

Neue Ansätze zur Simulation von Bränden in Schienenfahrzeugen

Brandversuche, Brandsimulationen, vereinfachte Rechenverfahren und KI-Systeme zur Prognose der Brandausbreitung

PATRICK LAUER | MANUEL OSBURG |
CORINNA TRETTIN

Brände in Schienenfahrzeugen sind aufgrund des regulatorisch festgelegten hohen Sicherheitsniveaus seltene Ereignisse. Um bewerten zu können, ob bei einem Brandereignis die Schutzziele des Brandschutzes, insbesondere die Ermöglichung der Rettung von Menschen, gewährleistet werden, können Brandsimulationen ein hilfreiches Instrument sein. Vorteile gegenüber Brandversuchen sind Kosteneffizienz, die Möglichkeit, verschiedene Szenarien zu betrachten und geringere Umweltauswirkungen. In diesem Beitrag wird der Stand der Technik zu Brandsimulationen in Schienenfahrzeugen zusammengefasst und ein Ausblick auf neue Entwicklungen und aktuelle Forschung unter Einsatz von KI-Systemen gewährt.

Einleitung

Schienenfahrzeuge fahren in Tunneln, unterirdischen Personenverkehrsanlagen und geschlossenen Bahnhofshallen. Für die Erarbeitung von Brandschutzkonzepten für derartige Bauwerke ist es erforderlich, die Gefährdung durch den Brand eines Schienenfahrzeugs zu quantifizieren. Durch Anwendung computergestützter Brandsimulationen ist es möglich, die Rauchausbreitung im Bauwerk oder die Brandeinwirkungen auf Bauteile zu ermitteln und geeignete

Maßnahmen zur Minderung der Auswirkungen und zur Sicherstellung der Schutzziele des Brandschutzes zu bemessen. Die Anwendung dieser Simulationsmodelle setzt die Kenntnis eines fahrzeug- und objektspezifischen Bemessungsbrandes voraus.

Gegenüber den Brandschutzanforderungen nach dem Normenwerk EN 45545 [4] dienen Fahrzeugbemessungsbrände nicht zur Auslegung von Brandschutzmaßnahmen in einem Schienenfahrzeug¹ (fahrzeugbezogener Brandschutz), sondern zur Bemessung der Brandschutzmaßnahmen in einem Bauwerk² (infrastrukturbezogener Brandschutz). Die Grundlagen für den infrastrukturbezogenen Brandschutz bilden u.a. die TRStrab Brandschutz [8] bzw. die E DIN 5647:2022-07 [3] für städtische Schienenbahnen sowie die Regelwerke des Eisenbahn-Bundesamtes.

Methoden

Der Fahrzeugbemessungsbrand beinhaltet die zeitabhängige Wärmefreisetzungsrate (auch: Brandverlaufskurve) sowie Angaben zur Rauchproduktion. Gemäß TRStrab Brandschutz und E DIN 5647:2022-07 kann der Fahrzeugbemes-

¹ Die in EN 45545 spezifizierten Maßnahmen und Anforderungen haben zum Ziel, Fahrgäste und Personal in Schienenfahrzeugen im Falle eines Brandes an Bord zu schützen.

² Bauwerke müssen so geplant, gebaut und betrieben werden, dass im Brandfall die Möglichkeit zur Selbst- und Fremdreitung von Personen sowie zur Brandbekämpfung besteht.

sungsbrand durch drei verschiedene Verfahren bestimmt werden:

1. Fahrzeug-Brandversuche,
2. Brandsimulation des Fahrzeuges auf der Grundlage von Materialprüfungen oder
3. Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung von Materialdaten.

Diese Verfahren lassen sich hinsichtlich des zu erbringenden Aufwandes und der resultierenden Modellgüte in folgende Matrix einordnen.

Vereinfachte Rechenverfahren

Unter vereinfachten Rechenverfahren werden mathematische Modelle zusammengefasst, mit denen die Brandverlaufskurve mit geringem Aufwand und meist ohne Einsatz computergestützter Simulationen abgeschätzt werden kann. Aufgrund modellbedingter Vereinfachungen können die berechneten Ergebnisse mit hohen Unsicherheiten behaftet sein. Zur Kompensation dieser Unsicherheiten werden auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen. Hohe Sicherheitsreserven ermöglichen zwar die Anwendung dieser Verfahren, eine Überschätzung der Brandverlaufskurve ist jedoch wahrscheinlich. Beispielsweise wird bei einigen dieser vereinfachten Rechenverfahren ein Vollbrand unterstellt, was bei modernen Schienenfahrzeugen und Materialqualifikation nach EN 45545-2 [5] zunehmend unwahrscheinlich ist.

Fahrzeug-Brandversuche

Im Gegensatz dazu weisen die experimentellen Ergebnisse von Fahrzeug-Brandversuchen (auch: Realbrandversuche) die geringsten Unsicherheiten auf. Hierbei müssen zwar auch modellbedingte Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden, allerdings handelt es sich nicht um ein mathematisches, sondern um ein Versuchsmodell. Daraus resultiert auch eine höhere Akzeptanz bei Anwendern und Behörden. Hervorzuheben ist insbesondere, dass Brandversuche entscheidende Erkenntnisse zum Brandverlauf liefern können, die bei der Anwendung von mathematischen Modellen noch nicht prognostiziert werden können [7]. Mit der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Fahrzeug-Brandversuchen ist ein hoher Aufwand verbunden.

Computergestützte Brandsimulation

Ein guter Kompromiss zwischen den mit Unsicherheiten behafteten, vereinfachten Rechenverfahren und den aufwendigen Fahrzeug-

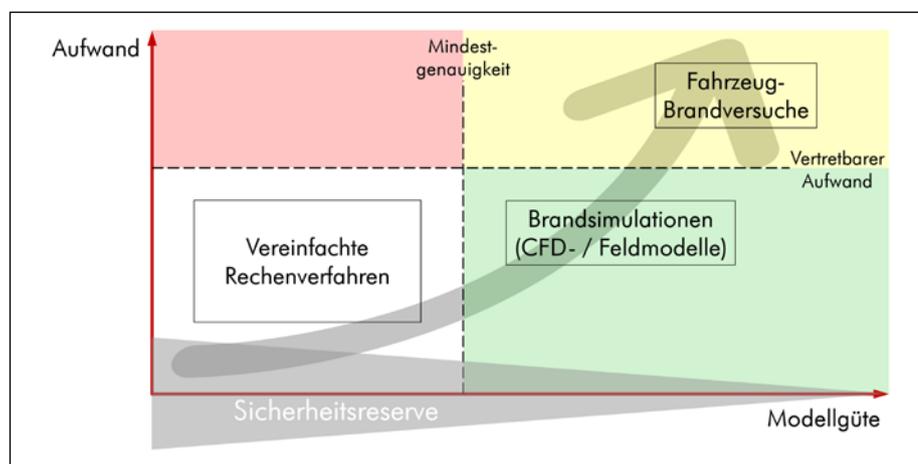


Abb. 1: Gegenüberstellung des Aufwands und der Modellgüte unterschiedlicher Verfahren

Quelle: M. Osburg

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Fahrzeug-Brandversuche	<ul style="list-style-type: none"> - experimentelle (praktische) Nachweisführung mit wenig Modellunsicherheiten - hohe Belastbarkeit / Akzeptanz - i. d. R. günstigere Ergebnisse im Vergleich zu Brandsimulationen - liefern wichtige, weitergehende Erkenntnisse zum Brandverlauf 	<ul style="list-style-type: none"> - nur wenige Brandversuche aufgrund Modellzerstörung möglich - unter Umständen aufwendig
Brandsimulationen	<ul style="list-style-type: none"> - beliebig viele Wiederholungen mit Parametervariationen möglich (u. a. Variation des Zündszenarios bzw. der Art und Lage des Zündinitials) - ergänzende Untersuchung der Wirksamkeit von Materialsubstitutionen bzw. -modifikationen zur Optimierung der Brandentwicklung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - mathematische (theoretische) Nachweisführung beinhaltet Unsicherheiten / Anwendungsgrenzen; dies erfordert die Zugrundelegung konservativer Annahmen - Simulationen sind bei speziellen Bedingungen (Brandbekämpfungsanlage oder brennbare Isolierung) nicht oder nur bedingt geeignet.

Tab. 1: Übersicht der Vor- und Nachteile von Brandversuchen und -simulationen

Quelle: M. Osburg

Brandversuchen sind computergestützte Brandsimulationen. Hierunter versteht man die Anwendung sogenannter Computational Fluid Dynamics Modelle (kurz CFD-Modelle) oder Feldmodelle. Der Aufwand für die Anwendung dieser Simulationsmodelle kann zwar höher sein als bei den vereinfachten Rechenverfahren, jedoch ist die Modellgüte, d.h. die Genauigkeit der Brandausbreitungsprognose deutlich höher. Sicherheitsreserven können abgemindert werden, und insbesondere kann das Auftreten eines Flashovers mit anschließendem Vollbrand prognostiziert werden.

Die Übersicht in Tab. 1 fasst die Vor- und Nachteile von Fahrzeug-Brandversuchen und Brandsimulationen zusammen. Vereinfachte Rechenverfahren kommen bei den Autoren des vorliegenden Artikels in der Regel nicht zur Anwendung. Durch die gemeinsame Anwendung von Fahrzeug-Brandversuchen und Brandsimulationen können Ergebnisse erzeugt werden, die mit dem jeweils anderen Verfahren allein nicht darstellbar sind. Ein erhöhter Aufwand, der aus der Kombination der beiden Verfahren resultiert, wird durch einen geringeren Aufwand im infrastrukt-

turbestützten Brandschutz kompensiert. Vor diesem Hintergrund kommt der ganzheitlichen Kosten-Nutzen-Bewertung bei der Herleitung von Bemessungsbränden bzw. bei der Optimierung des fahrzeugbezogenen Brandschutzes eine besondere Bedeutung zu.

Einflussgrößen auf die Brandentwicklung

Auf Basis einer Fahrzeug-Brandrisikoanalyse werden Zündszenarien im Innenraum des Fahrzeugs festgelegt. Grundlegende Kriterien zur Bestimmung der Szenarien liegen in der Begünstigung der Brandausbreitung. Dies trifft auf Konstruktionen zu, deren brennbare Oberflächen in Richtung Brandausbreitung positioniert sind (z.B. unter Sitzen oder Anlehnhilfen) und auf die die Flammen direkt thermisch einwirken. Ebenfalls begünstigen Eckpositionen aufgrund der sich entwickelnden höheren Flammenläge im Vergleich zu einseitig angelehnten Bränden die thermische Aufbereitung über eine größere vertikale Fläche (z.B. Brand auf dem Sitz hinter einer Fahrerstandrückwand). Zusätzlich wirken Einbausituationen mit angrenzenden umseitig liegenden Oberflä-

chen ähnlich einem Kamineffekt (z.B. zwischen Wagenübergang und Sitzgruppe). Abb. 2 zeigt Beispiele für solche Konstruktionen.

Das Brandverhalten der exponierten Oberflächen ist eine weitere Einflussgröße. Diese Eigenschaften werden in einem Cone Calorimeter nach ISO 5660-1 bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken ermittelt. Zündzeitpunkt, maximale Wärmefreisetzungsrate, Gesamtwärmefreisetzung, Branddauer und weitere brandtechnologische Werte geben Aufschluss über das Brandverhalten. Die Festlegung der betrachteten Szenarien erfolgt aus einer kombinierten Betrachtung der Fahrzeugkonstruktion und der Werkstoffe.

Zündinitial

Ein Brand breitet sich von einem Initialbrand aus. Die wahrscheinlichste Zündquelle im Passagierbereich eines Schienenfahrzeugs ist ein Gepäckbrand oder Brandstiftung/Vandalismus. Ein Initialbrand wird als Zündinitial maßgeblich über die Wärmefreisetzungsrate und der damit verbundenen Freisetzung von Rauchgasen und Ruß beschrieben.



Abb. 2: Beispiel für Zündpositionen, die einen ungünstigen Brandverlauf erwarten lassen

Quelle: C. Trettin

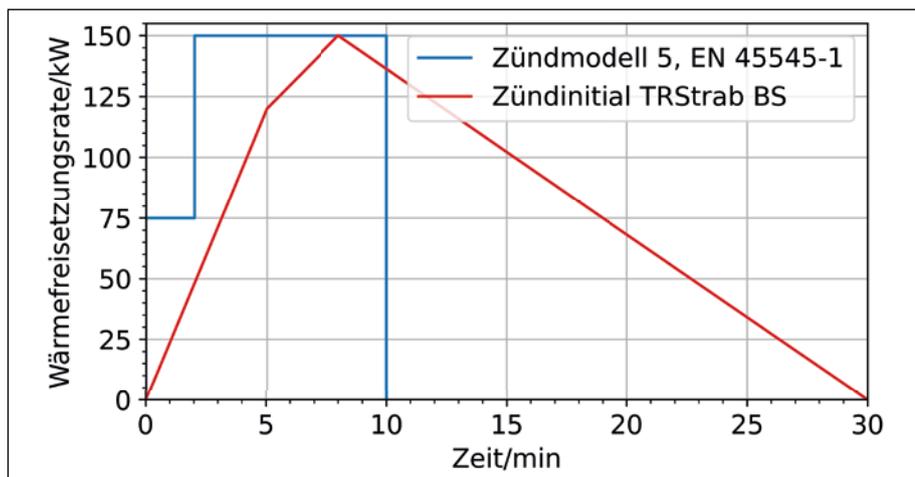


Abb. 3: Zündinitiale aus TRStrab BS und EN 45545-1

Quelle: [4, 8]

Zur Definition eines brennenden Gepäckstücks gibt es verschiedene Zündmodelle. In der Praxis sind zwei normative Vorgaben relevant. Für Fahrzeuge im Geltungsbereich der BOStrab sind die Vorgaben der TRStrab BS maßgeblich [8]. Die Norm EN 45545-1 beschreibt als Zündmodell 5 einen weiteren Initialbrand [5]. Die Verläufe der beiden Zündinitiale sind in Abb. 3 dargestellt.

Ventilationsbedingungen

In der Brandausbreitungssimulation müssen Ventilationsbedingungen innerhalb des Fahrzeugs und an den Schnittstellen von Fahrzeug und Umgebung (an Fenstern und Türen) betrachtet werden. Bei der Ermittlung des ungünstigsten Brandverlaufs ist es einerseits zielführend, dass der Brand mit ausreichend Sauerstoff versorgt wird, andererseits soll so wenig Wärme wie möglich über Konvektion in die Umgebung abgegeben werden. Letzterer Einfluss ist insbesondere im frühen Brandverlauf, ersterer Einfluss besonders im späteren Brandverlauf relevant.

Brandsimulation

Um eine Brandausbreitungssimulation durch ein CFD-Modell zu berechnen, müssen mehrere Randbedingungen definiert werden. Nach der Auswahl des CFD-Modells können die Fahrzeuggeometrie und das Brandverhalten der Materialien definiert werden.

CFD-Modell

CFD-Modelle müssen geeignet, verifiziert und validiert zur Brandsimulation sein. Sie müssen Aussagen zur Brandausbreitung und zum Wärmetransport treffen können. Ferner müssen sie die Rauchgasmenge und -zusammensetzung quantifizieren und die Entwicklung von rauchgas- und raucharmen Schichten beschreiben können. [8]

International weit verbreitet ist die Software Fire Dynamics Simulator (FDS). FDS kann verschiedene Brandphänomene und deren Wechselwirkungen berechnen, u.a. den Transport von Wärme und Verbrennungsprodukten, die Wärmeübertragung zwischen Gas- und

Festkörperoberflächen sowie Pyrolyse und Brandausbreitung.

Materialparameter

Für die Zulassung von Schienenfahrzeugen, die konform zu EN 45545-2 sind, wird eine Vielzahl von Materialprüfungen durchgeführt. Die Prüfung nach ISO 5660-1 im Cone Calorimeter, bei der die Wärmefreisetzung eines Werkstoffes bei Bestrahlung mit Wärmestrahlung einer Probe über die Methode der Sauerstoffverbrauchskalorimetrie bestimmt wird, dient als Basis zur Bestimmung der Materialparameter. Wichtige Parameter aus der Prüfung sind der Zündzeitpunkt und die zeitlich aufgelösten Werte für Wärmefreisetzungsraten und CO-, CO₂- und Rußproduktionsraten. Hierbei wird die Probe im Unterschied zum Nachweis nach EN 45545-2 unter mehreren Wärmestromdichten geprüft.

Großflächig exponierte, nicht brennbare Materialien können als Wärmesenke oder Isolator modelliert werden. Handelt es sich um Basismaterialien wie Aluminium, Stahl oder nicht brennbare Isolationsmaterialien, können häufig Literatur- oder Herstellerdaten für die thermophysikalischen Eigenschaften verwendet werden [1, 2].

Modellgeometrie

Um die Brandausbreitung im Fahrzeug prognostizieren zu können, muss es in ein 3D-Modell, das geeignet für den CFD-Code ist, überführt werden. Als Grundlage hierfür dienen 2D-Pläne oder 3D-CAD-Daten. In CFD-Codes wird der Raum in diskrete Kontrollvolumen aufgeteilt, die die kleinste darstellbare Größe beschreibt. Je feiner die Diskretisierung, desto genauer sind die Ergebnisse, aber umso höher ist der Rechenaufwand. In kubisch diskretisierten Modellen wie FDS hat sich bei der Modellierung von Schienenfahrzeugen eine Gittergröße von 10 ... 50 mm als praxistauglich erwiesen. Abb. 4 zeigt die beispielhafte Umsetzung einer Modellgeometrie für ein Straßenbahnfahrzeug.



Abb. 4: Beispielhafte Umsetzung einer Modellgeometrie

Quelle: C. Trettin

Abb. 5 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Brandsimulation. Es sind fiktive, aber mögliche Brandverlaufskurven für drei Szenarien dargestellt, in denen der Brand lokal begrenzt bleibt und sich nicht zu einem Vollbrand entwickelt. Sie weisen abhängig von den jeweiligen Bedingungen der einzelnen Szenarien eine unterschiedlich starke und unterschiedlich schnelle Brandentwicklung auf. Alle drei Brandverläufe können in Abhängigkeit vom Szenario im selben Fahrzeug auftreten. Um mit einer einzigen Bemessungsbrandkurve alle untersuchten Szenarien abzudecken, wird eine einhüllende Kurve gewählt, die die Wärmefreisetzungsraten aller untersuchten Szenarien einschließt. Die mit den Laborprüfungen zur Ermittlung der Materialparameter und dem verwendeten Modell zur Brandsimulation verbundenen Unsicherheiten müssen für den konservativsten Fall auf die ermittelte einhüllende Kurve aufgeschlagen werden, hier als σ dargestellt. Diese Unsicherheiten sind jeweils projektspezifisch zu ermitteln. Die Entstehungsanteile der Rauchgase und von Ruß werden in Abhängigkeit von den Anteilen der brennenden Materialien auf Grundlage der Laborprüfungen ermittelt.

Qualitätssicherung

Die beschriebene Methode zur Simulation einer Brandausbreitung ist hochkomplex und bietet bei unsachgemäßer Verwendung ein hohes Fehlerpotenzial. Daher müssen ange-

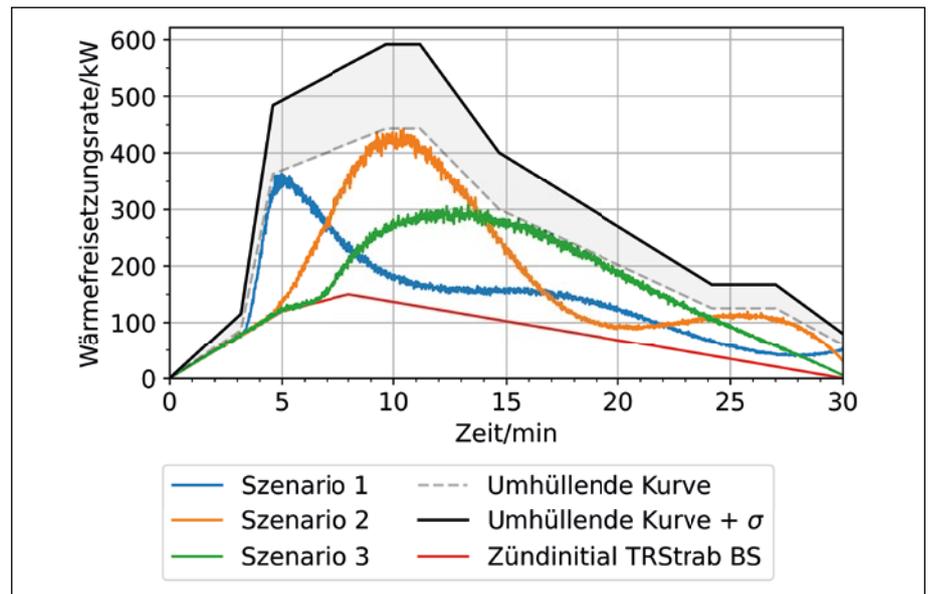


Abb. 5: Beispielhafte Brandverlaufskurven

Quelle: P. Lauer

messene Maßnahmen zur Sicherstellung der Qualität der Ergebnisse ergriffen werden. Personen, die diese Projekte bearbeiten, müssen ausreichend Wissen und Erfahrung an der Schnittstelle Brandschutz und -technologie, Schienenfahrzeuge (und Infrastruktur) und (numerischer) Strömungsmechanik besitzen. Da die Brandsimulationsmodelle als Randbedingungen der Strömungssimulation eine

Vielzahl von weiteren Modellen zum Strahlungstransport, zur Berechnung der chemischen Reaktion, Pyrolyse und anderen beinhaltet, ist auch hier ein umfassendes Verständnis notwendig. Grundsätzlich muss der gesamte Prozess von der Festlegung der ersten Annahmen bis zur Auswertung der Ergebnisse einem Vier-Augen-Prinzip zur Plausibilitätsprüfung folgen.

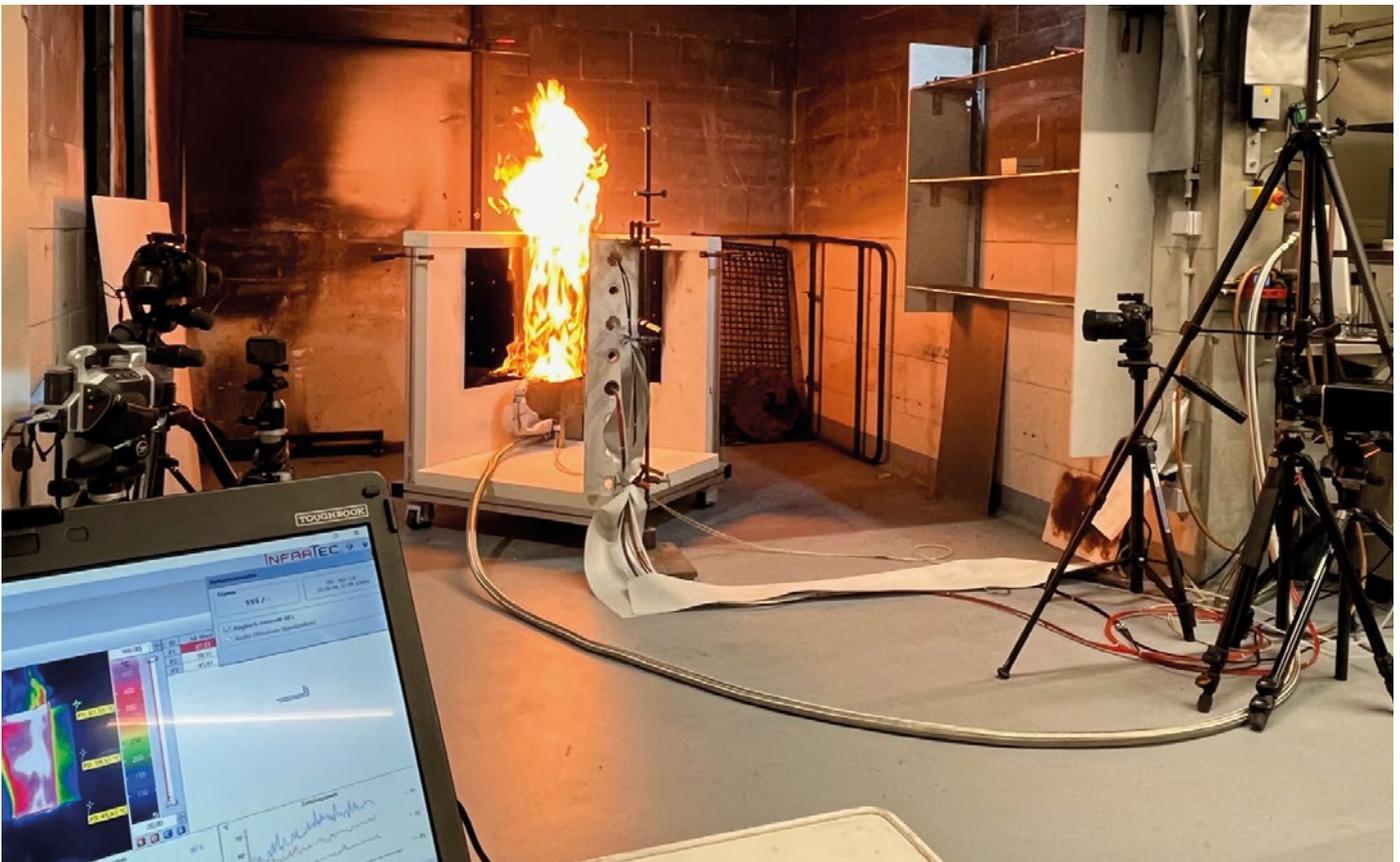


Abb. 6: Validierungsversuche an PMMA im mittleren Maßstab im Rahmen des BESKID-Projekts

Quelle: M. Osburg

Ausblick

Im Oktober 2022 startete ein vom BMBF gefördertes Forschungsprojekt unter dem Titel „Bemessungsbrandsimulationen in Schienenfahrzeugen mittels KI-basierter Daten“ (BESKID). An diesem Projekt sind die Bergische Universität Wuppertal, das Forschungszentrum Jülich, die Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig und die TÜV SÜD Rail GmbH als Verbundpartner beteiligt. Das Gesamtziel des Projekts BESKID ist die Entwicklung zweier KI-Systeme, welche es ermöglichen, auf Grundlage weniger experimenteller Daten Brandausbreitungssimulationen in Schienenfahrzeugen durchzuführen. Mit diesen wissenschaftlichen Ansätzen soll die Berechnung der Brandausbreitung deutlich vereinfacht und beschleunigt werden, um ihre praktische Anwendung in größerem Maßstab zu ermöglichen.

i

Mehr Informationen zum Projekt BESKID

Der vorliegende Artikel entstand im Rahmen der Bearbeitung des vom BMBF geförderten Projektes BESKID.

Mehr Informationen finden Sie unter:

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

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die angestrebten Ergebnisse des Projekts umfassen die folgenden Aspekte:

Zwei KI-Systeme

KIM (KI-System Material) soll zur Bestimmung von Materialparametern eingesetzt werden, ohne dass die nach dem heutigen Stand der Technik erforderlichen aufwendigen Experimente und Optimierungsmethoden eingesetzt werden müssen. Das zweite System KIB (KI-System Brand) soll den klassischen CFD-Ansatz zur Berechnung von Szenario-Ensembles methodisch ergänzen.

Methodische Validierung

Für den Vergleich zum klassischen Ansatz werden Laborexperimente zur Bestimmung der Materialparameter für ausgewählte Materialien (z. B. PMMA) durchgeführt: TGA, MCC, Cone Calorimeter und Tube Furnace. Versuche im mittleren Maßstab, wie in Abb. 6 dargestellt, werden zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Methode und zur Validierung der daraus resultierenden Ansätze verwendet.

Erprobung und Evaluierung

Die KI-Systeme KIM und KIB sollen für die Erarbeitung von Bemessungsbränden für Schienenfahrzeuge eingesetzt werden. Dabei soll einerseits der Aufwand reduziert und andererseits die Modellgüte von Bemessungsbränden erhöht werden. Im Rahmen des BESKID-Projekts erfolgt die Bewertung der Eignung der beiden KI-Ansätze durch die Autoren des vorliegenden Artikels. ■

QUELLEN

[1] Arnold, L. et al.: Propti—a generalised inverse modelling framework, *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1107, No. 3, p. 032016). IOP Publishing

[2] Brännström, F.: Fire Spread Modelling in Railway Industry, *Proceedings of the Interflam 2016 Conference*, Bromley, England, Juli 2016

[3] EDIN 5647:2022-07: *Bahnanwendungen – Sicherheitsanforderungen an städtische Schienenbahnen – Bauwerke*

[4] EN 45545-1:2013: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Regeln*

[5] EN 45545-2:2020: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten*

[6] EN 45545-3:2015: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 6: Brandmelde- und Brandbekämpfungseinrichtungen und begleitende Brandschutzmaßnahmen*

[7] Hester, M.; Osburg, M.; Thiel, V.: *Erarbeitung individueller Bemessungsbrände bei der Hamburger U-Bahn, ÖPNV-Fachtagung Internationale Brandschutztagung, breidenbach+frost, Leipzig, 08./09.10.2015*

[8] *Technische Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen (TRStrab Brandschutz)*, 24. Juni 2014



Patrick Lauer, M.Sc.

Sachverständiger Brandschutz
TÜV SÜD Rail GmbH, Berlin
patrick.lauer@tuvsud.com



Manuel Osburg, M.Sc.

Leiter Fachgebiet Ingenieurmethoden
Prokurist
Brandschutz Consult
Ingenieurgesellschaft mbH, Leipzig
m.osburg@bcl-leipzig.de



Corinna Trettin, M.Sc.

Gutachterin Brandschutz
Abteilungsleitung Fahrzeugsubsysteme
TÜV SÜD Rail GmbH, Berlin
corinna.trettin@tuvsud.com

Zertifizierter Brandschutz im Tunnel

Roxtec- Kabel und Rohrabdichtungen sorgen für sicheren Transport von Personen und Gütern und vermeiden das Risiko von Ausfallzeiten.

- Brandschutzsicher nach DIN EN 1366-3
- Wasser- und staubdicht
- Sichere Schädlings- und Nagetierbarriere
- Einfache Installation, Inspektion und Wartung
- Reservekapazität für Nach- und Aufrüstungen

roxtec.com/de