

Von der Forschung zur Praxis

Ein Leitfaden für die Erarbeitung von Bemessungsbränden für Schienenfahrzeuge

Brandschutztag Schienenfahrzeuge
im CHEMPARK Leverkusen
am 10. April 2025

Manuel Osburg

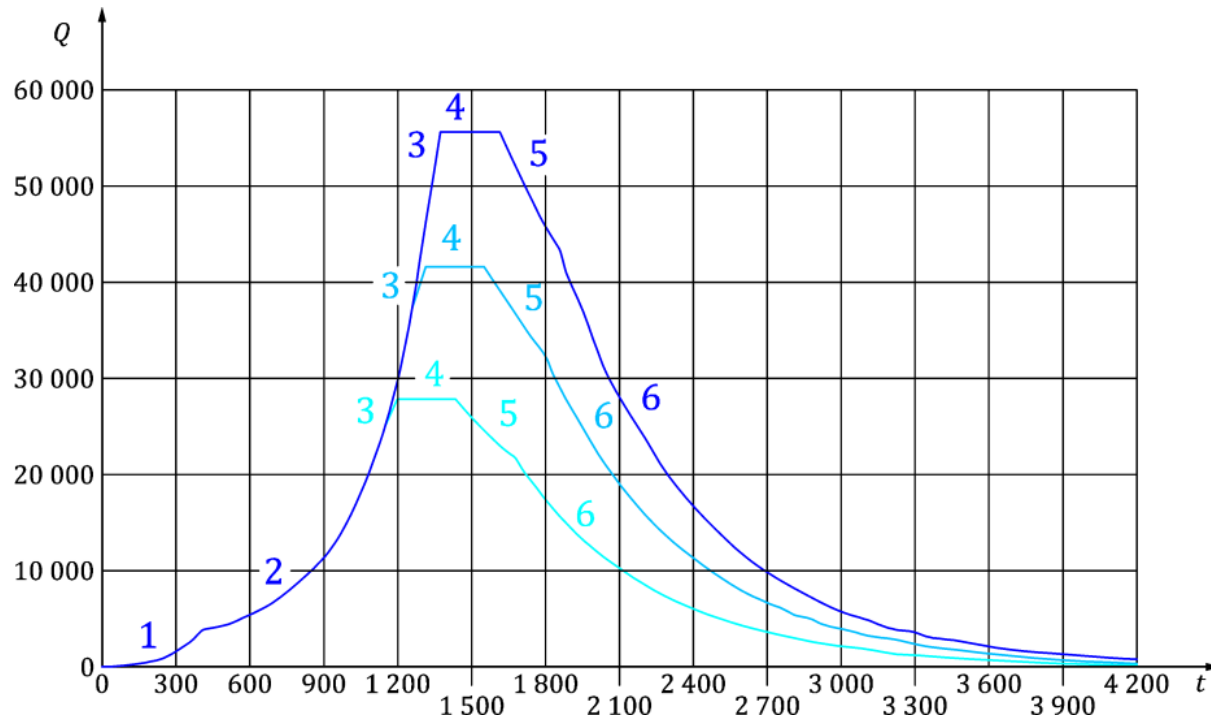
Fahrzeugbezogener Brandschutz

- Brandschutzanforderungen für Schienenfahrzeuge ergeben sich u. a. aus dem Normenwerk EN 45545.
- Maßnahmen und Anforderungen haben zum Ziel, Fahrgäste in Schienenfahrzeugen im Falle eines Brandes an Bord zu schützen.
- EN 45545-2 legt Prüfverfahren, Prüfbedingungen und Anforderungen an Werkstoffe und Komponenten für Schienenfahrzeuge fest.
- Erfordernis eines Bemessungsbrandes ergibt sich auch aus DIN 5643 „Anforderungen an (städtische) Fahrzeuge“.

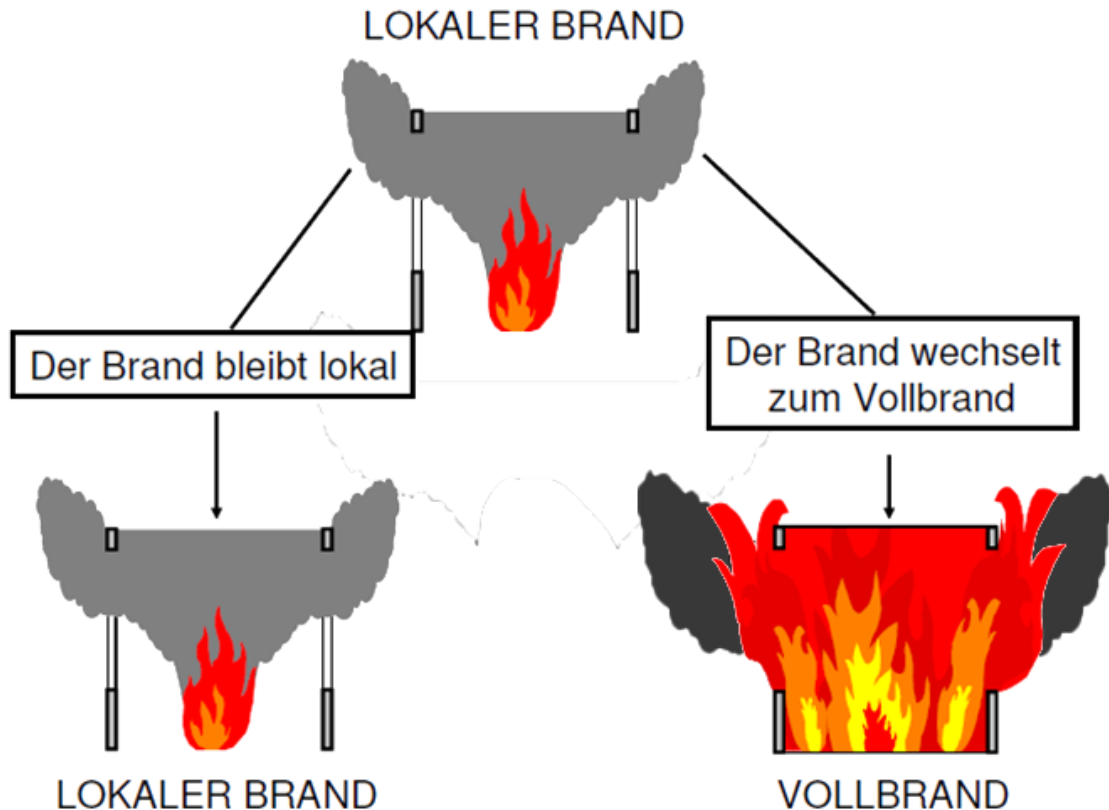
Infrastrukturbezogener Brandschutz

- Brandschutzanforderungen für Bauwerke ergeben sich u. a. aus den EBA-Regelwerken, der TRStrab BS und der DIN 5647.
- Bauwerke müssen so geplant, gebaut und betrieben werden, dass ... im Brandfall die Möglichkeit zur Selbst- und Fremdrettung von Personen sowie zur Brandbekämpfung besteht.
- Zur Nachweisführung kommen u. a. Brandsimulationen unter Zugrundelegung eines Fahrzeug-Bemessungsbrandes zum Einsatz.
- Anforderungen an die Methodik zur Erarbeitung von Fahrzeug-Bemessungsbränden ergeben sich aus der TRStrab BS und der DIN 5647.

Standardisierte Bemessungsbrände (engl. *Design Fire*)



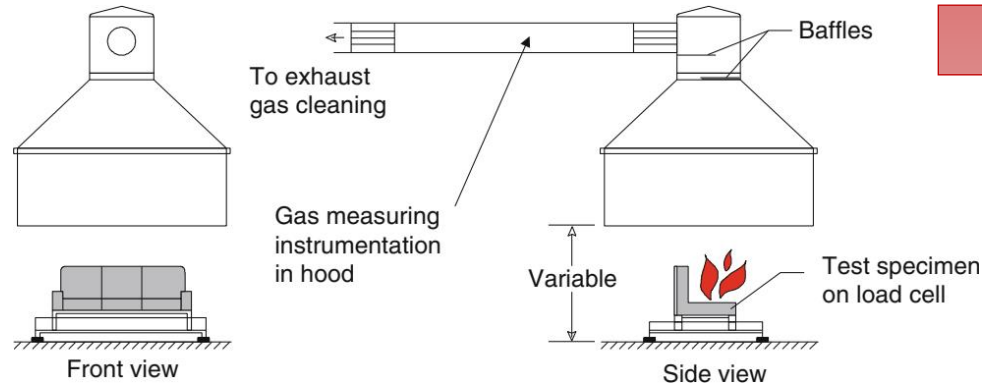
- Vorgegebener und idealisierter Brandverlauf
- Brandausbreitung ist ausschließlich zeitabhängig
- Keine Prognose der Brandausbreitung
- Keine Individualität, dafür konservativ



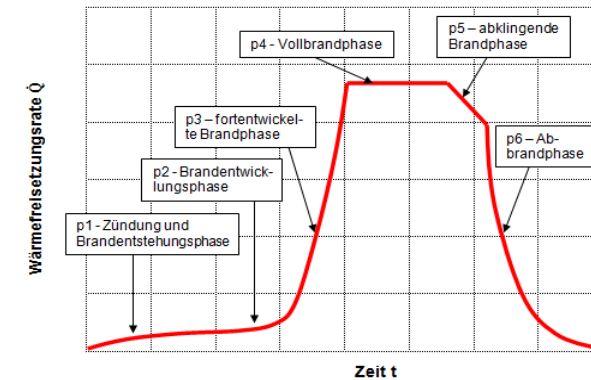
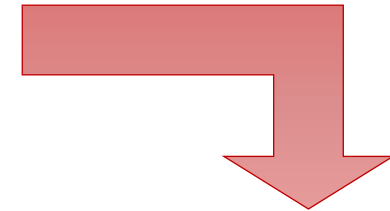
- Anwendungsbereite individuelle Bemessungsbrände gehen aus einer **Brandausbreitungsprognose** hervor
- Dynamische Berechnung der Brandausbreitung
- Berücksichtigung multipler Umgebungseinflüsse
- Wechselwirkung mit der brandbeeinflussten Umgebung

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:

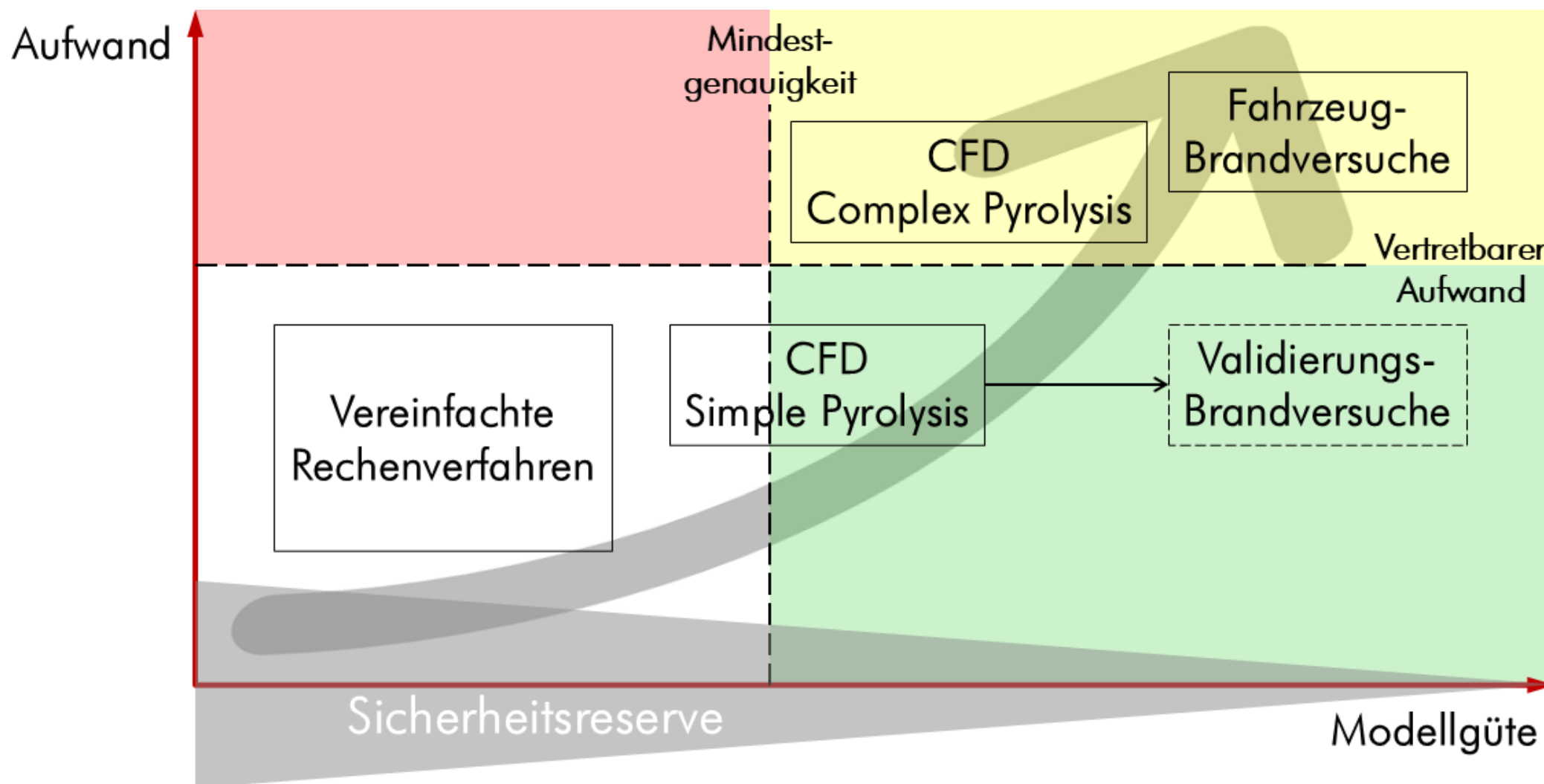
(1) Fahrzeug-Brandversuche,

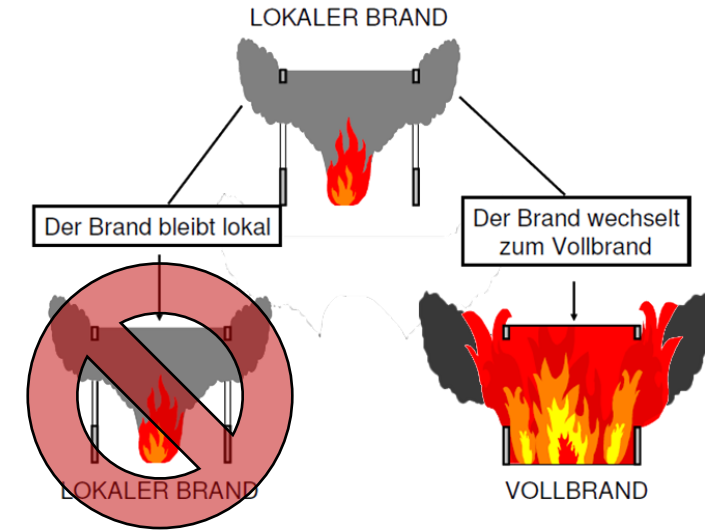
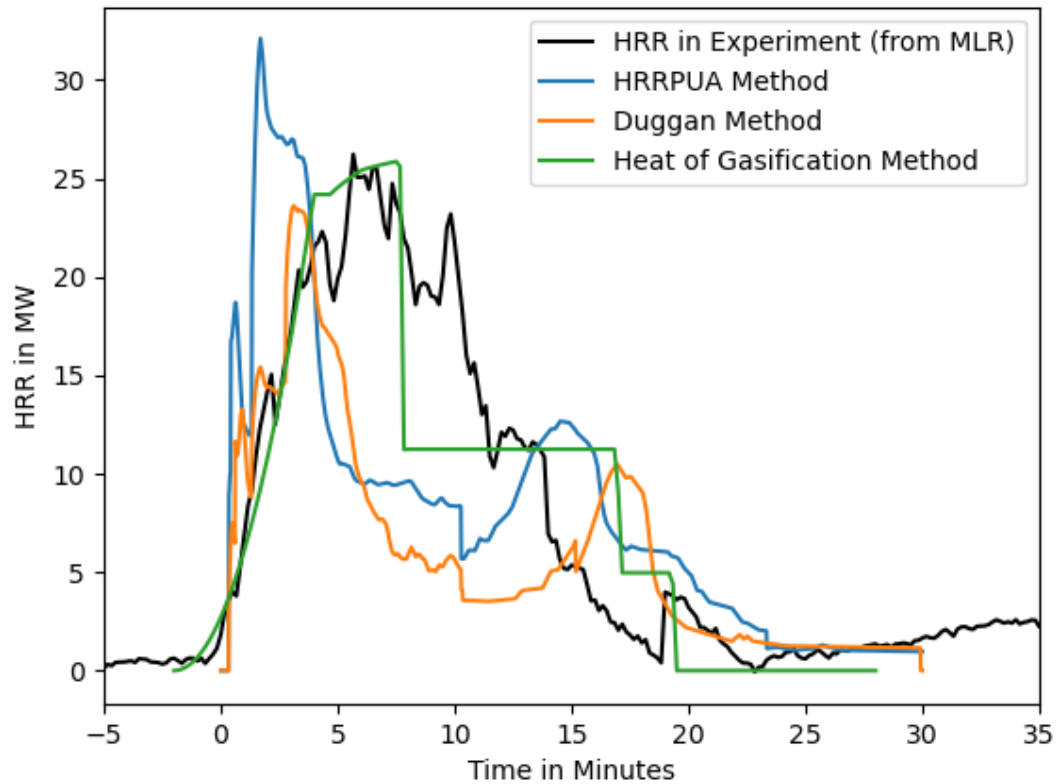


- (2) Brandsimulationen auf der Grundlage von Materialprüfungen oder
- (3) Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung von Materialdaten.



Ermittlung individueller Bemessungsbrände

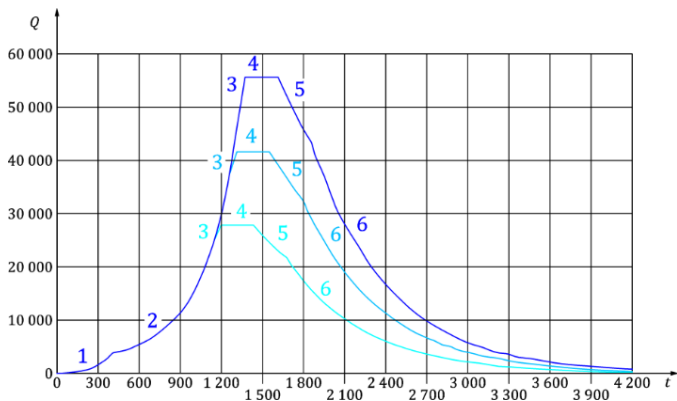




- Unterstellung eines Vollbrandes
- Annahme eines Flashover-Zeitpunktes
- Meist konservativ
- Grundlage: Cone Calorimeter Prüfungen

Bemessungsbrand

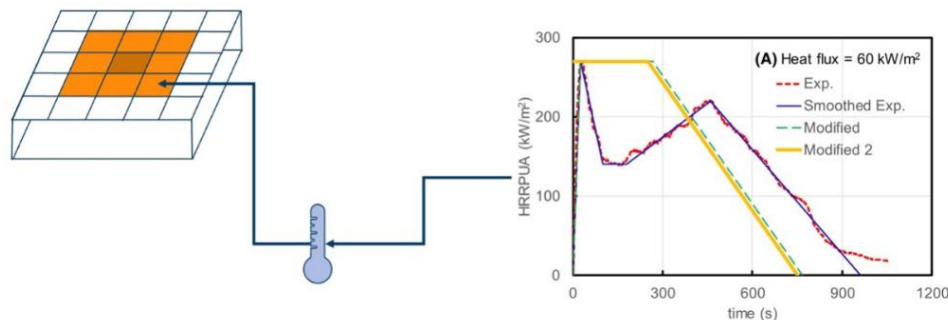
- Vollständig vorgegebener Verlauf
- Brandausbreitung ist ausschließlich zeitabhängig
- Keine Individualität
- Keine Prognose der Brandausbreitung
- Ermittelte Brandwirkungen werden oft überschätzt



10.04.2025

Simple Pyrolysis

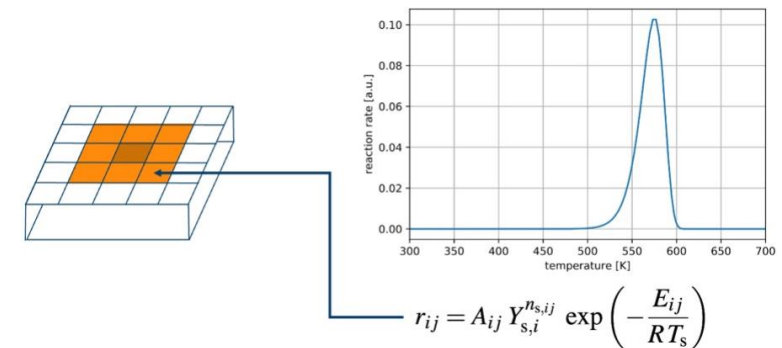
- Brandausbreitung basiert auf der Zündtemperatur der brennbaren Oberflächen
- HRR-Kurve aus Cone Calorimeter
- Nach Entzündung keine Rückkopplung mit der Umgebung
- *Advanced Predescribed Fire*
- Neuer Ansatz: *Scaling Pyrolysis*



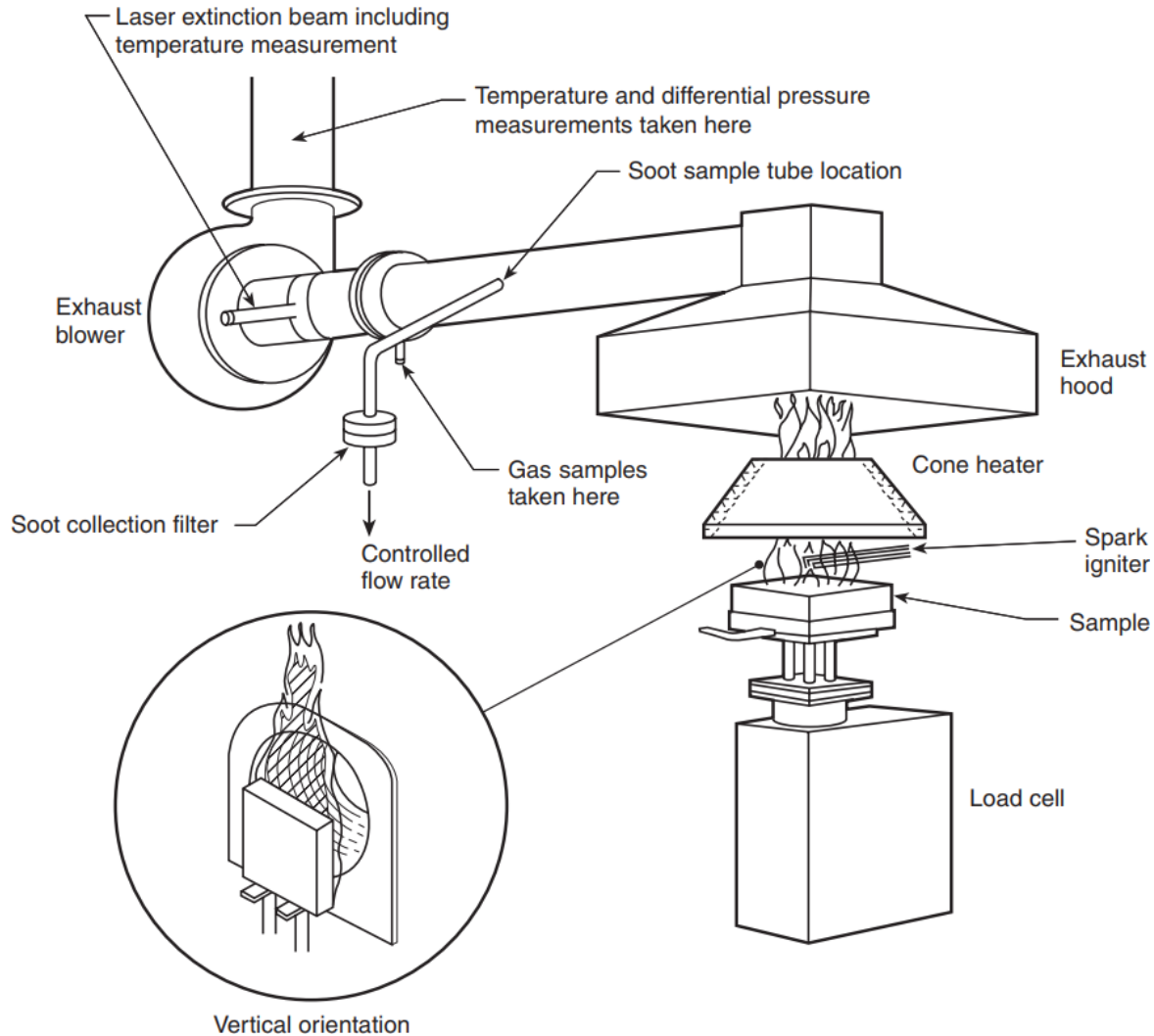
www.bcl-leipzig.de | Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig

Complex Pyrolysis

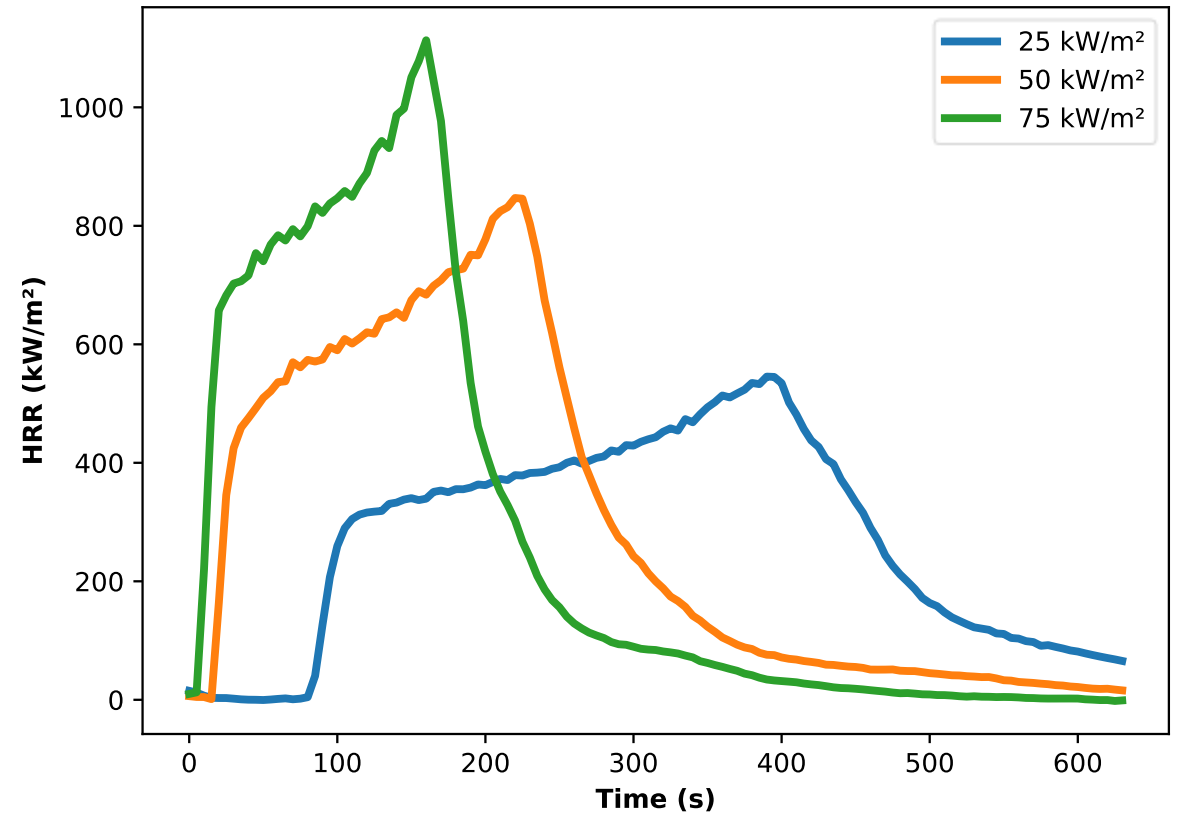
- Reaktionskinetisches Modell basierend auf der Arrhenius-Gleichung
- Kontinuierliche Wechselwirkung mit der Umgebung
- Skalenübergreifende Materialanalysen
- Komplexe Modellierung schränkt praktische Anwendung derzeit ein



Simple Pyrolysis




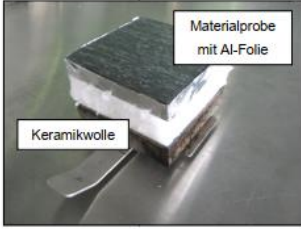
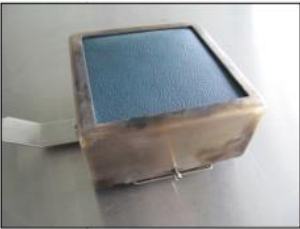
Cone Calorimeter Tests for PMMA

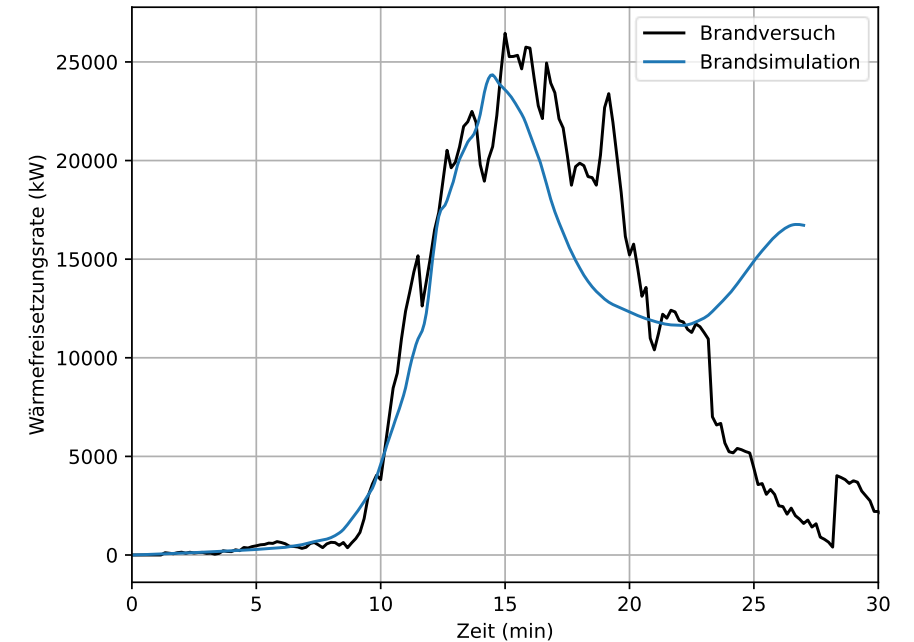
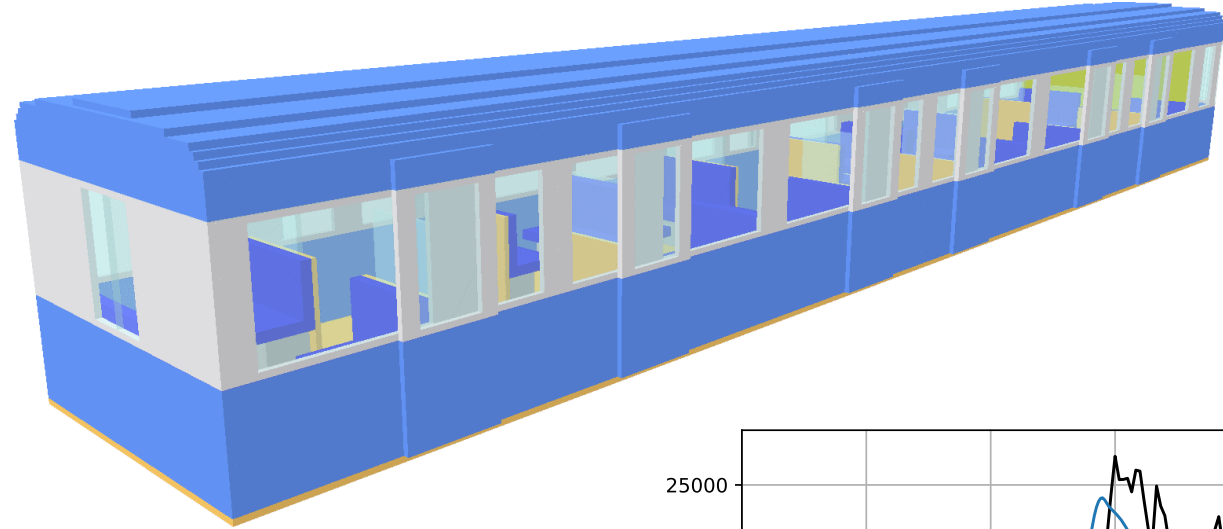


Messbare Größen: $\dot{q}(t), \rho, d, t_{ign}$

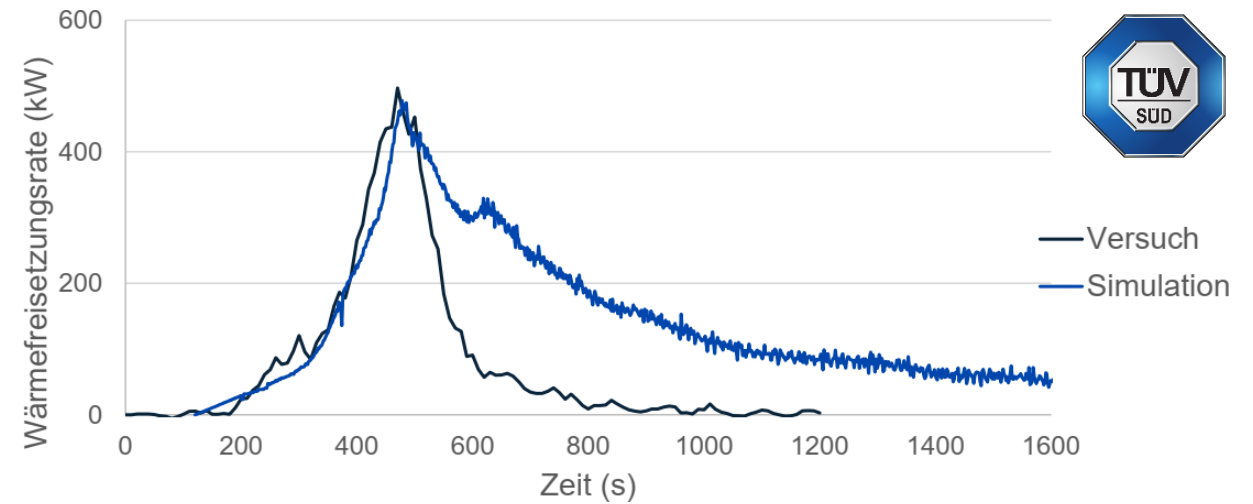
Inverse Modellierung: $T_{ign}, k, c_p, (\Delta h_v)$

Simple Pyrolysis

Innenverkleidung		
<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz einer Calciumsilikatplatte als Unterlage für die Probe - Einsatz von zwei Schichten Keramikwolle zur Ausfüllung des Probehalters 		
Fußboden		
<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von zwei Schichten Keramikwolle zur Ausfüllung des Probehalters 		
Sitze		
<ul style="list-style-type: none"> - <u>Reduzierung</u> der Dicke des Probekörpers auf 50 mm - Einsatz von Keramikwolle ist nicht erforderlich 		



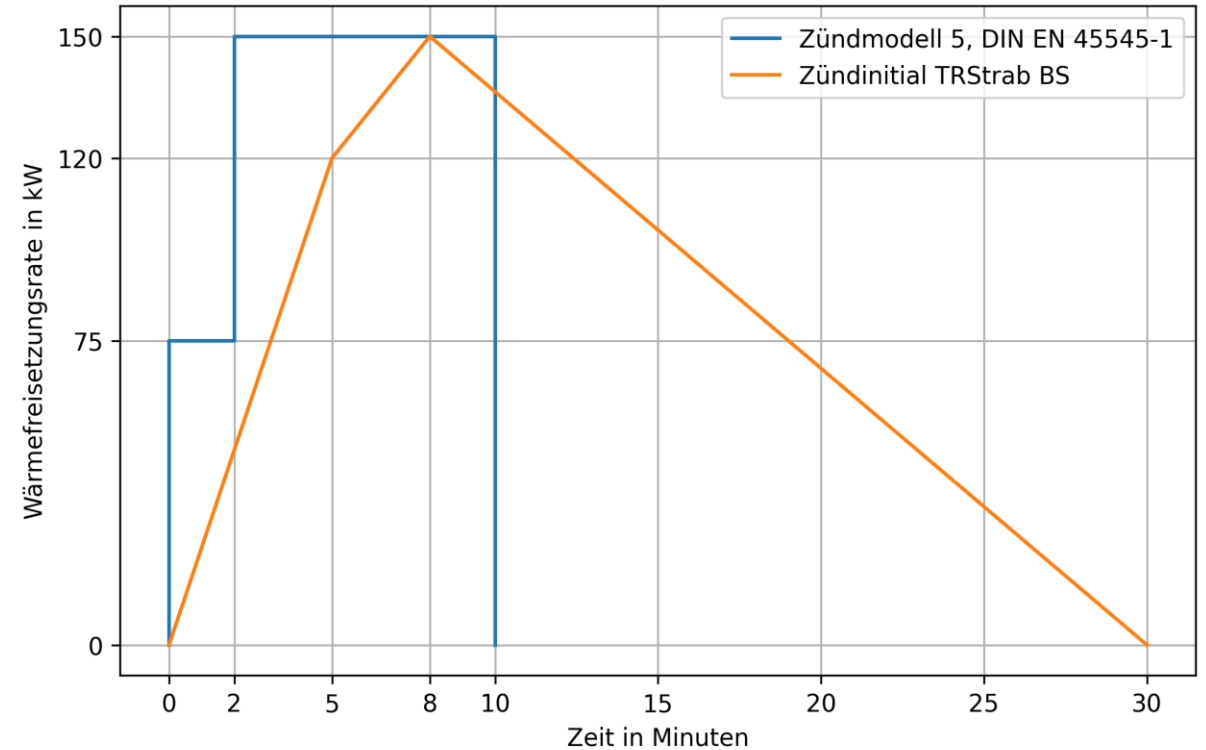
Simple Pyrolysis



DIN 5647:2023-10 – Abschnitt 6.3.3.3.2

Als Zündinitial für den Bemessungsbrand muss einer der folgenden Verläufe der Wärmefreisetzungsrate ausgewählt werden:

- 75 kW für die Dauer von 2 min, unmittelbar gefolgt von 150 kW für eine Dauer von 8 min (Zündmodell 5 aus DIN EN 45545-1:2013-08);
- linear ansteigend bis 120 kW nach 5 min und weitergehend bis maximal 150 kW nach 8 min. Ab der 8. Minute fällt der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate linear bis zur 30. Minute ab und erreicht den Wert 0 kW.



Für die Anwendung des Zündinitials bei Brandversuchen bietet sich die Verwendung des Zündmodells 5 an.

DIN 5647:2023-10 – Abschnitt 6.3.3.3.2

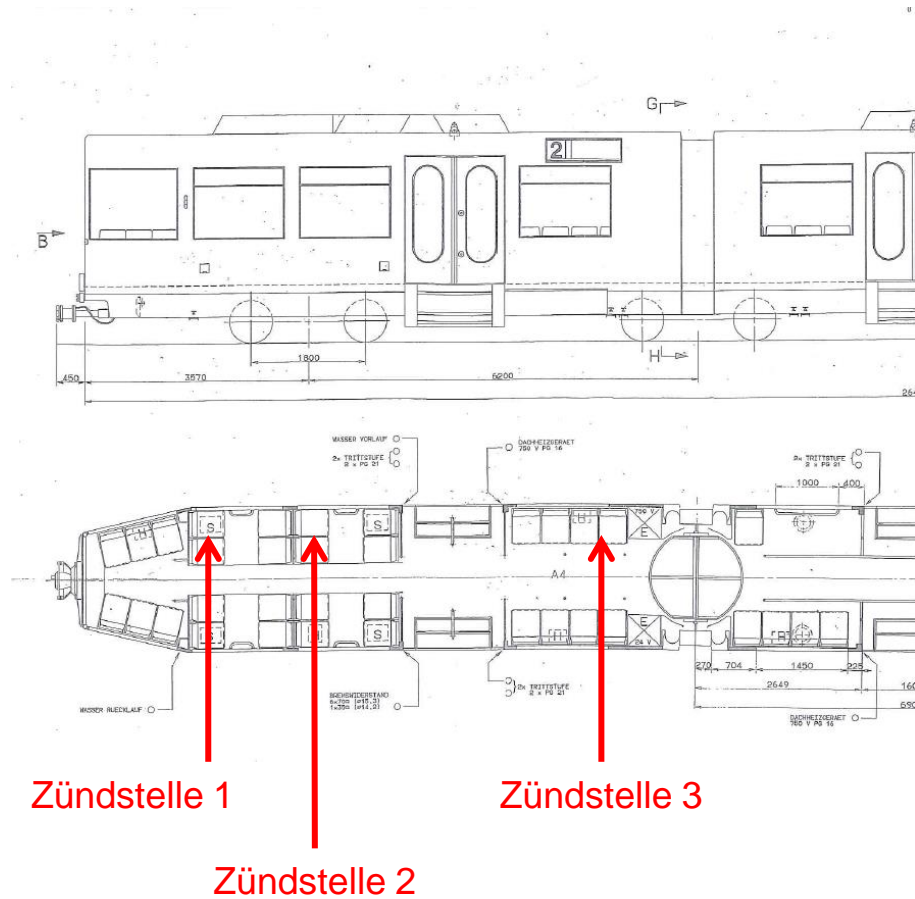
Dabei muss die ungünstigste Stelle im Fahrzeug gewählt werden.

Positionierung des Zündinitials in Innenecken

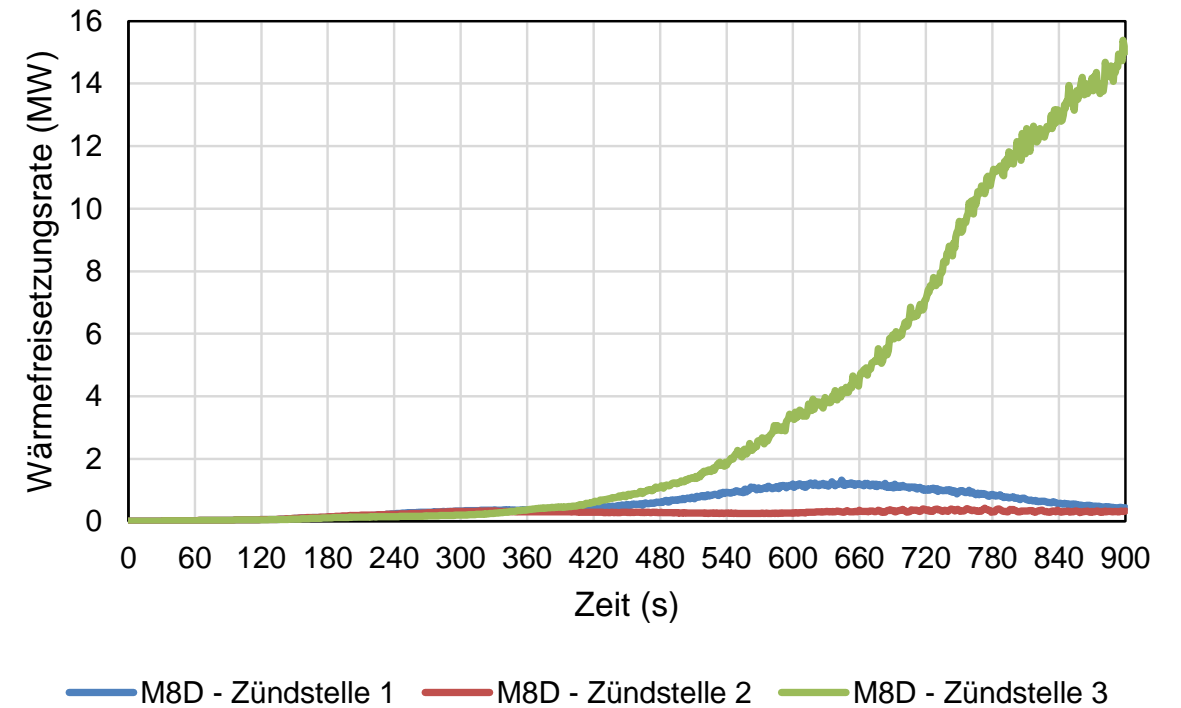
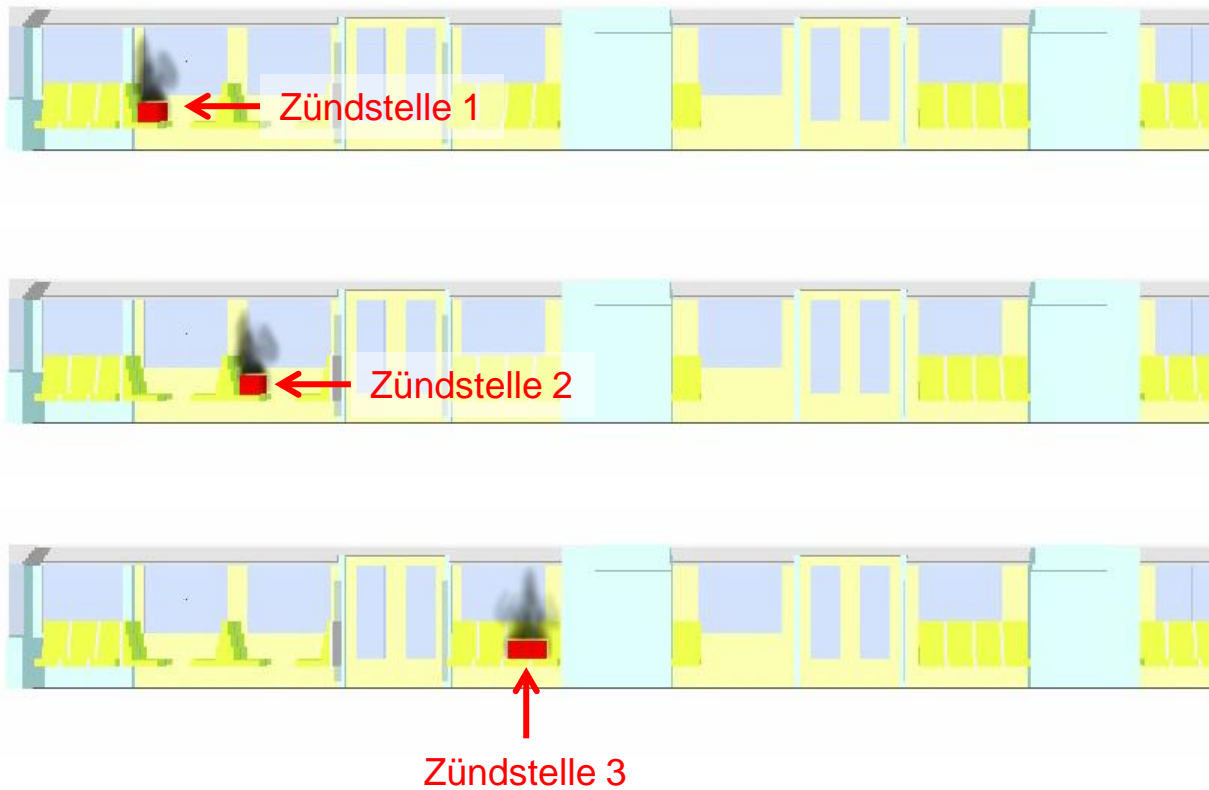
- hoher Anteil exponierter brennbarer Flächen
- größere Flammenlänge und höhere Wärmeeinwirkung
- intensivere Beanspruchung von Bauteilen im Deckenbereich
- Wärmeakkumulation / -rückkopplung aufgrund Innenecksituation



Zugrundelegung von drei bemessungsrelevanten Zündstellen



Zündszenarien und Zündinitial



DIN 5647:2023-10 – Abschnitt 6.3.3.3.2

Führt dieses Zündinitial nicht zur selbstständig fortschreitenden Brandentwicklung im Fahrzeug, sind Einzelfallbetrachtungen zur Bestimmung des Bemessungsbrandes erforderlich, die auch mit den zuständigen Stellen abgestimmt werden müssen.

Bei diesen Einzelfallbetrachtungen sollten, alternativ zum Zündinitial im Fahrzeug, auch andere Szenarien wie z. B. ein Ersatzbrand auf der Bahnsteigebene untersucht werden. Dies gilt auch, wenn die Brandentwicklung im Fahrzeug durch eine Brandbekämpfungsanlage behindert wird.

ANMERKUNG *Die Auslegung des Fahrzeuges basiert auf einem ausgewählten Zündinitial. Eine Erhöhung der Wärmefreisetzungsrate ist, falls es zu keiner selbstständig fortschreitenden Brandentwicklung kommt, nicht erforderlich.*

- Zündinitial hat maßgebenden Einfluss auf die Brandentwicklung und das Schadensausmaß
- *Ungünstigste Stelle im Fahrzeug* in der Regel in fahrgastzugänglichen Bereichen (höheres Risiko, v. a. durch Vandalismus)
 - Unter Sitzflächen, in Anlehnbereichen
 - Innenecken → höhere Brandeinwirkungen
 - Kamineffekt zwischen Bauteilen
- Anzahl der zu untersuchenden Zündpositionen abhängig von:
 - Brennbarkeit der Materialien
 - Geometrische Komplexität des Fahrzeugs
 - Anzahl verschiedener Materialien
- Untersuchung mehrerer Positionen erforderlich, typischerweise ≥ 3 Zündpositionen

- Ventilationsbedingungen beeinflussen die Brandausbreitung
- Zu Brandbeginn sind Fenster und Türen geschlossen, nach 4 Min. Türöffnung
- HLK-Anlage wird innerhalb von 1 Min. automatisch oder manuell abgeschaltet
- Brandbedingter Fensterbruch hängt von Temperatur ab (300–600 °C)
- Fensterversagen beeinflusst den Brandverlauf:
 - Wärmestau fördert Brandausbreitung,
 - in der Vollbrandphase führt Sauerstoffzufuhr zu höher Wärmefreisetzungsrate
- Foliierte Fenster: Folie trägt zusätzlich zur Brandentwicklung bei
- Versagenskriterien sind i. d. R. ebenfalls im Rahmen einer Parameterstudie zu ermitteln

Individuelle Bemessungsbrände (Kapitel 5.3.1 TRStrab BS / Kapitel 6.3.3.3.2 DIN 5647)

Szenarien

Definition der Szenarien und Zündinitiale nicht abschließend

Modellierung

Ansätze, Methoden, Modelle sehr unterschiedlich

Materialprüfungen

Keine Vorgaben

Dokumentation

Keine Vorgaben

Qualitätssicherung

Keine Vorgaben

Hoher Aufwand, großer Ermessensspielraum, nicht ausreichend nachvollziehbare Dokumentation, große Bandbreite in der Qualität Ergebnissen



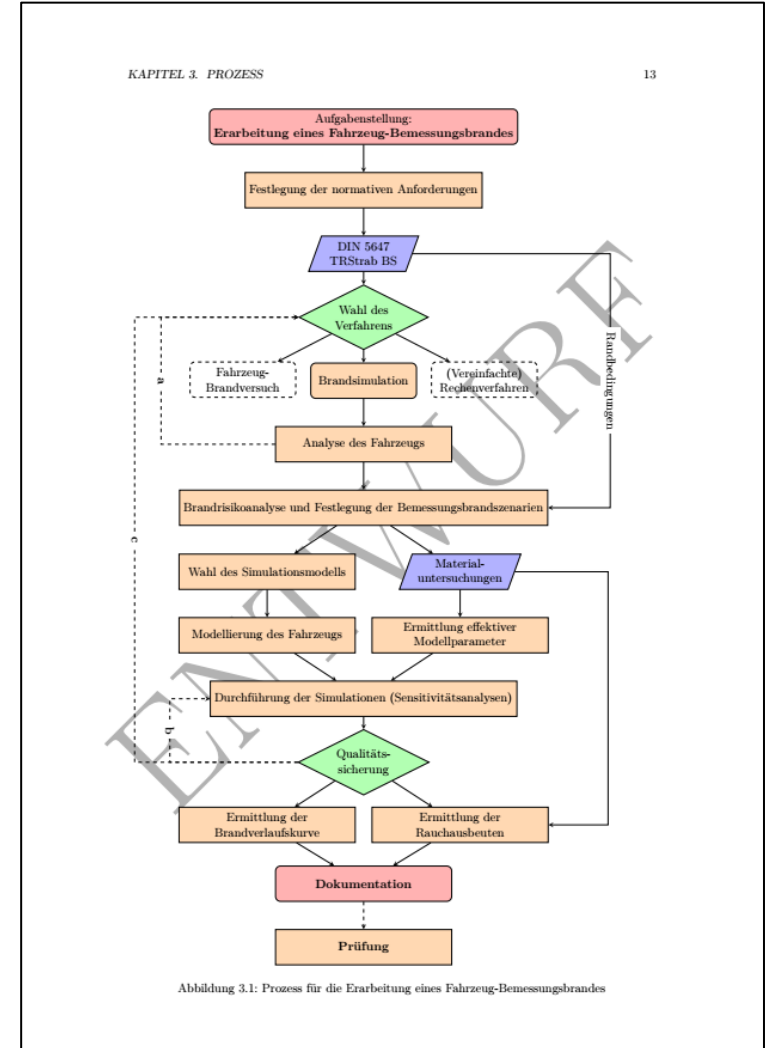
Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen mittels KI-basierter Daten

Leitfaden zur Erarbeitung individueller Bemessungsbrände für städtische Schienenbahnen (Urban Rail)

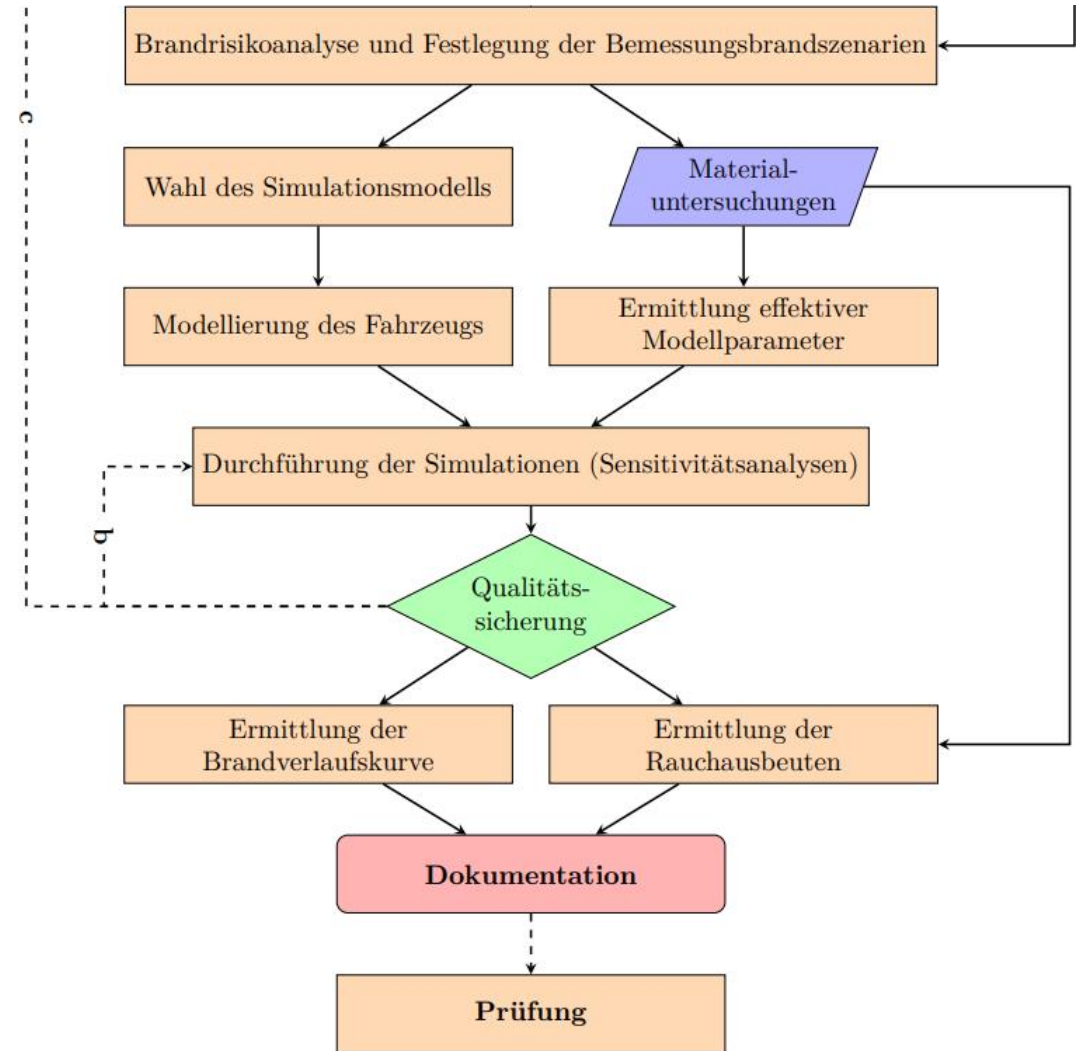
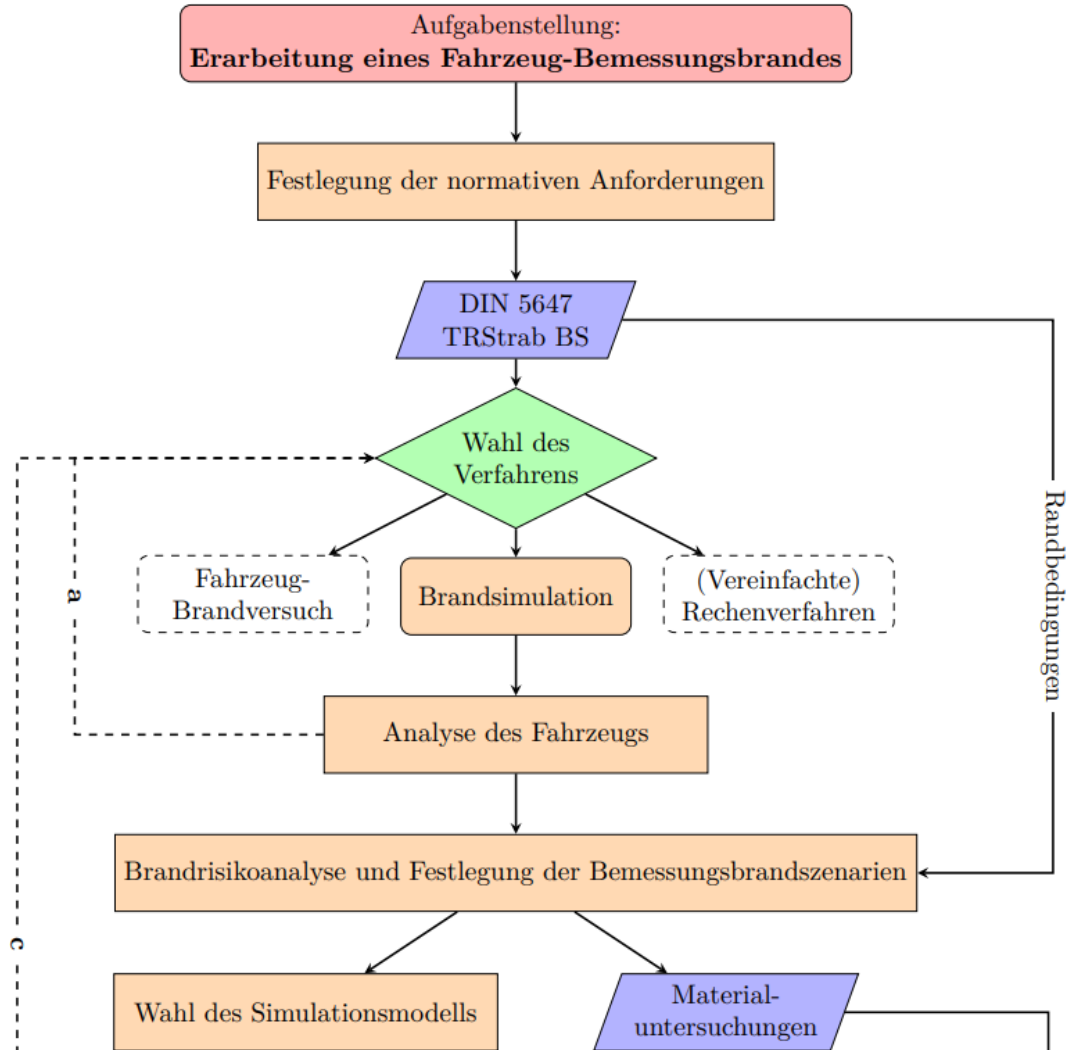
Version	Datum	Verantwortlich	Ausgabe, Art der Änderung
0.1	Februar 2025	BESKID-Konsortium	Entwurf

Inhaltsverzeichnis

1 Anwendungsbereich	7
2 Methodische Grundsätze	9
2.1 Normative Anforderungen	9
2.2 Modelle zur Prognose der Brandausbreitung	9
2.3 Anforderungen an Brandsimulationsmodelle	11
2.4 Einschränkungen von Brandsimulationsmodellen	11
3 Prozess	12
4 Brandsimulationen: Prognose der Brandausbreitung	14
4.1 Vorbereitung der Brandsimulationen	14
4.1.1 Szenario	14
4.1.2 Einflussgrößen auf die Brandentwicklung	14
4.1.3 Zündinitialia	15
4.1.4 Ventilationsbedingungen	16
4.2 Durchführung der Brandsimulationen	17
4.2.1 Ermittlung der modellrelevanten Brandparameter	17
4.2.2 Ermittlung der Rauchausbeuten	18
4.2.3 Modellgeometrie	19
4.3 Auswertung der Brandsimulationen	20
4.3.1 Ermittlung der Brandverlaufscurve	20
5 Qualitätssicherung	21
5.1 Grundsätzliches	21
5.2 Qualifikation des Personals	21
5.3 Plausibilitätsprüfung	21
5.4 Verifizierung und Validierung	22
5.5 Ergänzende Brandversuche im Realmaßstab	23
5.6 Schlussfolgerung	24
6 Dokumentation	25



Leitfaden zur Erarbeitung von Bemessungsbränden



Leitfaden zur Erarbeitung individueller Bemessungsbrände für städtische Schienenbahnen

Szenarien

Konkrete
Definition der
Szenarien und
Zündinitiale

Modellierung

Einheitliche
Ansätze,
Methoden,
Modelle

Material-
prüfungen

Vorgaben zu
Prüfverfahren,
Wiederholungen
etc.

Dokumentation

Nachvollzieh-
barkeit und
Reproduzier-
barkeit

Qualitäts-
sicherung

QM,
Validierung, Vier-
Augen-Prinzip

Transparenter Prozess, valide und belastbare Ergebnisse, prüffähige Dokumentation, fairer Wettbewerb

BEmessungsbrandsimulationen in **S**chienenfahrzeugen
mittels **KI**-basierter **D**aten (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

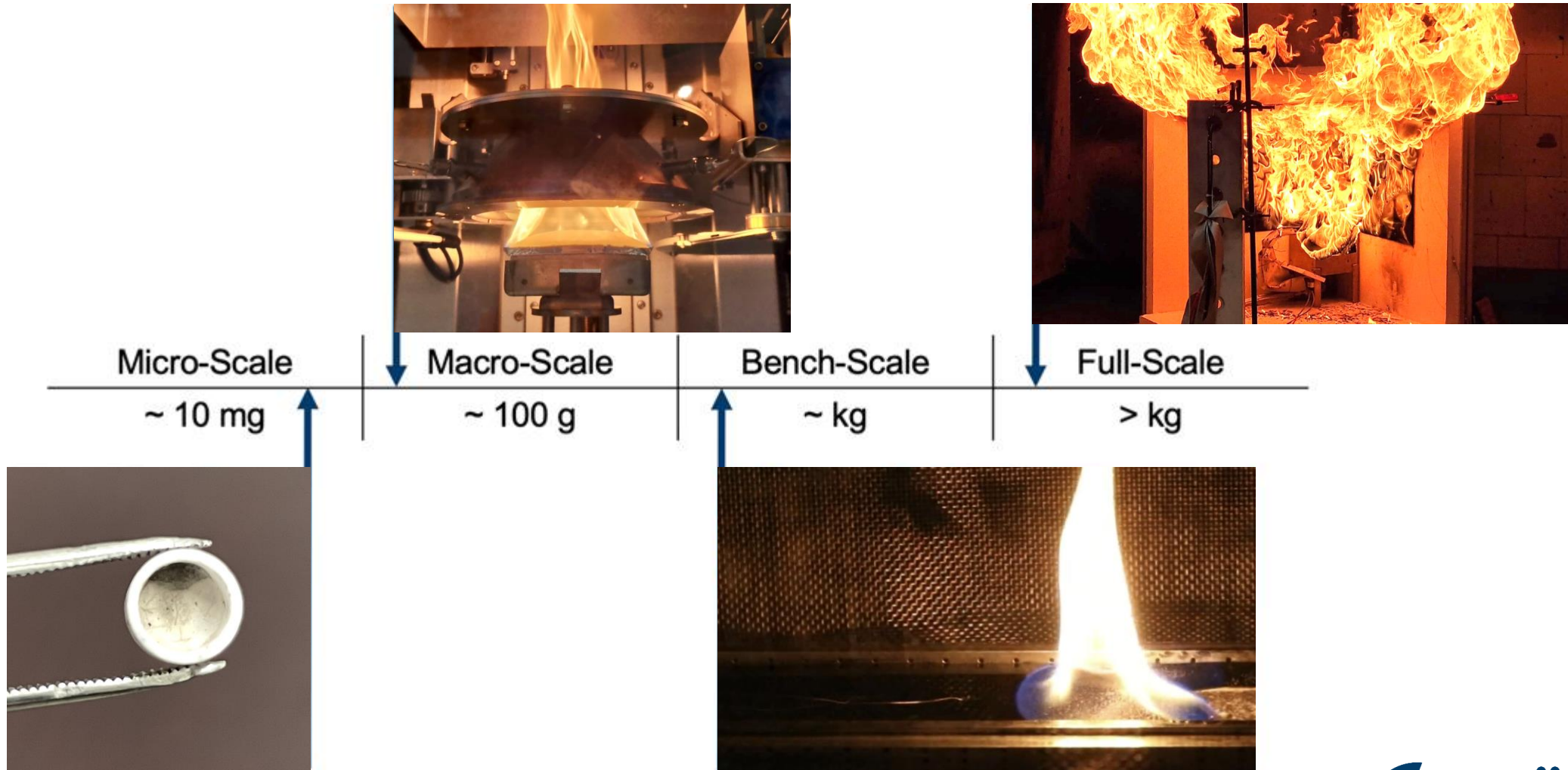


GEFÖRDERT VOM

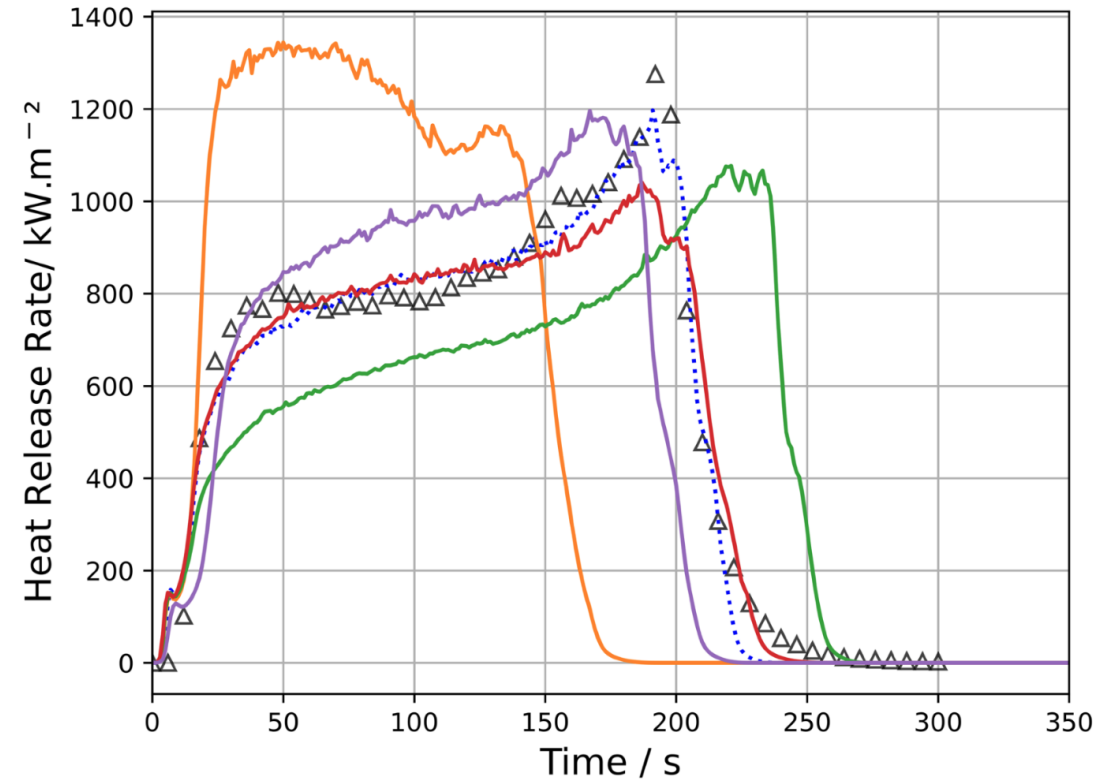
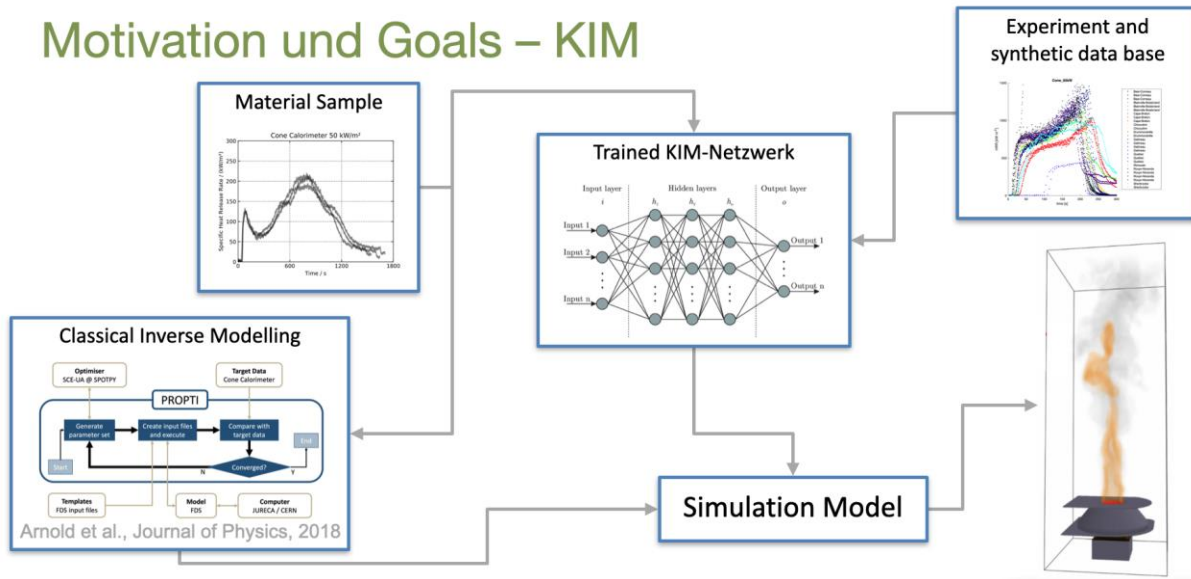


Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Skalenübergreifende Brandversuche



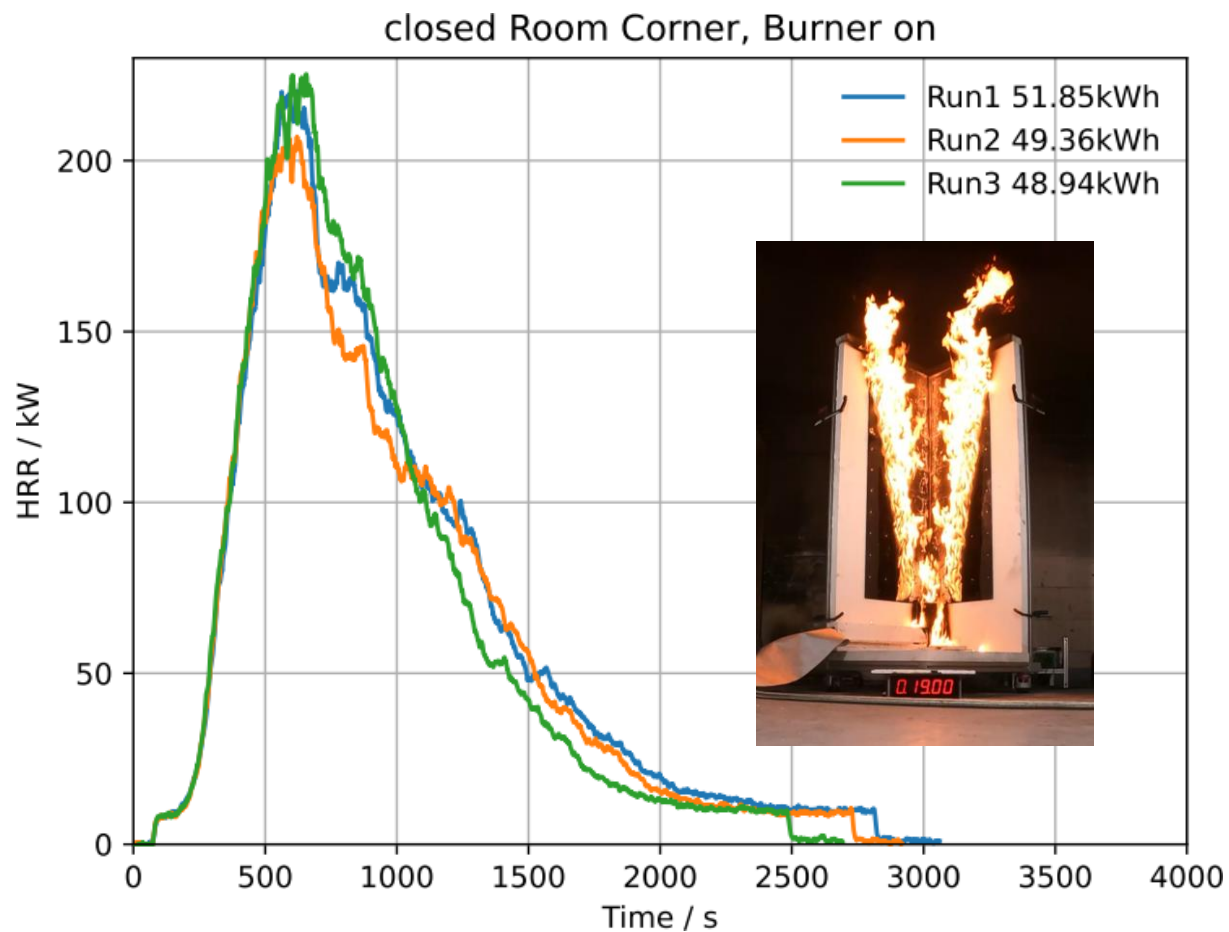
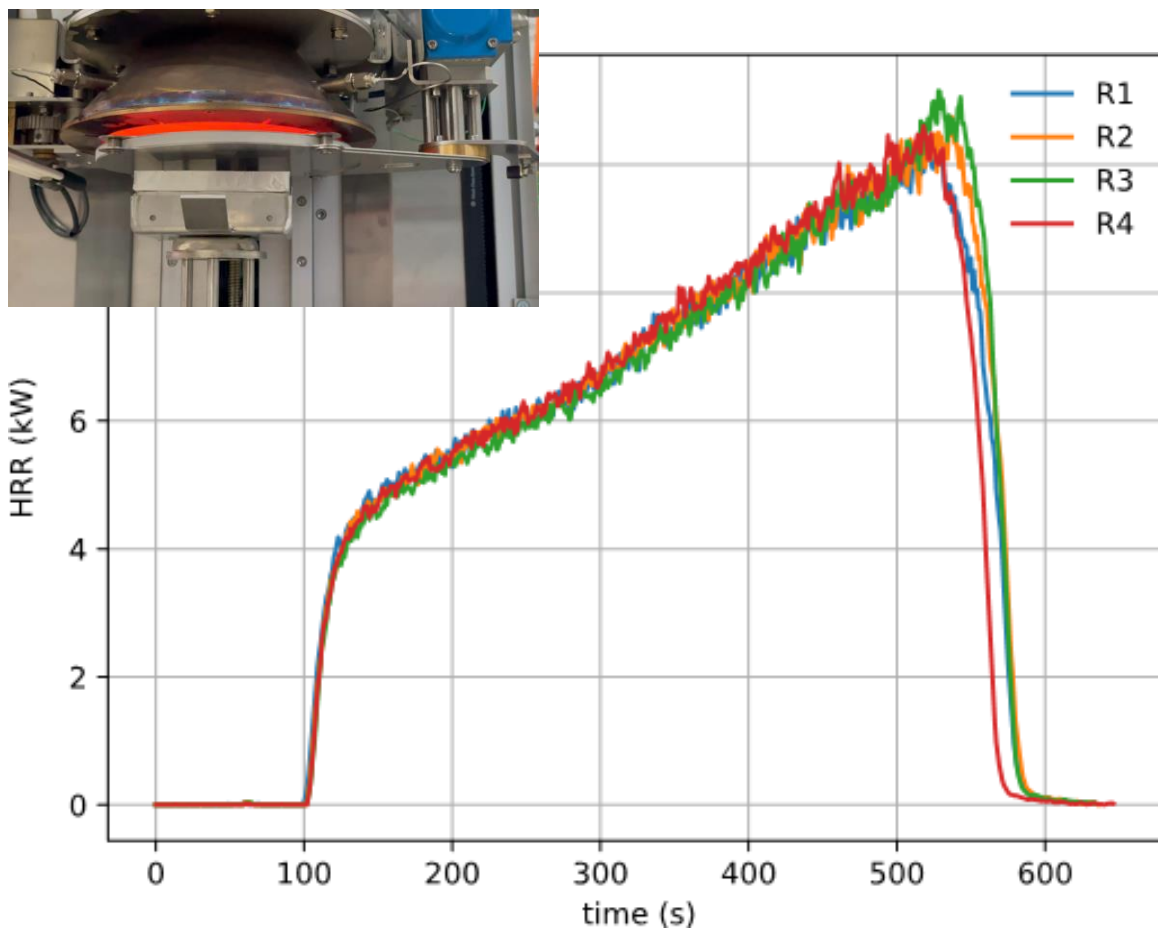
Motivation und Goals – KIM



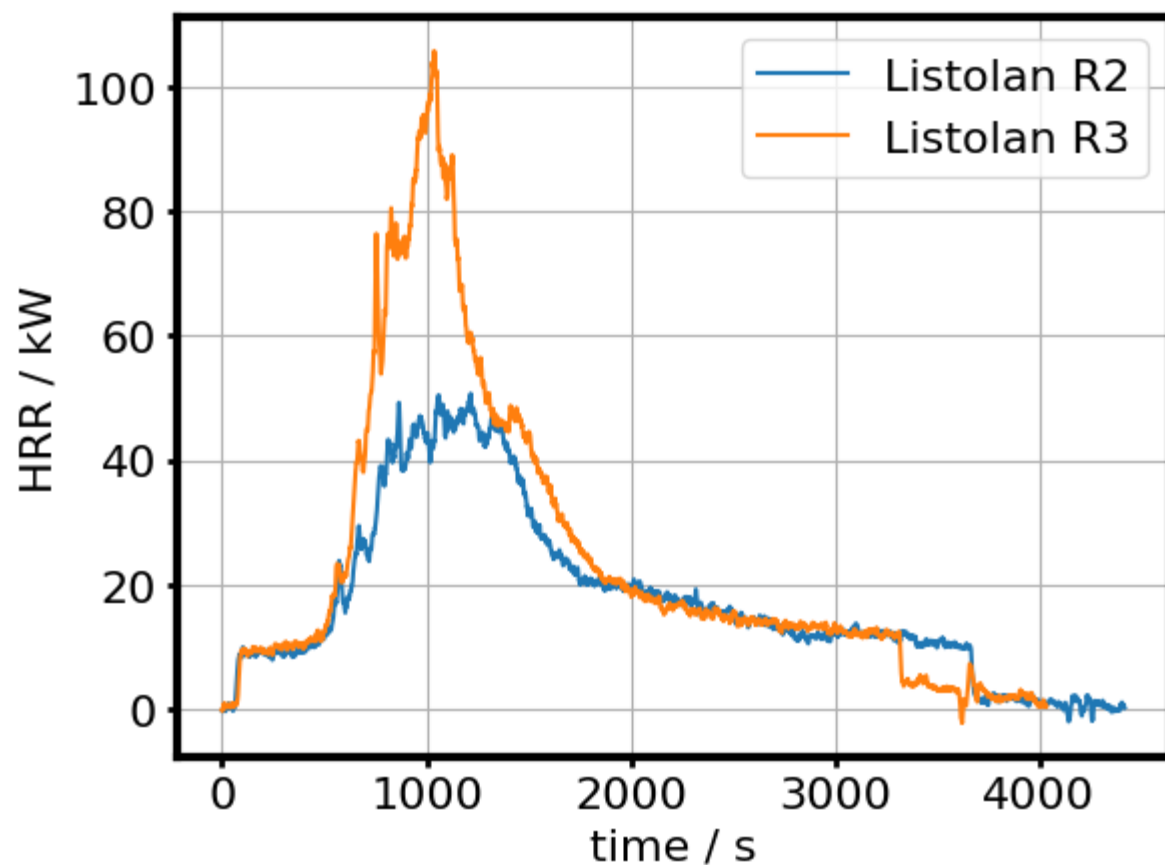
KI-basierter Ansatz der Brandsimulation



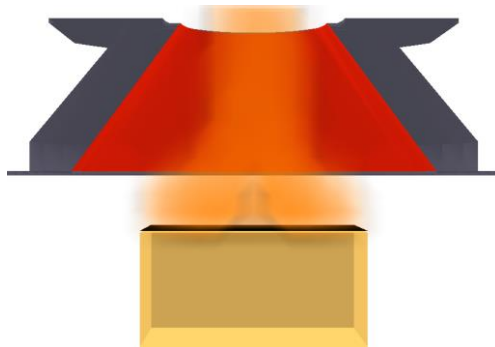
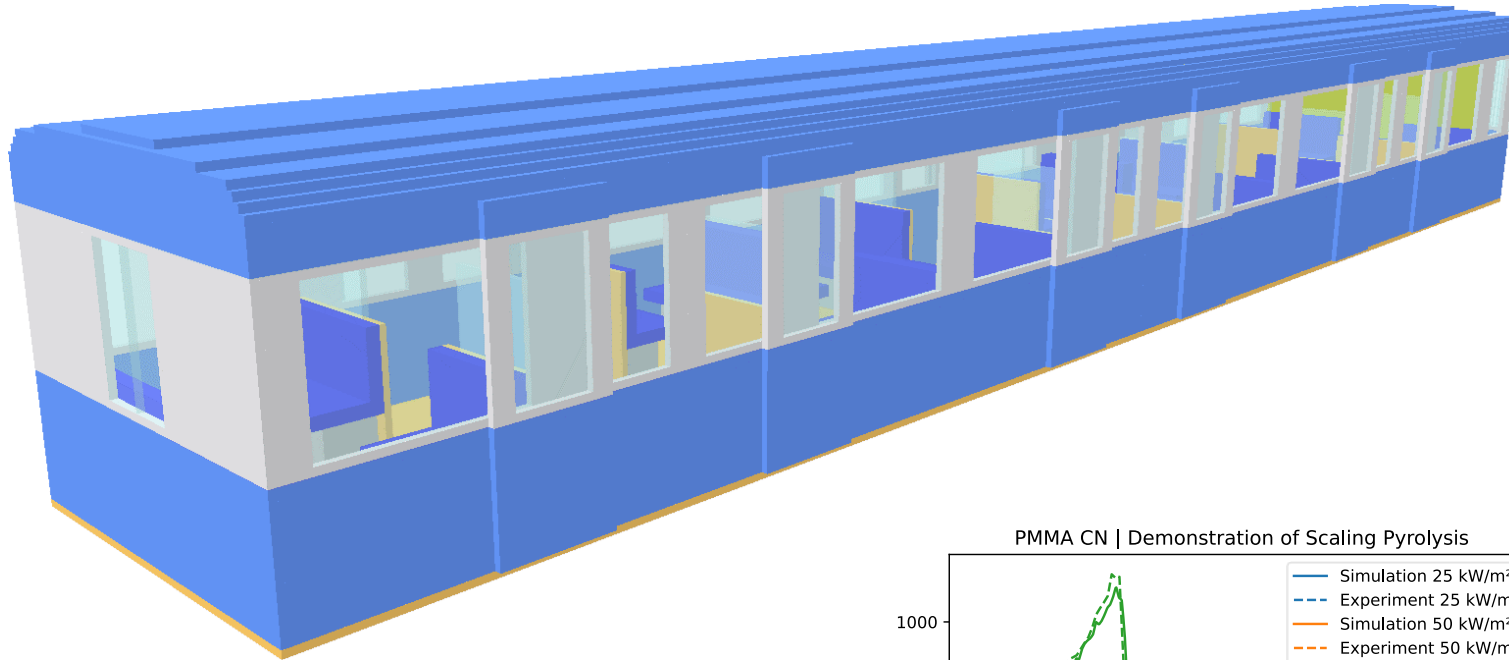
Reproduzierbarkeit von Brandversuchen: PMMA



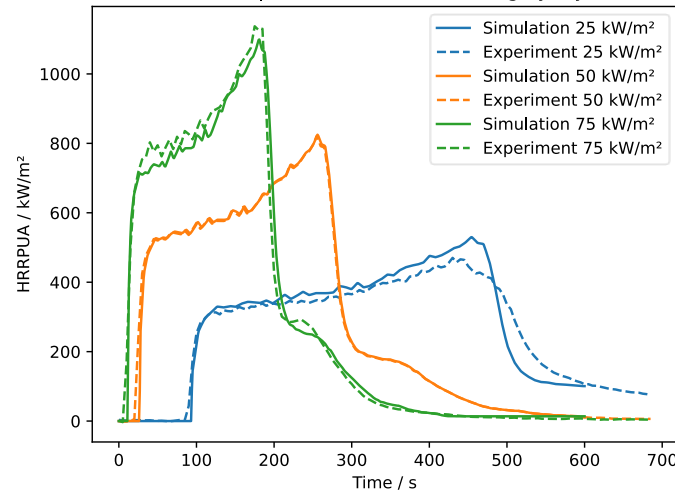
Reproduzierbarkeit von Brandversuchen: Komplexe Kunststoffe



Anwendung und Validierung des SPyro-Modells



PMMA CN | Demonstration of Scaling Pyrolysis



Modeling the Fire Growth in a Railcar

Jonathan L. Hodges^a, Anna Troff^b and Manuel Osburg^b

^aJensen Hughes, Inc., 2020 Kraft Drive Suite 3020, Blacksburg, 24060, VA, USA

^bBrandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, Torgauer Platz 3, Leipzig, 04315, Germany

1. Introduction

Fire simulations are used for the fire protection design of enclosed station buildings or underground transportation systems. These simulations are often performed using standardized design fire curves. However, due to the cost associated with these tests, little data is available on the fire behavior of a full-scale rail car. The majority of data which is available is based on old rail car designs with materials which do not match modern design practice.

Changes in rail car design and material selection can have a significant impact on the overall heat release rate (HRR) profile of a rail car fire. Unfortunately, it is often not feasible to conduct full-scale testing of rail car fires to quantify the HRR due to the high costs associated with the testing. As a result, models are often used to characterize the progression of a rail car fire. These individualized fire curves allow designers to understand a more realistic hazard posed by design permutations.

Models to predict the progression of the HRR of a fully-developed rail car fire typically fall into two categories: summation methods and fire models [1]. Each of these approaches comes with their own set of assumptions and limitations. This paper will explore the use of each of these methods in predicting the HRR of a rail car fire and compares the findings to existing design guidance.

2. Methodology

The paper intended for submission will compare the predicted gas temperatures and HRR with existing semi-empirical, one-zone, and CFD fire models with experimental measurements in a full-scale rail car [2], shown in Figure 1.



Figure 1: Full-scale fire test of rail car for Munich subway. [2]

Bench-scale data from a cone calorimeter was collected for each material in the rail car and at different heat

exposures (25–90 kW/m²). These data were used to calculate the total fuel load and average heat of combustion of the combustibles. Gas temperatures and heat fluxes were measured throughout the rail car and bi-directional probes were located at each ventilation location. The HRR during the test was calculated using both mass loss calorimetry and oxygen consumption calorimetry. Additional detail will be provided in the paper on the experiments.

The measured HRRs are compared with predictions from summation methods and fire models.

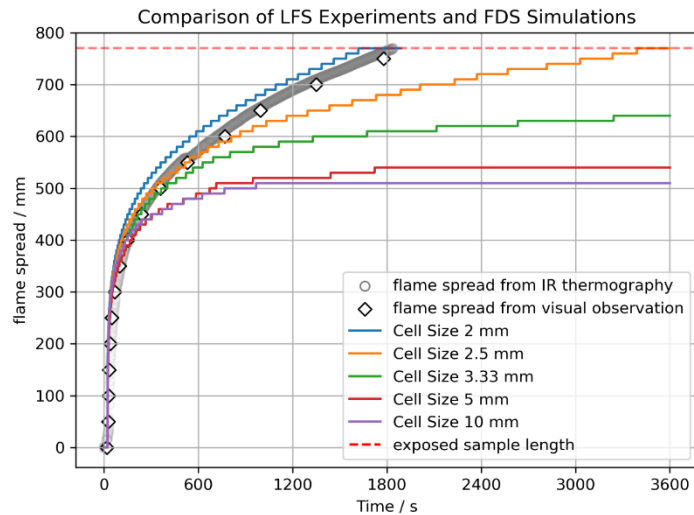
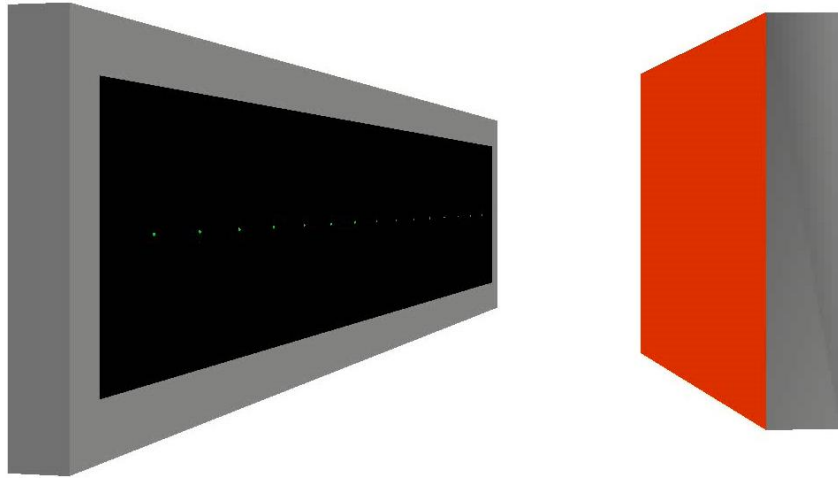
Summation methods use bench-scale data from cone calorimeter testing to estimate the time resolved HRR for each component within the rail car. The overall HRR is predicted by summing the contribution of each material. The predictions of HRR are generally improved over average HRR methods; however, these methods do not account for changes in ventilation and are limited to fixed constant thermal exposure conditions. The thermal exposure selected in the cone calorimeter impacts the overall HRR predicted with these methods. One approach to account for this difference is to use cone calorimeter data collected at different exposures for each surface based on the expected thermal exposure [3]. While these methods can provide better agreement than an arbitrary selection of thermal exposure levels, the model has a tendency to over-predict the HRR measured in full-scale experiments where compartment fire dynamics and available ventilation dominate [1].

Fire models seek to overcome these limitations by incorporating fire dynamics into the predictions. These models include semi-empirical models, single layer models, and detailed CFD models. Semi-empirical models use bench-scale data and existing correlations to calculate the HRR profile, such as the exponential curve method [4]. The accuracy in these methods depends on the accuracy of the estimated parameters as well as the consistency of the fire progression with the assumed profile. Single layer models predict the change in exposure to materials due to changes in the compartment dynamics [1]. The predictions in these models are typically calibrated to compartment experiments to include empirical representations of local fire behavior during the growth to flashover and ventilation flow rates in the fully-developed stage. Detailed CFD models seek to model the fundamental physical laws driving fluid flow, material pyrolysis, and gas phase combustion. This approach does not rely on empirical formulations of fire behavior as these interactions are governed by the governing equations of fluid mechanics and chemistry associated with combustion.

Hodges, J., et al. : Abstract submitted to Interflam 2025

Interflam 2025
Royal Holloway, University of London, UK
30th June - 2nd July 2025

Anwendung und Validierung des S-Pyro-Modells



Impact of geometric configuration in bench-scale experiment on pyrolysis of materials

Anna Troff^a, Manuel Osburg^a, Alexander Belt^a, Lukas Arnold^a and Jonathan L. Hodges^c

^aBrandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, Torgauer Platz 3, Leipzig, 04315, Germany
^bForschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, Jülich, 52428, Germany
^cJensen Hughes, Inc., 2020 Kraft Drive Suite 3020, Blacksburg, 24060, VA, USA

1. Introduction

The heat release rate (HRR) of a burning solid material depends on the interaction of several physical phenomena, such as the decomposition of the condensed phase, the exothermic combustion reaction in the gas phase, and the transfer of heat back to the material surface. While the fire safety community has made significant progress in quantifying material and reaction properties in recent years [1], it is still the focus of on-going research in the community [2]. As a result, simplified engineering approaches are often used in performance-based design (PBD) in fire safety applications.

The scaling-based pyrolysis (S-Pyro) model is a recently developed engineering model to bridge the gap between detailed pyrolysis models and engineering practice. S-Pyro uses the concept of heat of gasification to scale a measured bench-scale material response to dynamic exposure conditions predicted within a computational fluid dynamics (CFD) model [3]. The model estimates the flame heat flux occurring in a cone calorimeter experiment to calculate the reference heat flux for use in scaling. To date, this heat flux has been estimated based on an empirical formulation for a cone calorimeter in a horizontal configuration. However, these results are often applied to predict material behavior in a vertical configuration (e.g., wall linings).

This paper presents data from cone calorimeter experiments for a cast black PMMA in a wide range of experimental configurations, including both vertical and horizontal configurations. Data from various configurations are used with the S-Pyro model to predict the response in the other configurations. The best performing approaches are subsequently used to predict the fire growth in intermediate-scale experiments.

2. Methodology

The cone calorimeter experiments used in this paper, include tests for a cast black PMMA at three heat fluxes (25, 50, 75 kW/m²), two thicknesses (6, 10 mm), and multiple layers of ...

surface. Subsequently a cone calorimeter geometry with an unstructured cone heater is used to reproduce the variation of external flux on the sample surface more closely. In this cone calorimeter setup the external flux from the flame is considered as well as the external flux from the cone heater.

In these bench-scale simulations different approaches for the determination of material parameters are tested, as well as the response of the S-Pyro model using vertical and horizontal datasets as a basis on the horizontal cone setup. More context for the approaches will be given in the full paper.

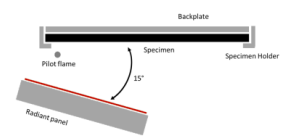


Figure 1: Schematic representation of the test setup in ISO 5658-2.

The approaches from bench-scale simulations are then used to predict fire growth in intermediate-scale flame spread experiments. The intermediate-scale experiments were conducted in accordance with the setup and procedures described in ISO 5658-2 [4]. In this setup specimens are exposed to a well defined field of radiant heat flux. The specimen is placed in vertical orientation opposite a gas-fired radiant panel. The radiant panel is angled 15° away from the specimen resulting in a changing distance between panel and specimen along the specimen's length. The time of ignition, length of lateral spread of flame and extinguishment are recorded as a function of time.

A simplified version of the experimental setup is implemented into FDS where the external fluxes from the heater are specified. The material parameters conductivity, heat capacity and emissivity for cast black PMMA and the calcium silicate board, used as a backing material, are taken from literature [5]. For the cast black PMMA sample conductivity following a linear course between 0.16 W/mK at 25 °C and 0.015 at 500 °C were set. A linear function was used for heat capacity values between 1.9 kJ/(kgK) at 25 °C and 3.22 kJ/(kgK) at 500 °C. The emissivity was set to ...

