



Simulation der Brandausbreitung auf begrünten Fassaden

Erarbeiten von Voraussetzungen und Grundlagen

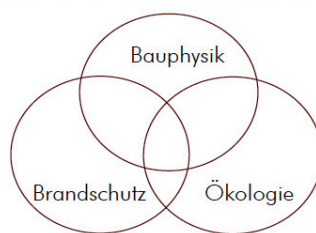
Vortrag von Johannes Schliebe
zum 17. Treffen der FDS Usergroup

09.11.2023

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



Schnittstellen bei Fassadenbegrünung

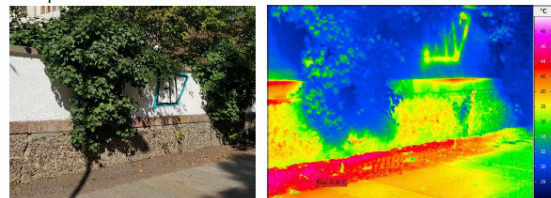


Brand im Schloss Ebenweier:



Quelle: <https://www.salzi.at/2016/06/nach-grossbrand-schloss-ebenweier-wird-saniert/>

Temperaturunterschiede an efeubewachsener Wand:



09.11.2023

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

2

Bewertung des Brandverhaltens



Brandversuch aus Forschungsprogramm: Fire-Safe Green



- + genaue Ergebnisse
- + Validierung Brandsimulationen
- kosten- u. zeitintensiv

Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=zlNSlww0U28>

09.11.2023

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

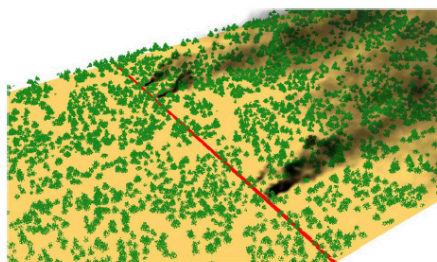
3

Partikel in FDS

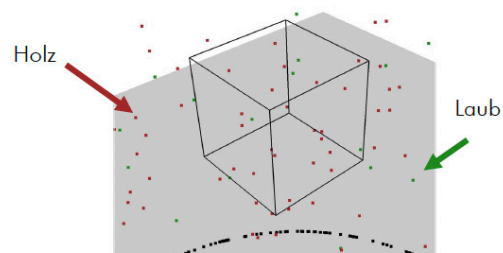


= Gegenstände, deren Geometrie nur schwer in Gitterstruktur abgebildet werden kann

Beispiele aus Validation Guide:



Simulation eines Waldbrands
Heil_post_13ms_cat.fds (Gitterweite: 100 cm)



Baum aus Partikeln
tree_2_m_14_pc_cat.fds (Gitterweite: 10 cm)

09.11.2023

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

4

Geo- und Gravimetrische Eigenschaften



5 Standorte, Entnahme Efeu, 40 cm x 40 cm

&SURF ID MATL_ID MOISTURE_FRACTION SURFACE_VOLUME_RATIO LENGTH GEOMETRY	&MATL ID DENSITY CONDUCTIVITY SPECIFIC_HEAT_RAMP N_REACTIONS NU_SPEC SPEC_ID NU_MATL MATL_ID HEAT_OF_REACTION REFERENCE_TEMPERATURE PYROLYSIS_RANGE
&PART ID SAMPLING_FACTOR SURF_ID DRAG_COEFFICIENT STATIC COLOR	&INIT ID PART_ID XB N_PARTICLES MASS_PER_VOLUME



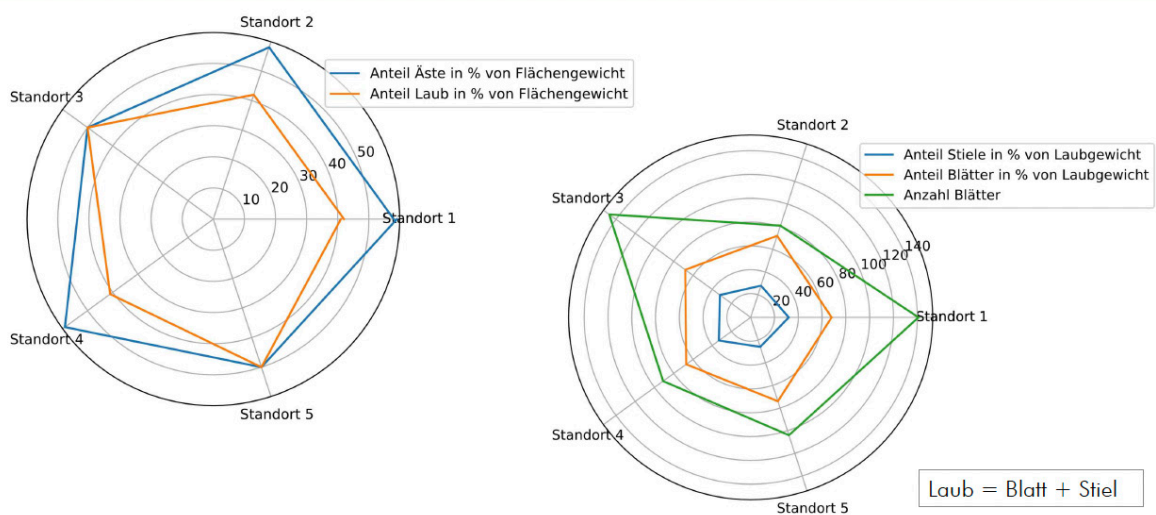
Verfahren nach: Hoch, Andres/ Ingolf Kothhoff (2022):
 Fassadenbegrünung aus brandschutztechnischer Sicht,
 Versuch einer baustofflichen Systematisierung - "Machbarkeitsstudie",
 bei: Brandschutz-Fachtagung am 31.08. und 01.09.2022 in St.Pölten [Vortrag]

09.11.2023

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

5

Geo- und gravimetrische Eigenschaften

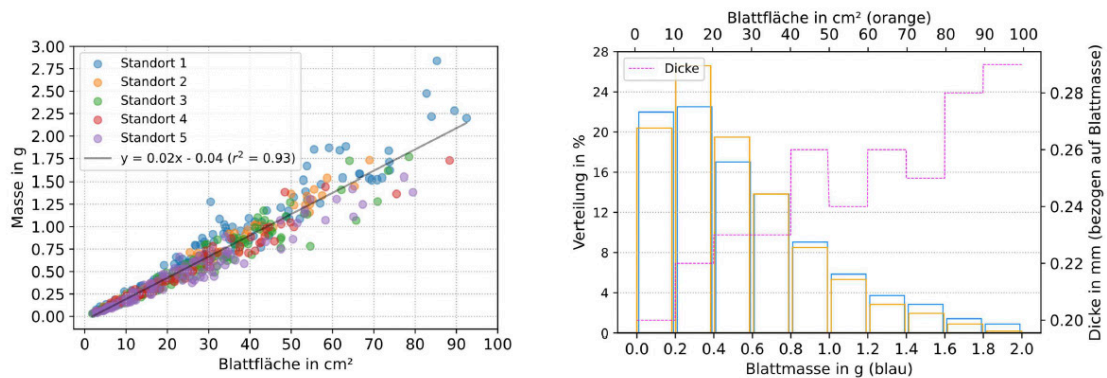


09.11.2023

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

6

Geo- und gravimetrische Eigenschaften



09.11.2023

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

7

Moisture Fraction



- $\text{MOISTURE_FRACTION } M = \frac{\text{Masse Wasser}}{\text{Masse Blätter trocken}} = \frac{m_W}{m_t}$

- $\text{Masse Wasser} = \text{Masse Blätter} - \text{Masse Blätter trocken} = m_B - m_t$

MOISTURE_FRACTION für vitales Efeu:

	Standort 1	Standort 2	Standort 3	Standort 4	Standort 5
m_B in g	112	48	70	41	50
m_t in g	37	16	22	19	17
m_W in g	75	32	48	22	33
M	2,03	2,00	2,18	1,15	1,94

09.11.2023

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

8

Ermitteln von Pyrolyseparametern



inverse Modellierung:

mehrskalige Experimente

Experimente in FDS nachrechnen

Materialeigenschaften variieren
(imaginären Brennstoff konstruieren)

Verfahren aus:

Hennen, Tristan / Lukas Arnold (2023): PMMA pyrolysis simulation - from micro-to real-scale, in: Fire Safety Journal, Volume 141, 103926, [online] doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103926>

```
&SURF ID
MATERIAL_ID
MOISTURE_FRACTION
SURFACE_VOLUME_RATIO
LENGTH
GEOMETRY
```

```
&MATERIAL ID
DENSITY
CONDUCTIVITY
SPECIFIC_HEAT_RAMP
N_REACTIONS
NU_SPEC
SPEC_ID
NU_MATERIAL
MATERIAL_ID
HEAT_OF_REACTION
REFERENCE_TEMPERATURE
PYROLYSIS_RANGE
```

```
&PART ID
SAMPLING_FACTOR
SURF_ID
DRAG_COEFFICIENT
STATIC
COLOR
```

```
&INIT ID
PART_ID
XB
N_PARTICLES
MASS_PER_VOLUME
```

09.11.2023

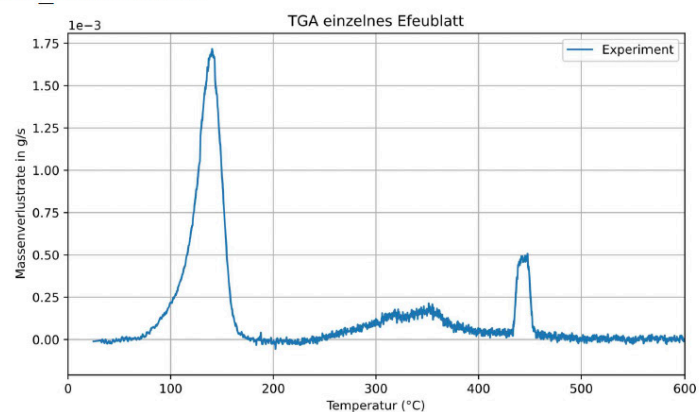
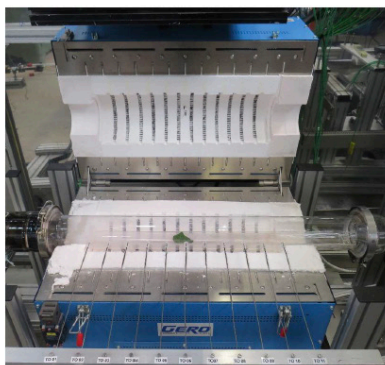
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

9

Tube Furnace: Pyrolyse in der Mikroskala



PYROLYSIS_RANGE und REFERENCE_TEMPERATURE



Verfahren nach: Hennen, Tristan / Lukas Arnold (2023): PMMA pyrolysis simulation - from micro-to real-scale, in: Fire Safety Journal, Volume 141, 103926, [online] doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103926>

10

Tube Furnace: Pyrolyse in der Mikroskala



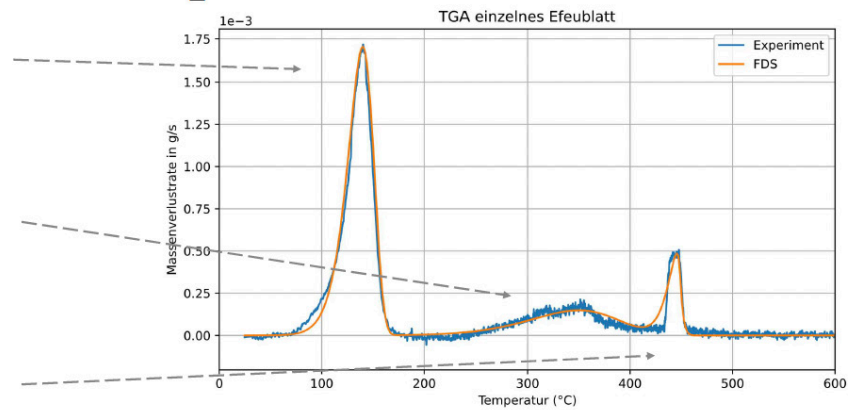
PYROLYSIS_RANGE und REFERENCE_TEMPERATURE

```

#MATERIAL = 'moisture'
DENSITY = 1000.
CONDUCTIVITY = 0.2
SPECIFIC_HEAT = 4.18
REFERENCE_TEMPERATURE = 135.
HEATING_RATE = 5.
PYROLYSIS_RANGE = 80.
MATERIAL = 'water_vapor'
SPEC_ID = 'WATER_VAPOR'
HEAT_OF_REACTION = 2259. /

#MATERIAL = 'vegetation'
DENSITY = 250.09
CONDUCTIVITY = 0.1
SPECIFIC_HEAT = 1.0
MATERIAL = 'fuel_vapor'
SPEC_ID = 'FUEL_VAPOR'
HEAT_OF_REACTION = 0.50
MATERIAL = 'char'
SPEC_ID = 'CHAR'
HEAT_OF_REACTION = 300.
HEATING_RATE = 5.
PYROLYSIS_RANGE = 100. /

#MATERIAL = 'char'
DENSITY = 150.
CONDUCTIVITY = 0.05
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'top_char'
MATERIAL = 'fuel_vapor', 'air'
SPEC_ID = 'FUEL_VAPOR', 'AIR'
HEAT_OF_REACTION = 0.50
MATERIAL = 'ash'
SPEC_ID = 'ASH'
HEAT_OF_REACTION = -30000.
REFERENCE_TEMPERATURE = 400.
HEATING_RATE = 20. /
PYROLYSIS_RANGE = 20. /
  
```



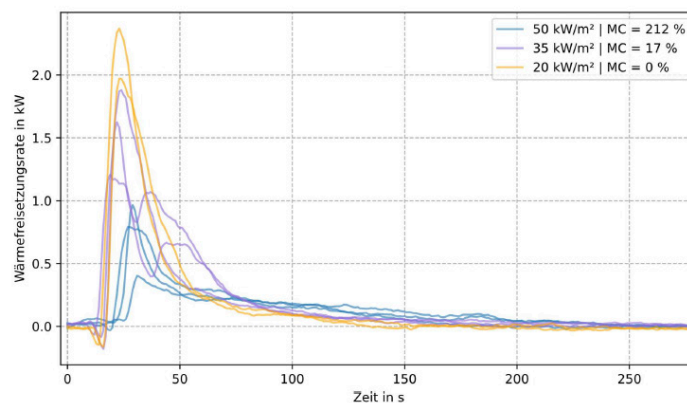
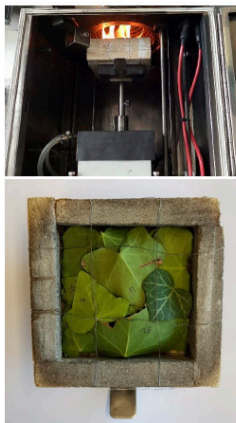
Verfahren nach: Hehnen, Tristan / Lukas Arnold (2023): PMMA pyrolysis simulation - from micro-to real-scale, in: Fire Safety Journal, Volume 141, 103926, [online] doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103926>

11

Cone-Kalorimeter: Pyrolyse in der Makroskala



SPECIFIC HEAT, CONDUCTIVITY, EMISSIVITY und ABSORPTION_COEFFICIENT



09.11.2023

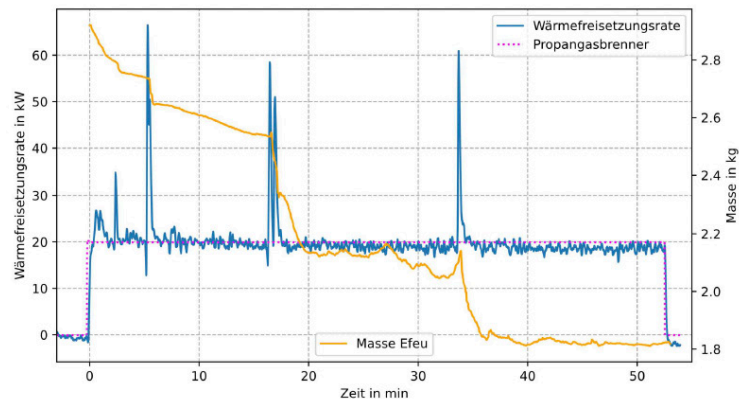
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

12

Furniture-Kalorimeter: Pyrolyse im Labormaßstab



Validierung der Pyrolyseparameter aus Mikro- und Makroskalen:



Abmessungen Begrünung: 130 cm (L) x 100 cm (B)

09.11.2023

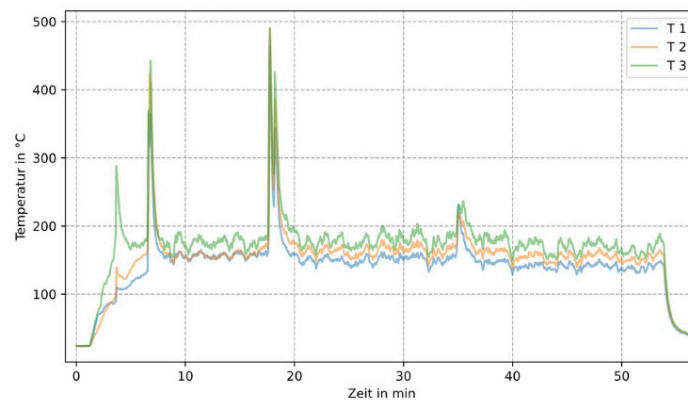
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

13

Furniture-Kalorimeter: Pyrolyse im Labormaßstab



Validierung der Pyrolyseparameter aus Mikro- und Makroskalen:



Abmessungen Begrünung: 130 cm (L) x 100 cm (B)

09.11.2023

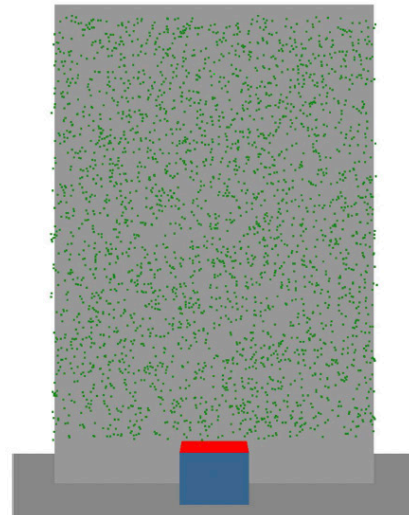
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

14

Ausblick



- Cone-Experimente nachrechnen
- Validierung der Pyrolyseparameter
- Modell auf Äste und Stiele ausweiten



09.11.2023

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

15

Quellen



Hennen, Tristan / Lukas Arnold (2023): PMMA pyrolysis simulation - from micro-to real-scale, in: Fire Safety Journal, Volume 141, 103926, [online] doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103926>

Hoch, Andres/ Ingolf Kottthoff (2022): Fassadenbegrünung aus brandschutztechnischer Sicht, Versuch einer baustofflichen Systematisierung - "Machbarkeitsstudie", bei: Brandschutz-Fachtagung am 31.08. und 01.09.2022 in St.Pölten [Vortrag]

<https://www.youtube.com/watch?v=zINSIwwOU28>

National Institute of Standards and Technology (2023): Fire Dynamics Simulator User's Guide, Gaithersburg, USA: [online] doi: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>

National Institute of Standards and Technology (2023): Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation Guide, Gaithersburg, USA: [online] doi: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1018>

salzi.at (2016): Nach Großbrand: Schloss Ebenzeier wird saniert, salzi.at, [online] <https://www.salzi.at/2016/06/nach-grossbrand-schloss-ebenzeier-wird-saniert/> [abgerufen am 06.11.2023]

09.11.2023

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

16

Ásgrímur Eiríksson, Bjarne P. Husted, Frank Markert

Experiments and modelling of the spread of fire between containers on board a container ship

Abstract:

Historical fire scenarios aboard container ships have proven extremely dangerous and complicated. In the past decades, container transport has increased drastically; therefore, container ships' capacity has more than tripled since 1996. The spread of fire from a burning container to adjacent containers in a cargo compartment aboard a container ship has been studied [1].

Fire incidents are increasing, especially in the greater vessels, and indications are that the fire extinguishing and fire detection systems have not kept in phase with the vessel's enlargements [2]. Therefore, knowledge of the fire-spreading mechanism is one of many essential parts in increasing safety aboard container ships.

The study consists of experimental fire studies of parts from a container, including the door and flooring. Further, computational fluid dynamic modelling using the computer program Fire Dynamic Simulator (FDS). The objectives were to study heat transfer from a burning container to adjacent containers and predict possible fire-spreading mechanisms using experimental data and findings to support the numerical simulation of the container fire.

The results indicate that exposing temperatures of a burning container with a certain heat release rate can spread to adjacent containers, see Figure 1 and Figure 2. However, ignition inside the adjacent containers will depend on the material being transported and the condition of the container.

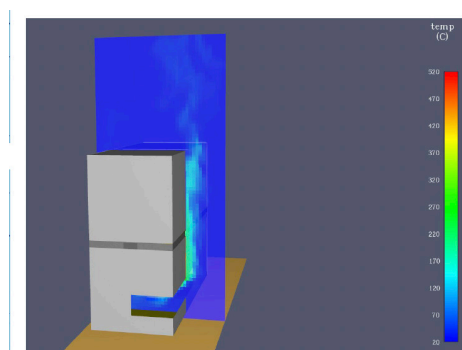


Figure 1 Initial model of the burning container and temperature slice showing influence on the container above

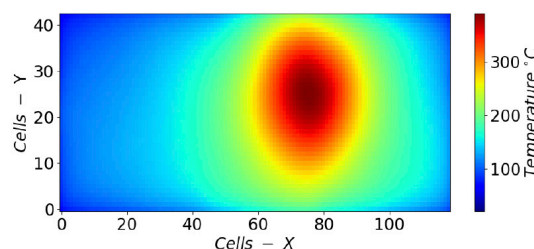


Figure 2 Color map of the exposed surface of the plywood flooring

References

- [1] Á. Eiríksson, 'Experiments and modelling of the spread of fire between containers on board of a container ship', MSc, DTU Department of Civil and Mechanical Engineering, Lyngby, Denmark, 2022.
- [2] Transport Safety Investigation Bureau, 'Fire on board Maersk Honam at Arabian Sea on 6 March 2018', 40 Ministry of Transport Singapore, Singapore, MIB/MAI/CAS.035, Oct. 2020.

DTU Construct

Department of Civil and Mechanical Engineering

Experiments and modelling of the spread of fire between containers on board a container ship using FDS

Ásgrímur Eiríksson

presented by Bjarne P. Husted (bphu@dtu.dk)



Master thesis at the Technical University of Denmark, but also a project at DBI and EMSA (EU)

- Ásgrímur Eiríksson, 'Experiments and modelling of the spread of fire between containers on board of a container ship', MSc, DTU Department of Civil and Mechanical Engineering, Lyngby, Denmark, 2022. (Supervised by Bjarne Husted and Frank Markert)
- Contact: asgrimureika@gmail.com
- Contain project at DBI:
<https://brandogsikring.dk/en/research-and-development/maritime/contain/>
- Cargossafe (EMSA) <https://www.emsa.europa.eu/damage-stability-study/items.html?cid=77&id=4909> Study investigating cost-efficient measures for reducing the risk of cargo fires on container vessels (CARGOSAFE) October 2023

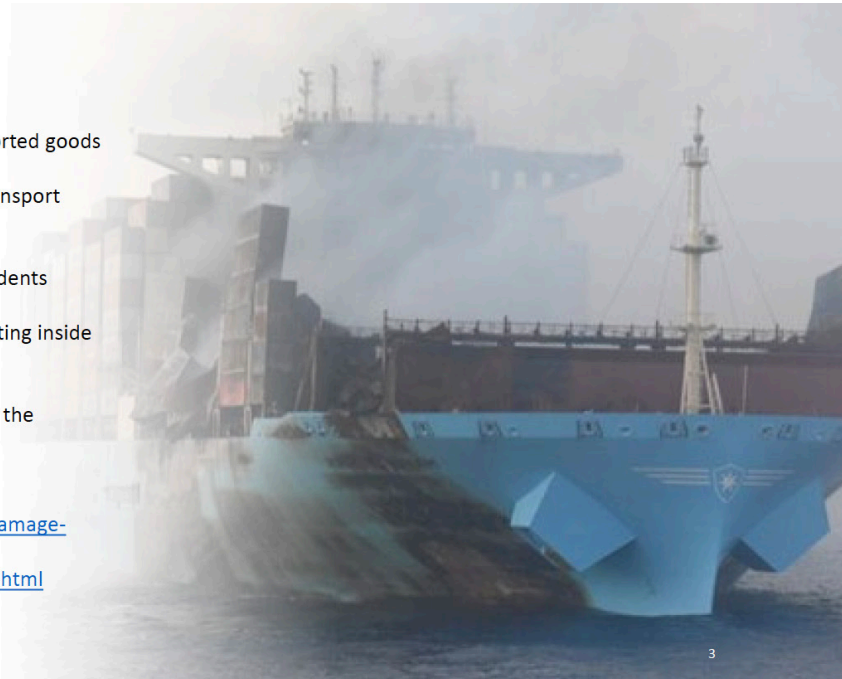


Project background

- Increased demand of transported goods
- Increased vessel sizes and transport capacity
- Increased number of fire incidents
- Lack of capability for fire fighting inside the container compartments
- Larger compartments extend the detection time

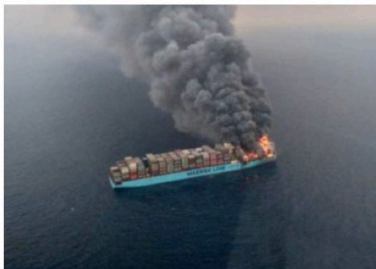
Reference

<https://www.emsa.europa.eu/damage-stability-study/download/7463/4909/23.html>



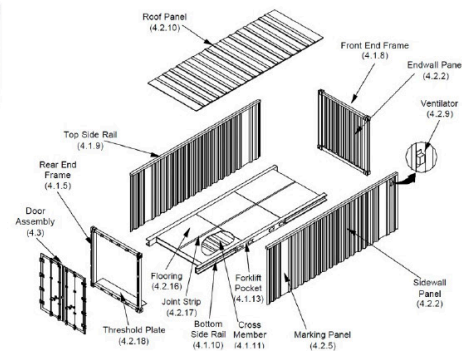
Maersk Honam fire, 6 March 2018

- 4 dead
- It took three days to get the fire under control

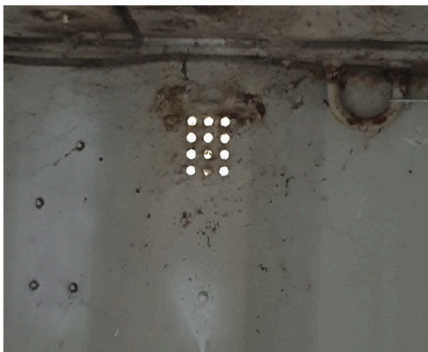


Background

- Containers are built to store and protect goods while transported
- Consists mainly of steel and wood
- Inspected for water tightness according to standards
- Fires inside containers are more likely to self extinguish due to limited air exchange



5



- Ventilation opening seen from inside container



- Ventilation covering seen from outside container



6

Project objectives

- To study heat transfer from a burning container to adjacent containers
- Can maximum fuel-controlled fire inside a container with a specific heat release rate spread to adjacent containers?
- Predicting for possible sequence of ignition of the adjacent containers



Project Methods

- Combining experimental data and numerical simulations
- Two experimental methods used for small scale fire testing
- Cone calorimeter test
- Mobile furnace test



Project limitations

- Assuming fuel-controlled fire inside container
- One fuel source inside the burning container
- Steady state heat release rate after growth period
- Influence of possible goods being transported was not considered



Purchased container

- Seagoing 20-foot container was cut down to separated parts for experimental purposes
- Two types of plywood in the flooring with different densities

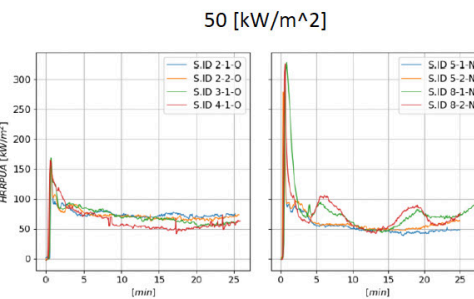


Cone calorimeter experiment

- Experiments of 22 samples for piloted ignition
- Effects of 15, 25, 35, 50 [kW/m²]
- Large differences in peak heat release rate
- Time to ignition
- Difference density of the plywood samples

Average densities of samples

	MEAN	STD	RSD
Old samples	853.2 [kg/m ³]	25.1	2.9 %
New samples	683.4 [kg/m ³]	52.7	7.7 %

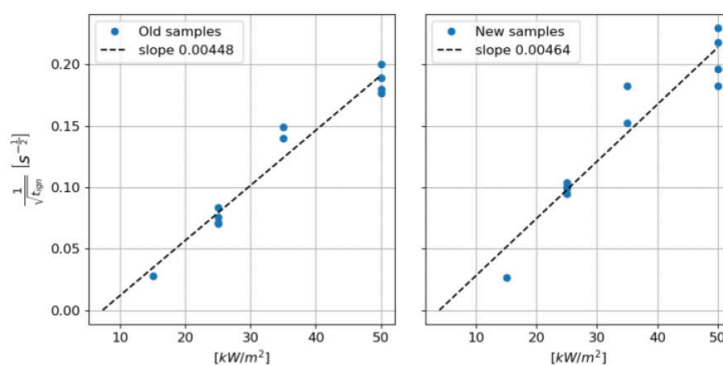


Average time to ignition

Effect [kW/m ²]	15	25	35	50
Old samples [s]	1314	179	48	29
New samples [s]	1450	103	37	24

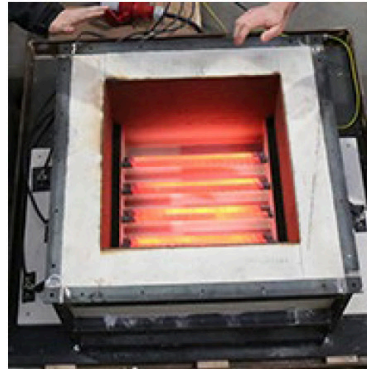
Cone calorimeter experiment

- Inverse of time to ignition
- Theoretical critical heat flux
 - Old sample: 7.3 [kW/m²]
 - New samples: 3.9 [kW/m²]



Mobile furnace developed at DBI

ISO 834 fire curve on a smaller scale

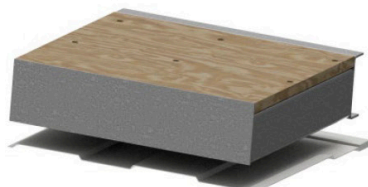


13



Mobile furnace experiment

- Electrical heated small scale test device
- Area of exposure surface 0.25 [m²]
- Test sample and steel sheet was placed on top of the furnace
- Controlling temperature set to 620 [°C]



More info on the fire tests:

[https://brandogsikring.dk/files/Pdf/FogU/Contain/CONTAIN%20REPORT-%20Appendix%20\(A_G\).pdf](https://brandogsikring.dk/files/Pdf/FogU/Contain/CONTAIN%20REPORT-%20Appendix%20(A_G).pdf)



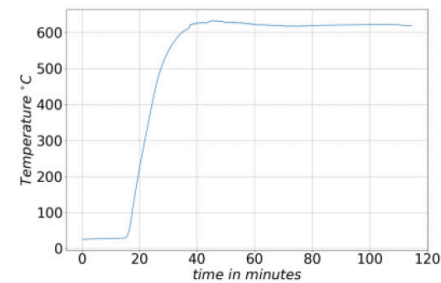
14



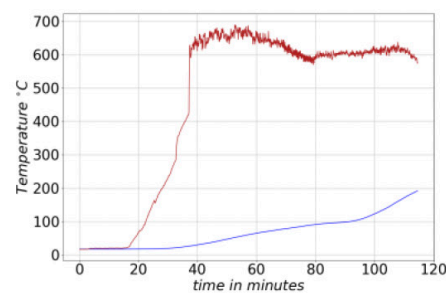
Mobile furnace experiment



- Control thermocouples welded to the steel sheet
- Total 8 thermocouples added to the specimen
- Ignition occurred after 23 minutes at temperature around 350 – 400 [°C]



Top of
Steel plate



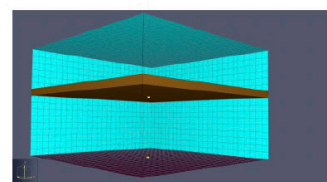
Plywood floor
Exposed
Unexposed

15



Simulation of the mobile furnace experiment

- Emitting surface temperature following experimental control temperature curve
- Cell size 2 cm
- Boundary vents open
- Boundary output files used for data analyzing
- Ramp up function for thermal conductivity



Material factors	ρ	ϵ	c_p	k
	$\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	—	$\left[\frac{\text{kJ}}{(\text{kg} \cdot \text{K})} \right]$	$\left[\frac{\text{W}}{(\text{m} \cdot \text{K})} \right]$
Plywood	830	0.9	2.7	0.188

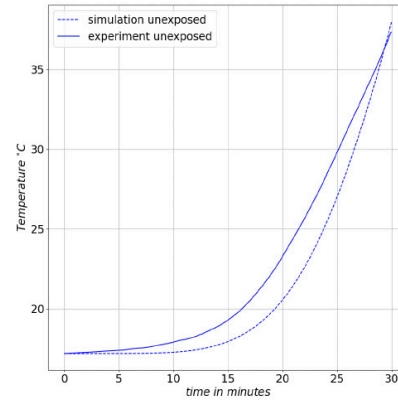
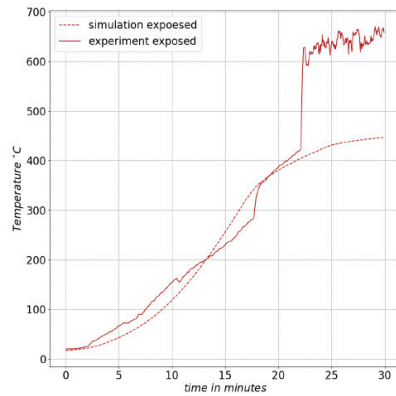


Technical University of Denmark DTU

16



Plywood floor



Ignition factors	Time	T_{exp}	T_{unexp}	q_{inc}	q_{rad}	q_{con}
	min	°C			$\frac{kW}{m^2}$	
Plywood flooring	21.17	390.81	24.39	22.14	10.01	-2.22



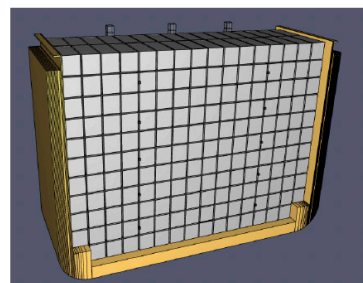
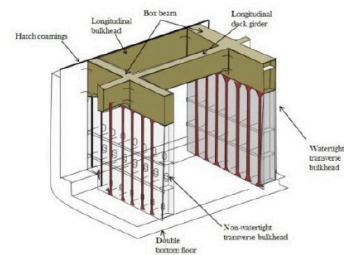
Technical University of Denmark DTU

17



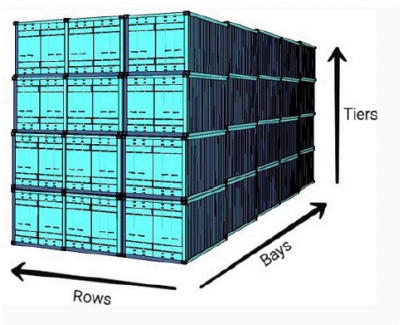
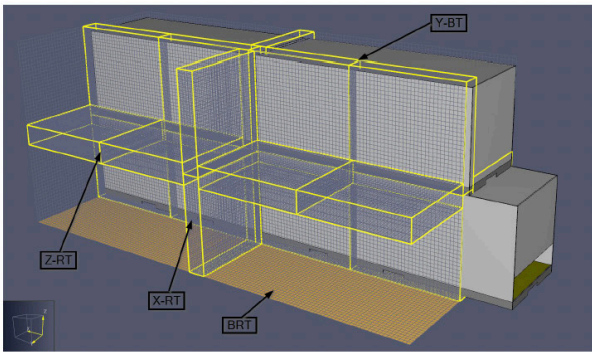
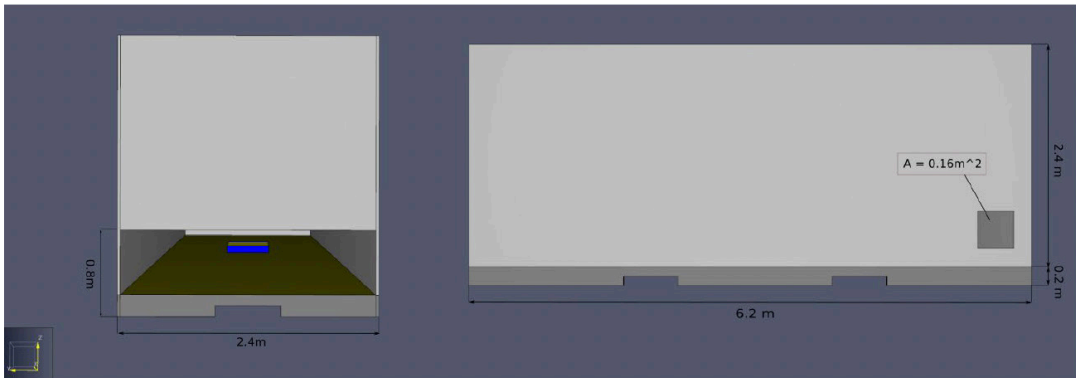
Simulation of the fire spread between containers

- Cargo hold consisting of 348 TEU's,
- Cargo hold plotted offset from 11400 TEU container ship
- Stack of eight containers
- Burning container defined with opening to maintain enough air exchange

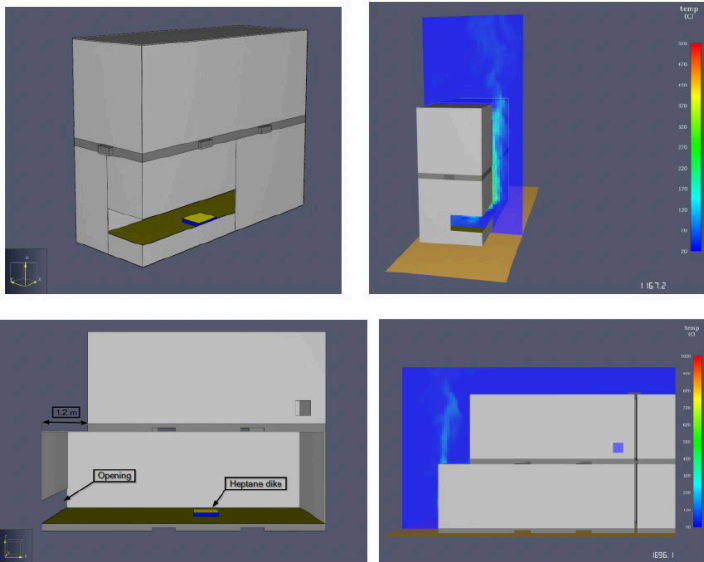


18

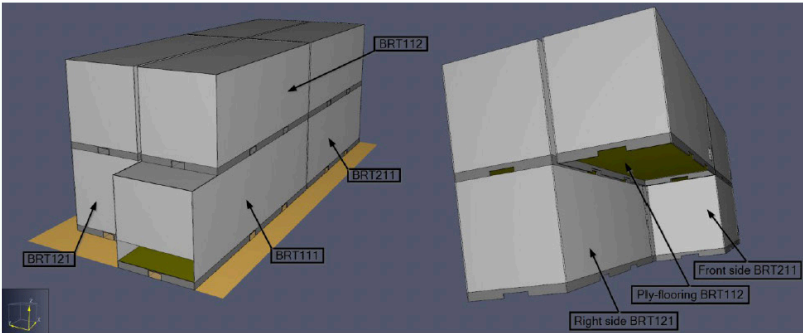
Opening and container dimensions



	X [m]	Y [m]	Z [m]	Total cells [-]	Total sub-mesh [-]
Domain	17.0	6.4	6.4	1,885,670	36



21

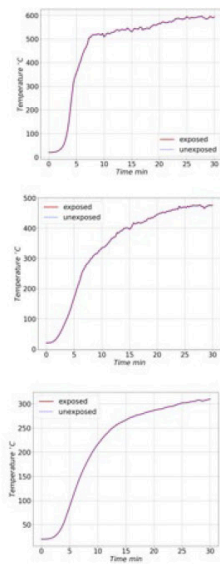


	Exp.	UnExp.	q_{tot}	q_{rad}	q_{con}	q_{inc}	Cell-X	Cell-Y
	[°C]	[°C]	$\frac{kW}{m^2}$	$\frac{kW}{m^2}$	$\frac{kW}{m^2}$	$\frac{kW}{m^2}$	[-]	[-]
Ply-flooring BRT112	390.0	22.0	8.3	9.2	-0.9	21.2	75	25
Right side BRT121	198.0	198.0	6.3	7.2	-0.9	10.4	75	38
Front side BRT211	100.0	100.0	2.6	3.0	-0.3	4.2	20	38



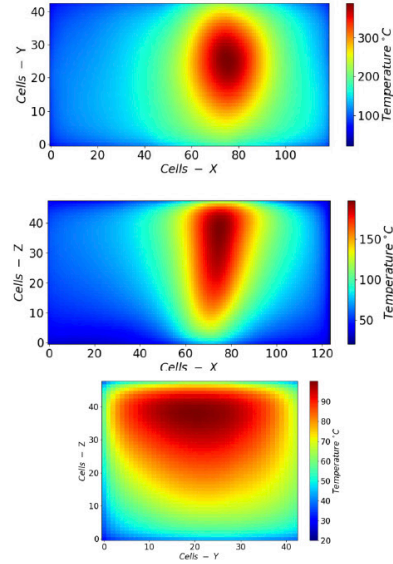
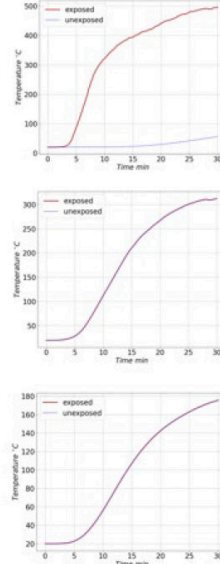
22

Exposure temperatures



DBI
FIRE AND SECURITY

Exposed surface temperatures

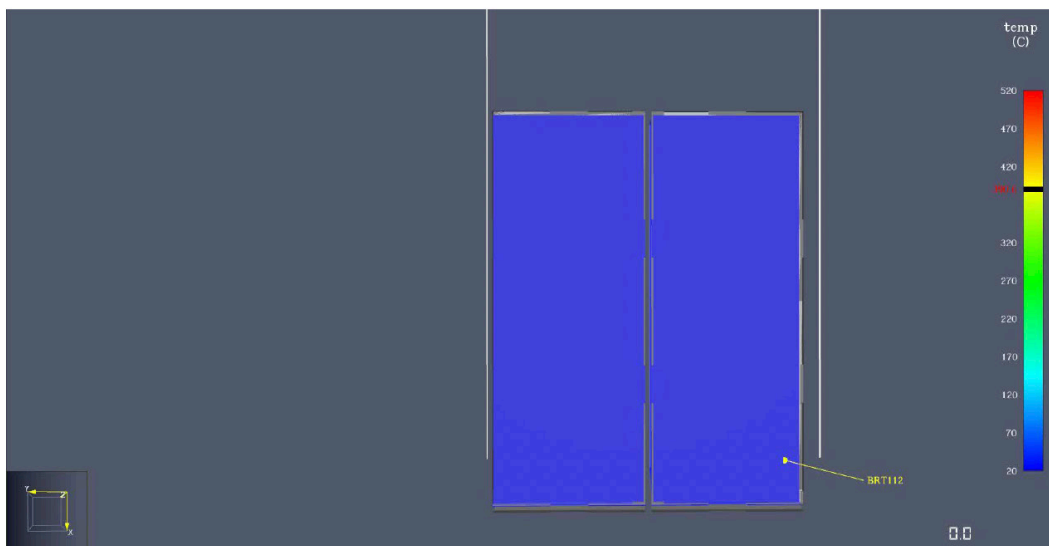


Top

Side

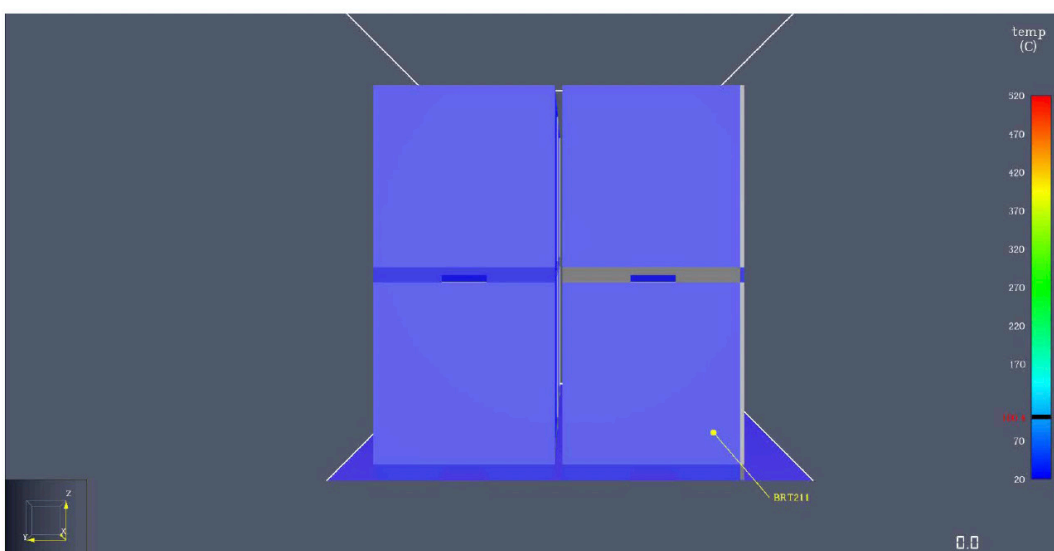
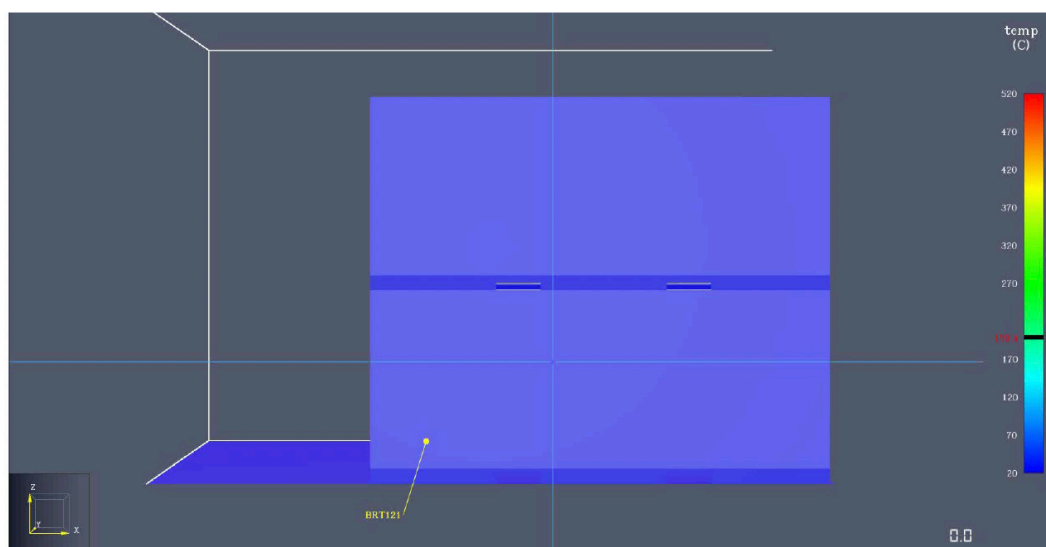
End

23 **DTU**



DBI
FIRE AND SECURITY

24 **DTU**



Conclusion

- The fire spread between the containers depends strongly on the material being transported and conditions of the containers.
- The plywood's thermal resistance leads to slow heat conduction through the flooring. Assuming no gas leakage through the floor (confirmed through fire tests)
- The temperature rise inside the container on top of the ignition container will not reach critical state before those at the sides

Sven Brunkhorst:

Abbildung von sichtbaren Holzoberflächen in Brandsimulationen - Modellierungsansätze und Validierungsberechnungen

Abstract:

Mit zunehmender Planung sichtbarer Massivholzoberflächen in Gebäuden ergibt sich bei Anwendung leistungsorientierter Nachweismethoden im Brandschutz zwangsläufig die Frage nach der Abbildung des Beitrags von sichtbaren Massivholzoberflächen zum Brandgeschehen. Besonders bei der Durchführung von Brandsimulationen ist die zusätzliche Wärmefreisetzungsrate aus den sichtbaren Massivholzoberflächen, auch als strukturelle Brandlasten bezeichnet, zwingend zu berücksichtigen.

Die hinreichende Abbildung der zusätzlichen Wärmefreisetzungsrate der strukturellen Brandlast aus Holz stellt derzeit noch eine Herausforderung dar. Dies begründet sich in der Modellierungsart bzw. Modellierungstiefe sowie der Bestimmung bzw. Auswahl erforderlicher Eingangsgrößen, wie Material und Verbrennungsparameter.

Der Beitrag befasst sich mit der Darstellung von Modellierungsansätzen zur numerischen Abbildung der zusätzlichen Wärmefreisetzung von Holz. Es wird grundlegend die Vorgehensweise und Systematik zur Erarbeitung der Ansätze sowie der Festlegung von benötigten Eingangsgrößen vorgestellt. Des Weiteren werden die Anwendbarkeit der Ansätze in mittel- und großskaligen Raumbrandversuchen sowie entsprechende Anwendungsgrenzen vorgestellt.



Abbildung von sichtbaren Holzoberflächen in Brandsimulationen

Modellierungsansätze und Validierungsberechnungen

Sven Brunkhorst | hhpberlin

09.11.2023

- 
- 1 Problemstellung
 - 2 Modellierungsansätze
 - 3 Validierung
 - 4 Anwendungsgrenzen
 - 5

Problemstellung

Abbildung von sichtbaren Holzoberflächen in Brandsimulationen

- Holzoberflächen stellen strukturelle Brandlast dar
- Beitrag der strukturellen Brandlast ist bei Simulation zu berücksichtigen
- Sichtbare Holzoberflächen begünstigen die Brandausbreitung
- Sichtbare Holzoberflächen beeinflussen die Brandraumdynamik (Temperaturen, Wärmefreisetzungsrate, Rauchproduktion, Ausbreitung von Feuer und Rauch etc.)



Copyright: Expressiv GmbH

1

Problemstellung

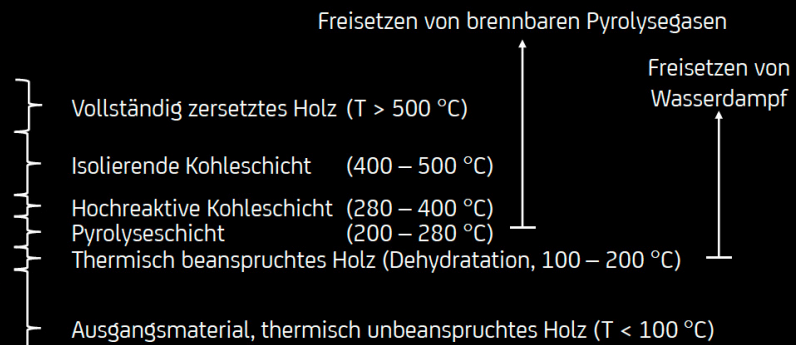
Abbrandverhalten von Holz

- Entzündung von Holz 270 °C – 300 °C
- Abbrand stellt hochkomplexen chemischen und physikalischen Zersetzungsprozess dar
- Nichtlineares Abbrandverhalten
 - Einwirkungsseite: thermische Einwirkung, Sauerstoffgehalt
 - Materialseite: Feuchtegehalt, thermische Materialkennwerte, Heizwert
- Kohleschicht hat positiven Einfluss auf Abbrandrate (thermischen Materialkennwerte)

1

Problemstellung

Abbrandverhalten von Holz



1

Modellierungsansätze

Modellierung über:

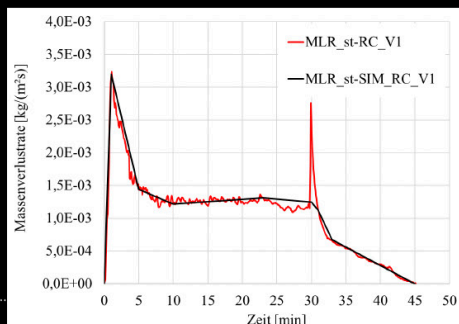
- 1) Vordefinierte flächenspezifische Massenfreisetzungsrates mit Entzündungstemperatur
- 2) Konstante Massenfreisetzungsrates mit Entzündungs- und Extinktionstemperatur
- 3) Eindimensionales Pyrolysemodell

2

Modellierungsansätze

1) Vordefinierte flächenspezifische Massenfreisetzungsrate mit Entzündungstemperatur

- Entzündungstemperatur = 300 °C
- Flächenspezifische Massenverlustrate (MLR) aus Versuch abgeleitet

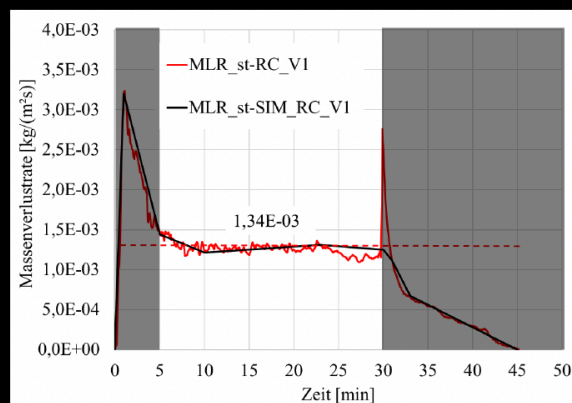


2

Modellierungsansätze

2) Konstante Massenfreisetzungsrate mit Entzündungs- und Extinktionstemperatur

- Entzündungstemperatur = 300 °C
- Extinktionstemperatur = 500 °C
- Konstante flächenspezifische Massenverlustrate (MLR) aus Versuch abgeleitet

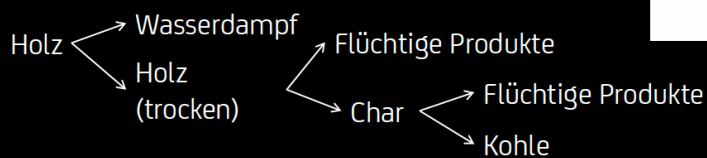
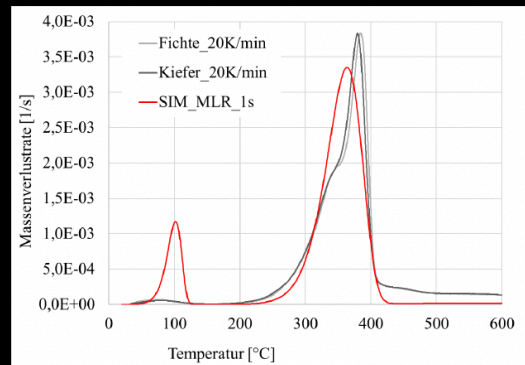


2

Modellierungsansätze

3) Eindimensionales Pyrolysemodell

- Arrhenius Gleichung
- Ableitung der kinetischen Reaktionsparameter aus Laborversuchen



2

Modellierungsansätze

3) Eindimensionales Pyrolysemodell

```

$SURF ID='CEILING'
  MATL_ID(1,1:2)='DRY_WOOD','MOISTURE',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1:2)=0.90,0.10,
  COLOR='BROWN',
  BACKING='EXPOSED',
  STRETCH_FACTOR=1.0,
  CELL_SIZE_FACTOR=0.5,
  THICKNESS=0.165/
  
```

```

$MATL ID='MOISTURE',
  EMISSIVITY=1.0,
  DENSITY=1000.0,
  CONDUCTIVITY=0.6,
  SPECIFIC_HEAT=4.184,
  N_REACTIONS=1,
  REFERENCE_TEMPERATURE=85.0,
  REFERENCE_RATE=0.0015,
  HEATING_RATE=5.0,
  NU_SPEC=1.0,
  SPEC_ID='WATER_VAPOR',
  HEAT_OF_REACTION=2000.0/
  
```

```

$MATL ID='DRY_WOOD',
  EMISSIVITY=0.9,
  DENSITY=420.0,
  CONDUCTIVITY=0.15,
  SPECIFIC_HEAT=2.12,
  N_REACTIONS=1,
  REFERENCE_TEMPERATURE=325.0,
  REFERENCE_RATE=0.001,
  HEATING_RATE=4.0,
  NU_SPEC(1:2,1)=0.26,0.52,
  SPEC_ID(1:2,1)='PYROLYZATE','CARBON_DIOXIDE',
  NU_MATL=0.22,
  MATL_ID='CHAR',
  HEAT_OF_REACTION=225.0/
  
```

Werte nach EC5-1-2:2020 fuer 120°C

2

Modellierungsansätze

3) Eindimensionales Pyrolysemodell

```

$MATL ID='CHAR',
      EMISSIVITY=0.90,
      DENSITY=112.0,
      CONDUCTIVITY=0.25,
      SPECIFIC_HEAT=1.40,
      N_REACTIONS=1,
      REFERENCE_TEMPERATURE=700.0,
      REFERENCE_RATE=0.00005,
      HEATING_RATE=5.0,
      NU_SPEC(1:2,1)=0.28,0.61,
      SPEC_ID(1:2,1)='PYROLYZATE','CARBON DIOXIDE',
      NU_MATL=0.11,
      MATL_ID='ASH',
      HEAT_OF_REACTION=15.0/      Werte nach EC5-1-2:2020 fuer 600°C

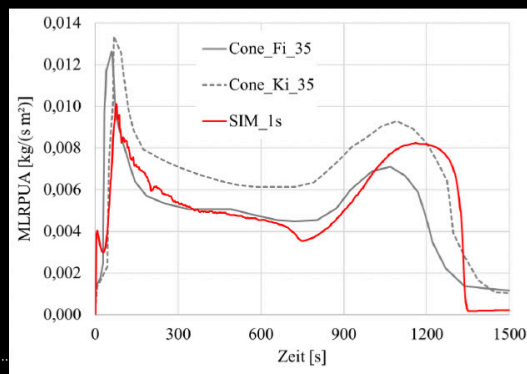
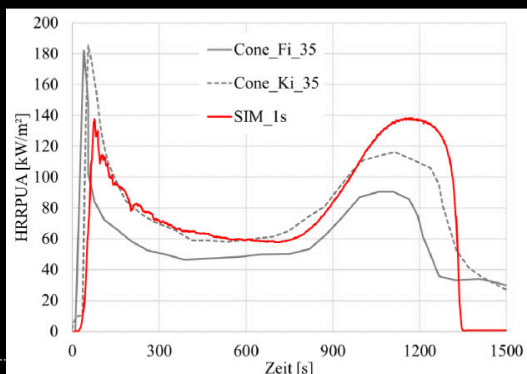
$MATL ID='ASH',
      EMISSIVITY=0.98,
      DENSITY=103.0,
      CONDUCTIVITY=0.35,
      SPECIFIC_HEAT=1.65/      Werte nach EC5-1-2:2020 fuer 800°C
  
```

2

Modellierungsansätze

Modellierung über eindimensionales Pyrolysemodell

- Endotherme bzw. exotherme Reaktionswärme an Laborversuchen kalibriert



2

Reaktionsgleichung

- Ansatz 1) und 2)

```
&SPEC ID='PYROLYZATE', FORMULA='CH1.700.74N0.002' /
&REAC ID='WOOD',
      FUEL='PYROLYZATE',
      C=1.0,
      H=1.7,
      O=0.74,
      N=0.002,
      HEAT_OF_COMBUSTION=15500.0,
      SOOT_YIELD=0.015,
      CO_YIELD=0.0042/
```

- Ansatz 3)

```
&SPEC ID='AIR',
      SPEC_ID(1)='OXYGEN', VOLUME_FRACTION(1)=1
      SPEC_ID(2)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(2)=3.76
      BACKGROUND=.TRUE. /
&REAC ID='TIMBER'
      FUEL='PYROLYZATE'
      SPEC_ID_NU='PYROLYZATE','AIR','PRODUCTS_1'
      NU=-1,-1.02063,1
      HEAT_OF_COMBUSTION=17280.0/
&SPEC ID='PRODUCTS_1',
      SPEC_ID(1)='CARBON DIOXIDE', VOLUME_FRACTION(1)=0.964679
      SPEC_ID(2)='CARBON MONOXIDE', VOLUME_FRACTION(2)=0.003655
      SPEC_ID(3)='WATER VAPOR', VOLUME_FRACTION(3)=0.848241
      SPEC_ID(4)='SOOT', VOLUME_FRACTION(4)=0.035184
      SPEC_ID(5)='NITROGEN', VOLUME_FRACTION(5)=3.838558 /
```

2

Validierung

Raumbrandversuche – Épernon Fire Test Programme

4 Raumbrandversuche

- Grundfläche = 24 m²
- Öffnungsfaktor = 0,144 m^{0,5} & 0,050 m^{0,5}
- Mobile Brandlastdichte = 890 MJ/m²
- Strukturelle Brandlast = Decke, 24 m²
($\beta_{st} = 32\%$)

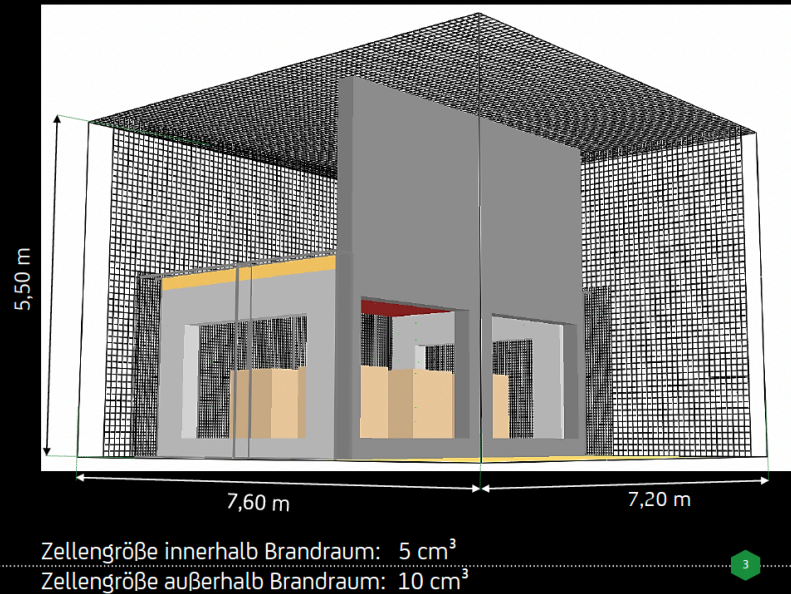
$$\beta_{st} = \frac{A_{st}}{(A_t - A_f - A_w)} = \frac{A_{st}}{A_T}$$



Validierung

Modellierung

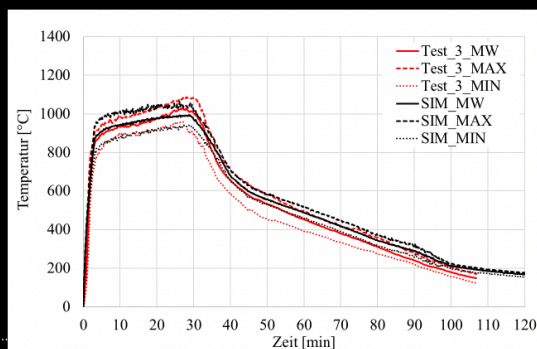
- Mobile Brandlast vordefiniert über flächenspez. MLR
- Ermittelt aus Kalibrierversuch



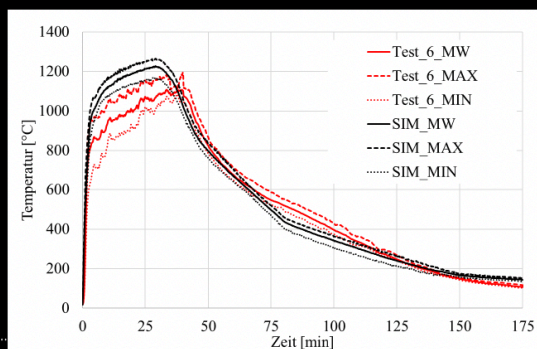
Kalibrierung an Referenzversuchen

Test 3 und Test 6 ohne strukturelle Brandlast

Gemittelte Raumtemperaturen 100 mm unterhalb der Decke



brandlastgesteuert

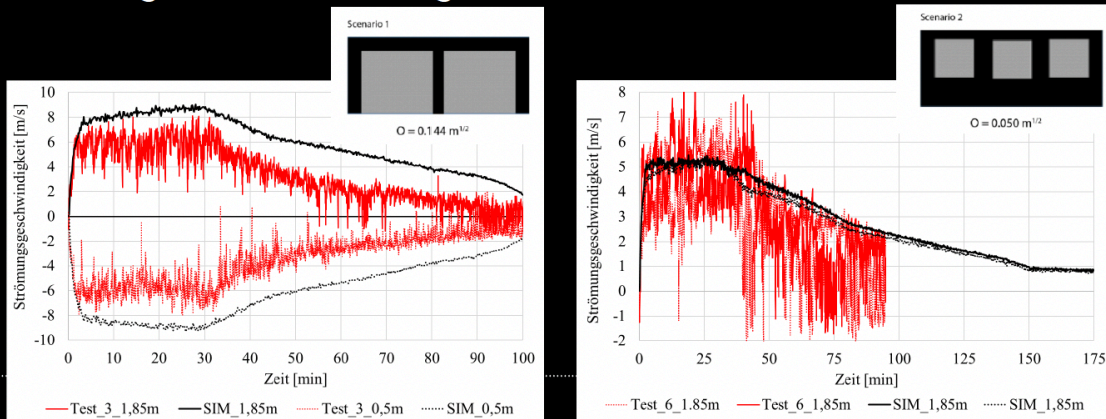


ventilationsgesteuert

Kalibrierung an Referenzversuchen

Test 3 und Test 6 ohne strukturelle Brandlast

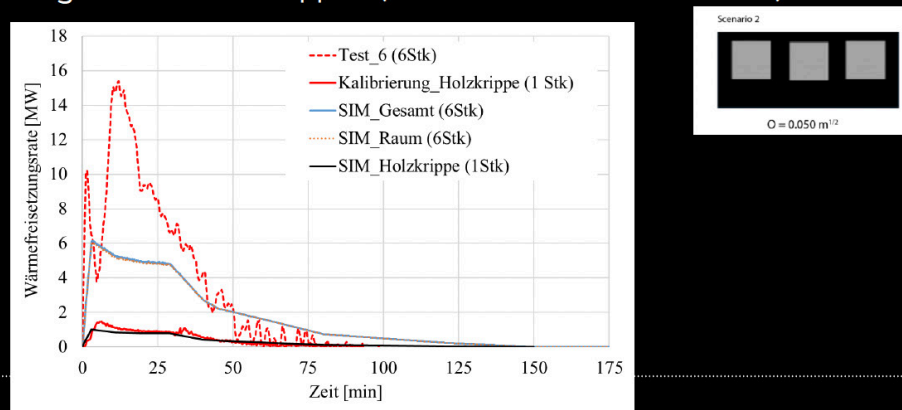
Strömungsraten in der Öffnung



Kalibrierung an Referenzversuchen

Test 6 ohne strukturelle Brandlast

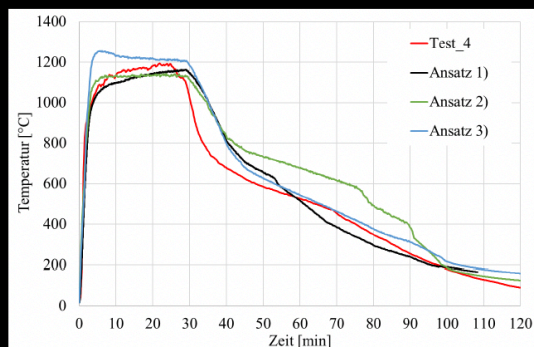
Wärmefreisetzungsrate der Holzkrippen (Versuch über Massenverlust)



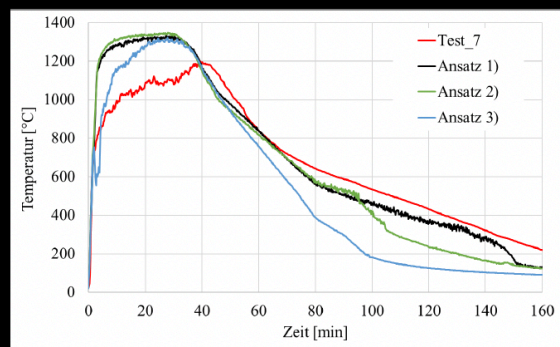
Validierung der Ansätze

Test 4 und Test 7 mit strukturelle Brandlast (Decke)

Gemittelte Raumtemperaturen 100 mm unterhalb der Decke



brandlastgesteuert



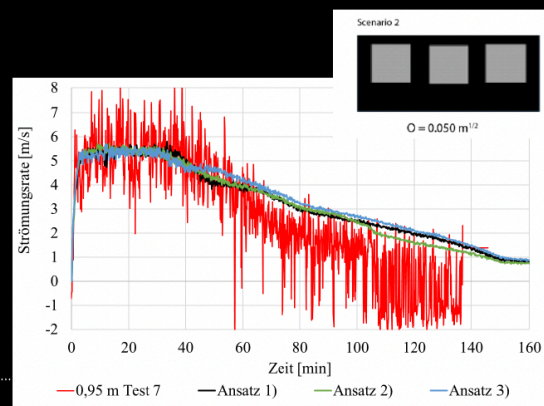
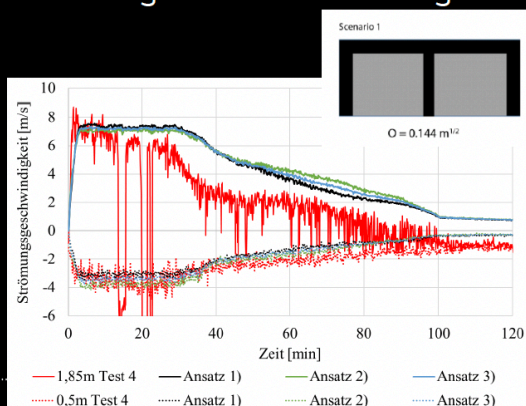
ventilationsgesteuert

3

Validierung der Ansätze

Test 4 und Test 7 mit strukturelle Brandlast (Decke)

Strömungsraten in der Öffnung

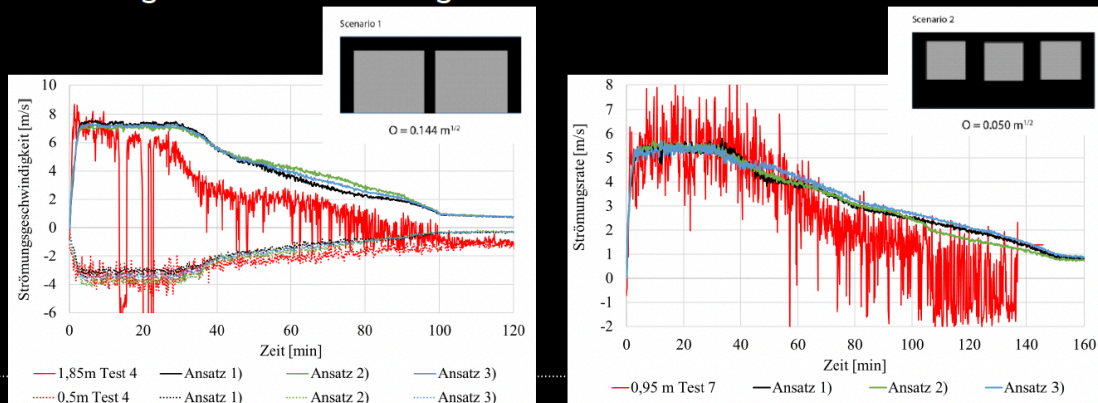


3

Validierung der Ansätze

Test 4 und Test 7 mit strukturelle Brandlast (Decke)

Strömungsraten in der Öffnung



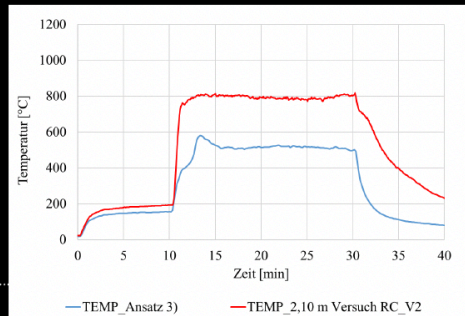
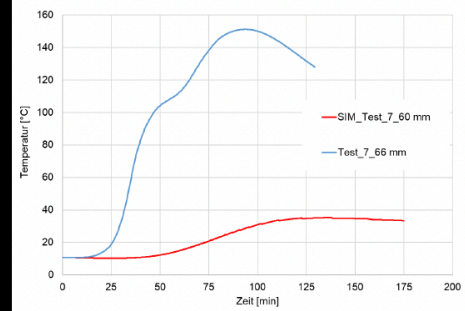
Anwendungsgrenzen

Allgemeines

- Ansatz 1) ist nicht geeignet für Brandprognosen, da die flächenspezifische MLR im Vorfeld definieren
- Ansatz 2) kann das Selbstverlöschen der strukturelle Brandlast abbilden
- Ansatz 3) ist aufwendig in Modellierung und Rechendauer (Cell Size Faktor, Diskretisierung)

Anwendungsgrenzen

- Abbildung der Abbrandtiefe bzw. Temperaturverteilung im Querschnitt
- Abbildung der Wärmefreisetzungsrate
- Größere Abweichung bei ventilations-gesteuerten Brandregimen
- Andere Holzarten als Fichte



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Als umfassende Kontakt- und Kooperationsplattform für alle deutschsprachigen Anwender des Fire Dynamics Simulators bietet die FDS Usergroup die Möglichkeit zum intensiven Austausch von Informationen, Anregungen und Hilfestellungen rund um das Programm FDS.

Bei FDS handelt es sich um ein Computational Fluid Dynamics (CFD) Modell zur Simulation brandinduzierter Strömungen mit niedriger Geschwindigkeit, wobei das Hauptaugenmerk auf der Vorhersage der entstehenden Rauch- und Wärmeausbreitung liegt. Die erzielten Simulationsergebnisse können mit Hilfe des zugehörigen Grafikprogramms Smokeview in unterschiedlichen zwei- sowie dreidimensionalen Ansichten visualisiert werden.

Die Entwicklung von FDS, dessen Anfänge bereits in das Jahr 2000 zurückreichen, wird im Rahmen einer internationalen Kooperation durch das National Institute of Standards and Technology (NIST) und das VTT Technical Research Centre of Finland kontinuierlich vorangetrieben. Als maßgebliche Hauptentwickler sind Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, Randall McDermott, Marcos Vanella sowie Glenn Forney zu nennen. Hinzu kommt eine stetig wachsende Zahl von Kollaborateuren weltweit.

Interessierte FDS-Nutzer können sich unverbindlich und kostenlos in der FDS Usergroup registrieren und von der Zusammenarbeit mit anderen Mitgliedern profitieren. Auf jährlich organisierten Anwendertreffen können persönliche Netzwerke gestärkt und Erfahrungen untereinander ausgetauscht werden. Die dort präsentierten Beiträge werden in Form eines referenzierbaren Jahresbandes zusammengefasst.



ISSN 2191-463X
17. Tagungsband
FDS Usergroup
Jahrgang 2023

hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz GmbH
Otto Ostrowski Str. 5, 10249 Berlin
servicedesk@hhpberlin.de