

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Fachbereich D – Abteilung Sicherheitstechnik



Brandschutz in Schienenfahrzeugen

—

**Experimentelle und numerische Untersuchungen
zu Reisegepäck als sekundäres Zündinitial**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

im Fachbereich D der Bergischen Universität Wuppertal

in der Abteilung Sicherheitstechnik

vorgelegt von

Julian Bulk

aus Bielefeld

Wuppertal, im Januar 2015

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20150623-144916-1

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20150623-144916-1>]

Erklärung

Hiermit erkläre ich nach § 8 der Promotionsordnung vom 04.12.2006, dass ich die eingereichte Arbeit selbstständig verfasst habe und bei der Abfassung der Arbeit nur die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wuppertal, den 15.01.2015

Julian Bulk

Vorwort

Diese Forschungsarbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet »Brand- und Explosionsschutz« der Universität Wuppertal. Die untersuchte Fragestellung hat ihren Ursprung in TRANSFEU, einem von der Europäischen Union geförderten Projekt zur Weiterentwicklung der Brand-sicherheit von Schienenfahrzeugen, an dessen Bearbeitung auch die Universität Wuppertal beteiligt war.

Mein Dank gilt dem TRANSFEU-Konsortium, insbesondere Dr. Anycée Camillo und Eric Guillaume (LNE, Frankreich), Dr. Silvio Messa (L.S. Fire, Italien), und Dr. Maria Hjohlman (SP, Schweden), für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Für die Möglichkeit zur Nutzung ihrer Labor- und Prüfeinrichtungen und die umfangreiche Unterstützung bin ich Michael Halfmann, Dr. Björn Banser und dem gesamten Team der Currenta Brandtechnologie in Leverkusen sehr dankbar.

Mein Dank richtet sich auch an das Fundbüro der DB Station&Service AG für das Zurverfügungstellen von Gepäckstücken für die experimentellen Untersuchungen.

Für die Hilfestellungen zur effektiven Nutzung der Kapazitäten der Hochleistungsrechner für die Brandsimulationen möchte ich dem Servicedesk-Team des Compute Clusters der RWTH Aachen danken.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Wittbecker, dem Fachgebietsleiter »Brand- und Explosionsschutz«, für sein Engagement, diese wissenschaftliche Arbeit zu betreuen und zu begutachten. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Goertz, dem Fachgebietsleiter »Abwehrender Brandschutz«, für das Erstellen des Zweitgutachtens.

Im Glossar aufgeführte Begriffe sind bei ihrer ersten Nennung *kursiv* dargestellt. Literaturreferenzen, die in einen Satz integriert sind, beziehen sich auf den entsprechenden Satz. Befindet sich eine Literaturreferenz am Ende eines Absatzes, bezieht sich diese auf den gesamten Absatz.

Zusammenfassung

Schienefahrzeuge sind ressourcenschonende Verkehrsmittel und erfordern, vor allem aufgrund der hohen Personendichten und Fahrgeschwindigkeiten, bei der Auslegung und dem Betrieb besondere Sorgfalt. Aus der Perspektive der Brandsicherheit bestehen die Herausforderungen insbesondere in den von Passagieren zusätzlich eingebrachten, unbekanntem Brandlasten sowie den infrastrukturell bedingt erschwerten Evakuierungsmöglichkeiten.

Die derzeitige, europäisch harmonisierte Normung des Brandschutzes in Schienefahrzeugen adressiert hauptsächlich das Vermeiden von Zündquellen, das Reglementieren des Brandverhaltens der Fahrzeugkomponenten sowie den Einbau feuerwiderstandsfähiger Raumabtrennungen. Bei den notwendigen Material- und Produktprüfungen kommt auch teilweise ein Zündmodell zur Anwendung, das die thermische Einwirkung eines brennenden Gepäckstückes abbildet, da Reisegepäck einen erheblichen Anteil der vorhandenen Brandlast ausmachen und infolgedessen der auslösende Faktor für eine Brandausbreitung bis hin zur Durchzündung des gesamten Fahrzeuges sein kann.

Gleichwohl ein Gepäckstückbrand also ein typisches Szenario zur Auslegung von Schienefahrzeugen darstellt, existieren bisher kaum fundierte Kenntnisse darüber, welche stofflichen und energetischen Emissionen bei einem solchen Ereignis typischerweise zu erwarten sind. Darüber hinaus ist unklar, inwiefern sich die von einem brennenden Gepäckstück freigesetzten und toxischen Substanzen auf die Erträglichkeitskonditionen exponierter Personen auswirken.

Infolgedessen resultiert für diese Arbeit eine zweigliedrige Aufgabenstellung, die zum einen darin besteht, das Brandverhalten und die charakteristischen Emissionen eines typischen Gepäckstückes experimentell zu bestimmen. Zum anderen sollen diese Freisetzung in einem Schienefahrzeug numerisch simuliert und daraufhin die Sicherheit von Passagieren und Personal mit Ingenieurmethoden beurteilt werden.

Aus einer theoretischen Analyse potentieller Brandentstehungsszenarien sowie der retrospektiven Betrachtung tatsächlicher Brandereignisse in Schienefahrzeugen lässt sich folgern, dass Brandstiftung die häufigste Ursache für Brände im Fahrgastbereich darstellt und vorhandenes Reisegepäck sowohl als sekundäres Zündinitial wirken als auch eine nicht zu vernachlässigende Brandlast repräsentieren

kann. Daher werden brennende Reisegepäckstücke bereits in Normen und speziellen Analysen als Zündinitiale oder beispielsweise für Bemessungsbrände verwendet. Allerdings fehlen Angaben zu stofflichen Freisetzungen, wie toxischen Gasen oder Rauchpartikeln.

Für die experimentellen Untersuchungen wird eine Versuchskonfiguration entwickelt, mit der das Brandverhalten von Reisegepäck unter möglichst realitätsnahen Bedingungen charakterisiert und die benötigten Brandkenngrößen erfasst werden können. Vorversuche, in denen fünf identische Gepäckstücke verschiedenen Zündinitiale und -konfigurationen ausgesetzt werden, führen zu dem Ergebnis, dass sich ein genormter Gasbrenner, der die Wärmeeinwirkung einer brennenden, zerknüllten Zeitung simuliert, am besten als Zündinitial für die Hauptversuche eignet. Für diese Hauptversuche werden acht Reisegepäckstücke identifiziert, hinsichtlich ihrer Beschaffenheit und Komposition typisiert und nachfolgend brandtechnologisch untersucht.

Anhand der Messdaten ist es nun möglich, ein Modell zu entwickeln, welches das Brandverhalten eines typischen Reisegepäckstückes vollständig beschreibt. Dieser Gepäckstück-Bemessungsbrand ist funktional dargestellt als eine quadratisch ansteigende Entwicklungsphase, eine Vollbrand- und eine Abklingphase. Neben der zeitabhängigen Wärmefreisetzung werden Funktionen für die Emission toxischer Leitgase und sichtrübender Rauchpartikel abgeleitet.

Zunächst erfolgt die numerische Umsetzung des Gepäckstück-Bemessungsbrandes zusammen mit der verwendeten Experimentalkonfiguration. Die Gegenüberstellung von Rechenergebnissen und Messdaten bestätigt, dass sich die energetischen und stofflichen Brandemissionen eines Gepäckstückes mit dem Fire Dynamics Simulator zuverlässig abbilden lassen.

Daraufhin fungiert der Gepäckstück-Bemessungsbrand als Initialbrand und wird in die Geometrie eines Doppelstockwagens implementiert. Eine Serie von 37 Simulationen befasst sich mit 24 unterschiedlichen Brandszenarien. In diesen werden ausgewählte Parameter, wie der Standort des Initialbrandes, die Ventilationsbedingungen sowie die brandtechnologischen Materialkennwerte und die zugehörigen Pyrolysemodelle der Fahrzeugkomponenten variiert. Darüber hinaus werden geometrische Diskretisierungen und Berechnungsmodi untersucht, um die Simulationsrechnungen möglichst effizient zu gestalten.

Zusammenfassung

Die Personensicherheit lässt sich anhand der Simulationsergebnisse beurteilen, indem sowohl die thermischen Einwirkungen als auch die Exposition gegenüber toxischen Gasen quantifiziert werden. Letztere stehen in direkter Korrelation zur Rauchverteilung in den Wagenbereichen und hängen maßgeblich von der Position des Initialbrandes innerhalb des Fahrzeuges ab.

Die Ergebnisse der Berechnungen belegen ferner, dass

- es nicht möglich ist, die Beurteilung der Personensicherheit auf ein einzelnes Erträglichkeitskriterium zu reduzieren, das die anderen mit abdeckt,
- nur die Freisetzungen eines einzelnen, brennenden Gepäckstückes zu einer Überschreitung der Erträglichkeitskriterien führen können,
- mitbrennende Fahrzeugkomponenten zu kritischeren Zuständen führen,
- mitbrennende Fahrzeugkomponenten in den meisten Fällen von selbst verlöschen und
- bei speziellen geometrischen Konfigurationen allerdings auch eine rasche Brandausbreitung (Flashover) möglich ist.

Diese Untersuchung führt zu der Erkenntnis, dass der gegenwärtig präskriptiv geforderte Brandschutz in Schienenfahrzeugen die Auswirkungen eines Gepäckstückbrandes auf die Personensicherheit bei infrastrukturell bedingter Evakuierungsverzögerung nicht ausreichend berücksichtigt. Um die Sicherheit zu verbessern, werden Maßnahmen entwickelt und deren technische Realisierbarkeit sowohl hinsichtlich des Systems »Fahrzeug« als auch der umgebenden Infrastruktur diskutiert.

Abstract

Rail vehicles represent resource saving means of transportation which require special diligence in designing and operating primarily due to the high passenger densities and driving speeds. From a fire safety perspective the challenges consist in the unknown additional fire load brought on board by passengers as well as the rail infrastructure limiting evacuation feasibilities.

The current European harmonised fire safety standardisation for passenger trains focuses mainly on preventing ignition sources, regulating the vehicle component's fire behaviour as well as separating spaces with fire resistant barriers. Within the mandatory material and product testing an ignition model is partially used to reproduce the thermal impact of a burning piece of luggage. Since luggage accounts for a significant proportion of the total fire load inside a rail vehicle, and therefore, can be the crucial factor for a fire spread which may result in a flashover.

Although burning luggage represents a typical design scenario for passenger trains, profound knowledge of the energetic and especially material emissions to be typically expected with such an incident is rarely available. Moreover, it is unknown to which extent the toxic substances emitted from a burning piece of luggage affect the tenability conditions of exposed occupants.

Thus, a bipartite task definition emerges for this research: On the one hand the fire behaviour of a typical piece of luggage together with its characteristic emissions has to be experimentally determined. On the other hand these emissions inside a passenger rail coach have to be numerically simulated, and thereupon, the safety of passengers and staff has to be assessed with engineering methods.

A theoretical analysis of potential fire initiation scenarios as well as a retrospective examination of real fire incidents in rail vehicles prove that arson is the most common cause of fires in passenger areas. Furthermore, luggage may serve as a secondary ignition source as well as represents a non-negligible fire load. Hence, burning luggage pieces are used as ignition models or for design fires in standards and specific researches. However, information regarding material emissions, as toxic gases or smoke particles, is missing.

Abstract

For the experimental investigations a test configuration is developed to characterise the luggage's fire behaviour under conditions as close to reality as possible and to collect the required fire parameters. In preliminary tests selected ignition sources and configurations are applied to five identical pieces of luggage leading to the result that a standardised gas burner simulating the thermal impact of a crumpled newspaper is most suitable for the subsequent main tests. For these main tests eight pieces of luggage are identified and typified with respect to their nature and composition to analyse their fire performance.

The test results now enable to develop a model entirely describing the luggage's fire behaviour. This luggage design fire is represented in functional terms as a time-squared developing phase, a fully developed phase and a decaying phase. Besides the time-dependent heat release further functions for the emissions of both toxic gases and visibility impairing smoke particles are derived.

The new luggage design fire is transferred to a numerical environment together with the experimental test configuration. The comparison of the computed values to the test data indicates that the Fire Dynamics Simulator is able to reliably reproduce the energetic and material fire emissions of a luggage piece.

Accordingly, the luggage design fire serves as an initial fire and is implemented into the geometry of a passenger rail coach. A series of 37 simulations concentrates on 24 different fire scenarios. Therein, selected parameters are varied, such as the location of the initial fire, the ventilation conditions as well as the fire parameters and the corresponding pyrolysis models of the vehicle's interior materials. Beyond that, numerical grid resolutions and computing modes are examined to achieve efficient simulation performances.

The simulation results allow to assess personal safety on board by quantifying the thermal impact as well as the exposure towards toxic gases. The latter directly correlate to the smoke dispersal and are significantly influenced by the location of the initial fire inside the coach.

Abstract

Furthermore, the simulation results prove that

- assessing personal safety cannot be reduced to a single tenability criterion covering the others
- the emissions of solely one burning piece of luggage can lead to an exceedance of the tenability limits
- the vehicle's interior materials contributing to the fire lead to more critical conditions
- the combustible vehicle's interior materials appear self-extinguishing in most cases but
- specific geometrical configurations may result in a rapid fire spread (flash-over).

The findings of this research point out that the current prescriptive fire safety requirements for rail vehicles do not sufficiently cover the effect of burning luggage on personal safety in case of the rail infrastructure delays evacuation. To enhance safety, measures are developed and discussed with regard to their technical realisability for the system »vehicle« as well as for the surrounding infrastructure.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	III
Abstract	VII
Verzeichnisse	XVII
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XX
Formelzeichenverzeichnis	XXIII
1 Einführung und Zielsetzung	1
1.1 Besonderheiten des Brandschutzes in Personenzügen	1
1.2 Brandfälle in Schienenfahrzeugen	2
1.3 Aufgabenstellung	3
1.4 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Forschung zur Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen	7
2.1.1 EUREKA-Project FIRETUN, 1995	7
2.1.2 FIRESTARR, 1997 bis 2000	7
2.1.3 NIST – Fire Safety of Passenger Trains, 1999 bis 2004 . .	8
2.1.4 Metro Project, 2009 bis 2012	8
2.1.5 TRANSFEU Project, 2009 bis 2012	9
2.2 Brandschutzanforderungen und Zulassungsarten in Deutschland	10
2.2.1 Zulassungsarten von Schienenfahrzeugen	10
2.2.2 Normative Anforderungen an Schienenfahrzeuge	11
3 Entzündung von Schienenfahrzeugen	16
3.1 Brandentstehung in Schienenfahrzeugen	16
3.1.1 Theoretische Analyse von Brandentstehungsszenarien . .	16
3.1.2 Ursachen realer Brandereignisse	18
3.1.3 Der Einfluss von Reisegepäck	19
3.2 Zündmodelle für Schienenfahrzeuge	19
3.2.1 Kleine Zündinitiale	20

Inhaltsverzeichnis

3.2.2	Größere Zündinitiale (außer Gepäckstück)	21
3.2.3	Brennendes Gepäckstück als Zündinitial	23
4	Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden	27
4.1	Leistungsbasierte Nachweise der Personensicherheit	27
4.1.1	Rechtsverankerungen leistungsbasierter Bemessungen	27
4.1.2	Ingenieurmäßige Vorgehensweise	30
4.1.3	RSET vs. ASET – Die zeitliche Komponente	31
4.2	Ermittlung von RSET	31
4.2.1	Grundsätzliche Betrachtungen	31
4.2.2	Evakuierung von Schienenfahrzeugen	32
4.3	Ermittlung von ASET	33
4.3.1	Sichtverhältnisse	33
4.3.2	Rauchgastoxizität	35
4.3.3	Thermische Einwirkungen	36
5	Experimentelle Untersuchungen	40
5.1	Versuchsziele	40
5.1.1	Intention der Vorversuche	40
5.1.2	Intention der Hauptversuche	40
5.2	Versuchskonfiguration und Messtechnik	41
5.2.1	Erforderliche Brandkenngrößen	41
5.2.2	Versuchskonfiguration	42
5.2.3	Wärmefreisetzungsrate	43
5.2.4	Effektive Verbrennungswärme	46
5.2.5	Strahlungsdichte	47
5.2.6	Rauchgaskomponenten	47
5.2.7	Rauchgastransmission	49
5.2.8	Sicherheitsaspekte	51
5.2.9	Abschließende Beurteilung	52
5.3	Gepäckstücke	53
5.3.1	Gepäckstücke für Vorversuche	53
5.3.2	Gepäckstücke für Hauptversuche	53
5.4	Verwendete Zündinitiale	56
5.4.1	Zündinitial »kleine offene Flamme«	56
5.4.2	Zündinitial »T-Brenner«	57
5.4.3	Zündinitial »Quadratbrenner«	58
5.4.4	Zündinitial »Papierkissen«	59

Inhaltsverzeichnis

6	Versuchsergebnisse	60
6.1	Auswertung der Vorversuche	60
6.1.1	Übersicht	60
6.1.2	Beobachtungen	60
6.1.3	Wärmefreisetzungsrate	61
6.1.4	Auswahl eines Zündinitials für die Hauptversuche	62
6.1.5	Beurteilung der Wiederholbarkeit	63
6.2	Auswertung der Hauptversuche und Herleitung des Brandmodells	66
6.2.1	Übersicht	66
6.2.2	Beobachtungen	66
6.2.3	Wärmefreisetzungsrate	69
6.2.4	Gesamtwärmefreisetzung, effektive Verbrennungswärme .	72
6.2.5	Strahlungsdichte	73
6.2.6	Rauchgase	74
6.2.7	Rauchpartikel	81
6.2.8	Abluftvolumenstrom	84
6.3	Vergleich und Diskussion mit bestehenden Brandverlaufskurven	85
7	Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration	90
7.1	Brandsimulationsprogramm – Fire Dynamics Simulator (FDS) .	91
7.1.1	Überblick	91
7.1.2	Hydrodynamisches Modell	92
7.1.3	Wärmetransport	93
7.1.4	Modellierung von Pyrolyse und Verbrennung	93
7.1.5	Berechnungsmodi	98
7.1.6	Validierung von FDS	99
7.1.7	Anwendungsgrenzen von FDS	99
7.2	Modellierung der Experimentalkonfiguration	100
7.2.1	Intention	100
7.2.2	Geometrische Diskretisierung	101
7.2.3	Materialdaten	103
7.2.4	Brandmodell – Wärmefreisetzung	104
7.2.5	Brandmodell – Gasfreisetzung	104
7.2.6	Brandmodell – Rauchpartikelfreisetzung	108
7.2.7	Instrumentierung	109
7.2.8	Randbedingungen	110
7.2.9	Simulationsvarianten	110

Inhaltsverzeichnis

7.3	Simulationsergebnisse	112
7.3.1	Überblick	112
7.3.2	Wärmefreisetzungsrate	112
7.3.3	Strahlungsdichte	113
7.3.4	Toxische Rauchgaskomponenten	115
7.3.5	Rauchgastransmission	117
7.3.6	Zusammenfassende Beurteilung	118
8	Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug	120
8.1	Modellierung des Schienenfahrzeuges	120
8.1.1	Besonderheiten von Schienenfahrzeugen	120
8.1.2	Wahl des Brandszenarios	122
8.1.3	Geometrische Diskretisierung	124
8.1.4	Brennbare Komponenten	125
8.1.5	Nicht brennbare Komponenten	135
8.1.6	Thermisch induzierter Integritätsverlust von Verglasungen	135
8.1.7	Ventilationskonditionen	138
8.1.8	Branderkennung	139
8.1.9	Brandbekämpfungsmaßnahmen	140
8.1.10	Initialbrand	140
8.1.11	Instrumentierung	142
8.1.12	Randbedingungen	142
8.1.13	Simulationsvarianten	143
8.2	Simulationsergebnisse – Berechnungsmodus und Diskretisierung	146
8.2.1	Berechnungsmodus	146
8.2.2	Diskretisierung	148
8.3	Simulationsergebnisse – Pyrolysemethode »0«	152
8.3.1	Initialbrand im unteren Deck	153
8.3.2	Initialbrand im oberen Deck	156
8.3.3	Initialbrand im eingeschossigen Bereich	159
8.4	Simulationsergebnisse – Pyrolysemethode »2«	162
8.4.1	Initialbrand im unteren Deck	162
8.4.2	Initialbrand im oberen Deck	165
8.4.3	Initialbrand im eingeschossigen Bereich	169
8.4.4	Sensitivitätsuntersuchungen	172
8.5	Simulationsergebnisse – Pyrolysemethode »3«	176

Inhaltsverzeichnis

9	Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen	179
9.1	Einordnung und Bewertung der Simulationsergebnisse	179
9.1.1	Simulationen mit Pyrolysemethode »0«	179
9.1.2	Simulationen mit Pyrolysemethode »2«	181
9.1.3	Simulationen mit Pyrolysemethode »3«	184
9.1.4	Ergebnisbewertung im Kontext der Kernfragestellung	185
9.2	Diskussion von Empfehlungen und Maßnahmen	188
9.2.1	Brandverhalten von Materialien	188
9.2.2	Maßnahmen zur Entrauchung	189
9.2.3	Anlagentechnische Brandbekämpfung	190
10	Fazit und Ausblick	193
10.1	Fazit	193
10.2	Ausblick	194
	Glossar	197
	Literaturverzeichnis	199
	ANHANG	223
A	Ergänzende Experimentaldaten	223
A.1	Versuchsbedingungen	223
A.2	Wärmefreisetzung eines Papierkissens nach DIN 54341	223
A.3	Gepäckstücke der Vorversuche	224
A.4	Gepäckstücke der Hauptversuche	227
B	Ergänzende Simulationsdaten	246
B.1	Experimentalkonfiguration	246
B.2	Schienenfahrzeug – Ergänzende Eingabeparameter	247
B.3	Schienenfahrzeug – Pyrolysemethode »0« (inerte Materialien)	248
B.3.1	Zündinitial im unteren Deck	248
B.3.2	Zündinitial im oberen Deck	249
B.3.3	Zündinitial im eingeschossigen Bereich	250
B.4	Schienenfahrzeug – Pyrolysemethode »2«	251
B.4.1	Zündinitial im unteren Deck	251
B.4.2	Zündinitial im oberen Deck	252
B.4.3	Zündinitial im eingeschossigen Bereich	253

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beförderte Personen im Schienenverkehr in Deutschland	1
3.1	Systematik der Brandentstehung in Schienenfahrzeugen	18
3.2	Zündmodelle, die Gepäckstückbrände repräsentieren sollen	26
4.1	Schematische Darstellung von ASET und RSET	31
4.2	Erträglichkeit gegenüber Wärmestrahlung und Konvektion	39
5.1	CAD-Ansicht und Foto der Versuchskonfiguration	42
5.2	Front- und Seitenansicht des Aufbaus in CAD	43
5.3	Schema der Gasentnahme und IR-Messung nach ISO 9705-2	48
5.4	Inhalte und fertige Taschen für die Vorversuche	53
5.5	Gepäckstück »Geschäftsreise«	54
5.6	Gepäckstück »Reisendes Kind«	54
5.7	Gepäckstück »Reisende Dame«	55
5.8	Gepäckstück »Reisender Herr«	55
5.9	Gepäckstück »Strandurlaub«	55
5.10	Gepäckstück »Winterurlaub«	55
5.11	Gepäckstück »Reisende Seniorin«	55
5.12	Gepäckstück »Reisender Senior«	55
5.13	Zündinitial »Kleine offene Flamme«	57
5.14	Zündinitial »T-Brenner«	57
5.15	Zündinitial »Quadratbrenner«	58
5.16	Zündinitial »Papierkissen«	59
6.1	Wärmefreisetzungsrate der Vorversuche	62
6.2	»Hauptversuch 1«, Impressionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten	68
6.3	»Hauptversuch 2«, Impressionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten	68
6.4	»Hauptversuch 3«, Impressionen zu unterschiedlichen Zeitpunkten	68
6.5	Wärmefreisetzungsrate der Hauptversuche und Bemessungskurve	72
6.6	Strahlungsdichte der Hauptversuche	74
6.7	CO ₂ -Freisetzungsrate der Hauptversuche und Bemessungskurve	76
6.8	CO-Freisetzungsrate der Hauptversuche und Bemessungskurve	78
6.9	CO ₂ /CO-Verhältnis der Hauptversuche	79

Abbildungsverzeichnis

6.10 HCl-Freisetzungsraten der Hauptversuche und Bemessungskurve	80
6.11 Rauchpartikel-Entstehungsanteile der Hauptversuche	82
6.12 Raucherzeugungsraten der Hauptversuche	84
6.13 Abluftvolumenströme der Hauptversuche	84
6.14 Entwickelter Bemessungsbrand und weitere Brandmodelle	89
7.1 Systematik der Modelle zur Brandsimulation	91
7.2 Zustandsbeziehungen des Mischungsbruches für Methan	97
7.3 Schrägansicht des geometrischen Simulationsmodells (CAD) . .	103
7.4 Schrägansicht des geometrischen Simulationsmodells (Pyrosim) .	103
7.5 Rauchpartikel-Freisetzungen der Hauptversuche und der Simulation	109
7.6 Hauptversuch 4 und Simulation zum Zeitpunkt $t = 18$ min . . .	112
7.7 Strahlungsdichten der Hauptversuche und der Simulationen . . .	114
7.8 Ermittlung von Experimentaldaten und numerische Umsetzung	115
7.9 CO ₂ -Konzentrationen der Hauptversuche und der Simulationen .	116
7.10 Transmissionen der Hauptversuche und der Simulationen	118
8.1 Geometrie des verwendeten Doppelstockwagens	122
8.2 Sitz F1A-1-2: Wärmefreisetzung bei Bestrahlung	127
8.3 Wandverkleidung: Wärmefreisetzung bei Bestrahlung	131
8.4 Schnittansicht der modellierten Fahrzeuggeometrie	141
8.5 Berechnungsmodus – Wärmefreisetzungsraten der Simulationen	147
8.6 Berechnungsmodus – CO ₂ -Gehalte der Simulationen	147
8.7 Diskretisierung – Wärmefreisetzungsraten der Simulationen . . .	149
8.8 Diskretisierung – CO ₂ -Gehalte der Simulationen	150
8.9 Rauchverteilung der Simulation »0LC«, $t = 4$ min	153
8.10 Rauchverteilung der Simulation »0LC«, $t = 8$ min	153
8.11 Rauchgastoxizität der Simulationen »0LC« und »0LO«	154
8.12 Temperaturen, Strahlung der Simulationen »0LC« und »0LO« .	155
8.13 Rauchverteilung der Simulation »0UC«, $t = 4$ min	156
8.14 Rauchverteilung der Simulation »0UC«, $t = 8$ min	156
8.15 Wärmefreisetzungen der Simulationen »0«	157
8.16 Rauchgastoxizität der Simulationen »0UC« und »0UO«	158
8.17 Temperaturen und Strahlung der Simulationen »0UC« und »0UO«	158
8.18 Rauchverteilung der Simulation »0FC«, $t = 4$ min	159
8.19 Rauchverteilung der Simulation »0FC«, $t = 8$ min	159
8.20 Rauchgastoxizität der Simulationen »0FC« und »0FO«	160
8.21 Temperaturen und Strahlung der Simulationen »0FC« und »0FO«	161

Abbildungsverzeichnis

8.22 Simulation »2LC« bei $t = 180$ s und $t = 235$ s	163
8.23 Wärmefreisetzen der Simulationen »2LC« und »2LO«	163
8.24 Rauchgastoxizität der Simulationen »2LC« und »2LO«	164
8.25 Temperaturen und Strahlung der Simulationen »2LC« und »2LO«	165
8.26 Simulation »2UC« bei $t = 180$ s und $t = 200$ s	166
8.27 Wärmefreisetzen der Simulationen »2UC« und »2UO«	167
8.28 Rauchgastoxizität der Simulationen »2UC« und »2UO«	168
8.29 Temperaturen und Strahlung der Simulationen »2UC« und »2UO«	168
8.30 Simulation »2FC« bei $t = 200$ s und $t = 215$ s	170
8.31 Wärmefreisetzen der Simulationen »2FC« und »2FO«	170
8.32 Rauchgastoxizität der Simulationen »2FC« und »2FO«	171
8.33 Temperaturen und Strahlung der Simulationen »2FC« und »2FO«	171
8.34 Fahrzeuggeometrie: Außenansicht und Schnittansicht	173
8.35 Wärmefreisetzen der Simulationen »2« und »3«	177
8.36 Simulation »3FC« bei $t = 322$ s und $t = 681$ s	178
9.1 Wärmefreisetzen der Simulationen »2«	182
A.1 Wärmefreisetzungsrates eines Papierkissens nach DIN 54341	223
B.1 Wärmefreisetzungsrates der Simulationsvarianten	246
B.2 Rauchgastoxizität der Simulation »0LC«	248
B.3 Temperaturen und Strahlungsdichten »0LC«	248
B.4 Rauchgastoxizität der Simulation »0UC«	249
B.5 Temperaturen und Strahlungsdichten »0UC«	249
B.6 Rauchgastoxizität der Simulation »0FC«	250
B.7 Temperaturen und Strahlungsdichten »0FC«	250
B.8 Rauchgastoxizität der Simulation »2LC«	251
B.9 Temperaturen und Strahlungsdichten »2LC«	251
B.10 Rauchgastoxizität der Simulation »2UC«	252
B.11 Temperaturen und Strahlungsdichten »2UC«	252
B.12 Rauchgastoxizität der Simulation »2FC«	253
B.13 Temperaturen und Strahlungsdichten »2FC«	253

Tabellenverzeichnis

2.1	Bauartklassen für Schienenfahrzeuge nach DIN EN 45545	12
2.2	Betriebsklassen und Fahranforderungen nach DIN EN 45545	13
2.3	Zuordnung der Gefährdungsstufen nach DIN EN 45545	13
3.1	»Kleine« Zündinitiale für Schienenfahrzeuge und -komponenten	20
5.1	Experimentell zu erfassende Brandkenngrößen	41
6.1	Übersicht über die Vorversuche	60
6.2	Eignungsbewertung ausgewählter Zündinitiale	63
6.3	Ausgewählte Parameter der Vorversuche »2« und »5«	64
6.4	Übersicht über die Hauptversuche	66
6.5	Gesamtwärmefreisetzung, mittlere effektive Verbrennungswärme	73
6.6	Kohlendioxid-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe	77
6.7	Kohlenmonoxid-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe	79
6.8	Rauchpartikel-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe	83
7.1	Thermophysikalische Materialdaten für die Brandsimulation	103
7.2	Randbedingungen der Simulation	110
7.3	Übersicht über die Simulationsvarianten	111
8.1	Kenndaten des verwendeten Doppelstockwagens	123
8.2	Reaktionspfade der Sitzmaterialien	128
8.3	Reaktionsparameter der Sitzmaterialien	128
8.4	Thermophysikalische Daten der Sitzmaterialien	129
8.5	Reaktionspfade der Wandverkleidungsmaterialien	131
8.6	Reaktionsparameter der Wandverkleidungsmaterialien	132
8.7	Thermophysikalische Daten der Wandverkleidungsmaterialien	132
8.8	Reaktionsparameter der Deckenverkleidung	133
8.9	Thermophysikalische Daten der Deckenverkleidung	133
8.10	Reaktionsparameter des Bodenbelags	134
8.11	Thermophysikalische Materialdaten des Bodenbelags	134
8.12	Thermophysikalische Daten nicht brennbarer Komponenten	135
8.13	Randbedingungen der Simulation	143
9.1	ASET für die Simulationen mit Pyrolysemethode »0«	181
9.2	ASET für die Simulationen mit Pyrolysemethode »2«	183
A.1	Vorversuch 1 – »Reisetasche C«	224

Tabellenverzeichnis

A.2 Vorversuch 2 – »Reisetasche E«	224
A.3 Vorversuch 3 – »Reisetasche B«	225
A.4 Vorversuch 4 – »Reisetasche A«	225
A.5 Vorversuch 5 – »Reisetasche D«	226
A.6 Hauptversuch 1 – Gepäckstück »Strandurlaub«	227
A.7 Hauptversuch 2 – Gepäckstück »Reisender Herr«	229
A.8 Hauptversuch 3 – Gepäckstück »Geschäftsreise«	231
A.9 Hauptversuch 4 – Gepäckstück »Winterurlaub«	234
A.10 Hauptversuch 5 – Gepäckstück »Reisende Seniorin«	236
A.11 Hauptversuch 6 – Gepäckstück »Reisendes Kind«	239
A.12 Hauptversuch 7 – Gepäckstück »Reisende Dame«	241
A.13 Hauptversuch 8 – Gepäckstück »Reisender Senior«	244
B.1 Raumluftechnische Anlage des Doppelstockwagens	247

Formelzeichenverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
A	Präexponentieller Faktor	s^{-1}
C	Proportionalitätskonstante	–
c	Konzentration	$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
c	Spezifische Wärmespeicherkapazität	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
C_s	Korrekturfaktor für die Rauchpartikelkonzentration	–
D^*	Charakteristischer Branddurchmesser	m
d	Schichtdicke	m
E	Wärmefreisetzung pro Masseneinheit	$\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$
E	Aktivierungsenergie	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
F	Erträglichkeits-Konzentration der Gaskomponente	$\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
g	Erdbeschleunigung	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
Δh_c	Heizwert	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$\Delta h_{c,\text{eff}}$	Effektive Verbrennungswärme	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Δh_r	Reaktionswärme	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
$I_{\lambda,0}$	Intensität des ausgesendeten Lichtstrahls	–
I_λ	Intensität des empfangenen Lichtstrahls	–
K	Extinktionskoeffizient	m^{-1}
K_m	Spezifischer Extinktionskoeffizient	$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
k_t	Korrekturfaktor für den Massenstrom	–
k_p	Korrekturfaktor für die Reynolds-Zahl	–
l	Weglänge	m
M	Molare Masse	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom; Massenverlustrate; Abbrandrate	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
\dot{m}''	Flächenspezifische Freisetzungs- bzw. Abbrandrate	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

Formelzeichenverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
Δm	Massenverlust	kg
n	Ordnungszahl der Reaktion	–
p	Druck	Pa
Δp	Druckdifferenz	Pa
\dot{Q}	Wärmestrom	kW
\dot{q}	Spezif. Wärmestrom; spezif. Wärmefreisetzungsrate	kW · m ⁻²
R	Universelle Gaskonstante	J · mol ⁻¹ · K ⁻¹
RH	Relative Luftfeuchtigkeit	%
r	Reaktionsrate	s ⁻¹
S	Erkennungsweite	m
T	Temperatur	°C bzw. K
t	Zeit	s
Δt	Zeitinkrement, Zeitraum	s
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ · s ⁻¹
v	Geschwindigkeit	m · s ⁻¹
x	Mengenanteil	mol · mol ⁻¹
x_{FEC}	Fraktionelle effektive Konzentration	–
x_{FED}	Fraktionelle effektive Dosis	–
δx	Nominelle Zellgröße	m
Y	Massenanteil	–
Z	Mischungsbruch	–
α	Reaktionsbedingter Ausdehnungsfaktor	–
α	Brandentwicklungsparameter	kW · s ⁻²
ϵ	Emissivität	–
λ	Wellenlänge	µm
ν	Stoffanteil	–
ν_{CO_2}	Atemfrequenz-Erhöpfungsfaktor	–

Formelzeichenverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
ρ	Massendichte	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Φ	Sauerstoffverbrauchs-Faktor	–
φ	Konzentration der Gaskomponente	$\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
χ	Verbrennungseffektivität	–
Ψ	Komponenten-Entstehungsanteil	–

Kapitel 1

Einführung und Zielsetzung

Die schienengebundene Personenbeförderung nimmt in der heutigen, global orientierten und mobilen Gesellschaft einen hohen Stellenwert ein. Nicht nur unter dem Aspekt klimapolitischer Ziele, sondern vielmehr in der Anzahl beförderter Personen, die bei zusammenwachsenden Städten und Regionen mit dem Individualverkehr zunehmend an Grenzen gerät. [37]

Abbildung 1.1 zeigt den Anstieg der Zahl beförderter Personen im Schienenverkehr in Deutschland, dessen Tendenz vornehmlich durch den *Nahverkehr* repräsentiert wird. Dem gegenüber sind die Zahlen im *Fernverkehr* nahezu konstant.

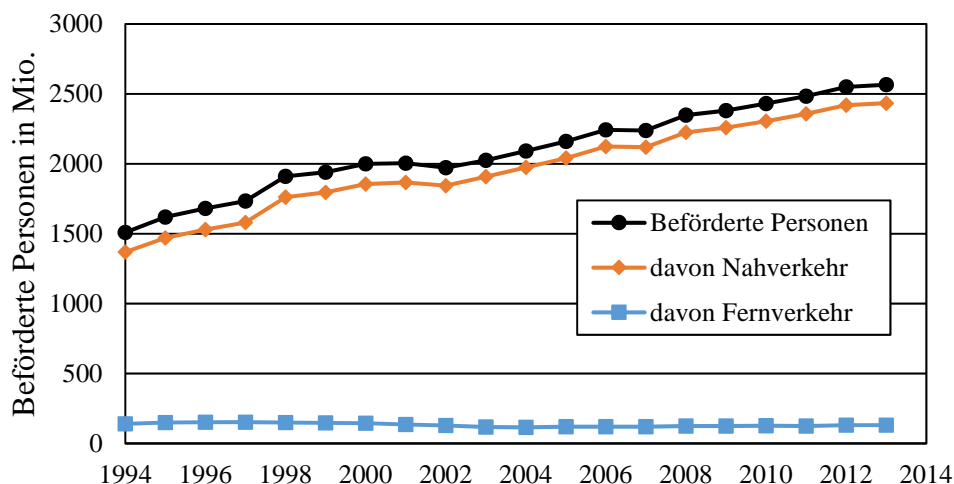


Abbildung 1.1: Beförderte Personen im Schienenverkehr in Deutschland [199]

1.1 Besonderheiten des Brandschutzes in Personenzügen

Der Schienenpersonenverkehr und dessen sicherheitstechnische Aspekte haben Besonderheiten und Alleinstellungsmerkmale gegenüber anderen Beförderungsmitteln oder baulichen Anlagen. Hinsichtlich des Brandschutzes bilden *Schienenfahrzeuge* ein in sich abgeschlossenes System [51] und in Triebzügen ohne räumliche Unterteilung halten sich zeitgleich mehrere 100 Fahrgäste auf, die im Brandfall nicht unmittelbar einen Ort »absoluter Sicherheit« aufsuchen können. Demzufolge

machen es die Streckenverhältnisse, wie Tunnel, Aufständungen, etc., erforderlich, dass sich Fahrgäste in einem (verrauchenden) Personenzug bis zu 15 min aufhalten müssen, bevor ein sicherer Bereich erreicht und eine *Evakuierung* durchgeführt werden kann [81].

1.2 Brandfälle in Schienenfahrzeugen

Schienenfahrzeuge verfügen in Europa über einen relativ hohen Sicherheitsstandard und zählen zu den sichersten Transportmitteln¹. Kommt es dennoch zu einem Unfall, liegt darunter der Anteil der signifikanten² Brandereignisse (nur) im einstelligen Prozentbereich³. Die European Railway Agency listet für die Jahre 2007 bis 2012 insgesamt 318 signifikante Brandereignisse in Personenzügen in der Europäischen Union [109, 110, 111]. Laut einer Schätzung des Brandschutzbeauftragten der Deutschen Bahn aus dem Jahr 2013 kommt es dort jährlich zu ca. 50 bis 60 Brandereignissen, die auch kleine Brände ohne nennenswerten Schaden einschließen [138].

In jüngerer Vergangenheit ist es auch zu terroristisch geprägten (Brand-)Anschlägen mit Sprengsätzen in Schienenfahrzeugen gekommen:

- 2005 London – 56 Tote, ca. 700 Verletzte nach Sprengsätzen,
- 2004 Madrid – 191 Tote, ca. 1800 Verletzte nach Sprengsätzen,
- 2004 Moskau – insg. 52 Tote nach Sprengsätzen. [136]

Terroranschläge, deren Intention es ist, vorsätzlich und systematisch hohen Schaden (Personen, Sachwerte, Betriebsstörungen, Angst) herbeizuführen, liegen jedoch nicht im Fokus dieser Untersuchung.

Die folgende Auflistung enthält ausgewählte, nicht terroristische Brandereignisse in Personenzügen, bei denen in den letzten Jahren, neben hohen Sachschäden, vor allem hohe Opferzahlen zu beklagen waren [126, 136, 169, 185, 209, 214]:

- 2012 Nellore (Indien) – 32 Tote nach vermutlich elektrischem Defekt,
- 2008 Sofia – 9 Tote, 10 Verletzte, Brandursache unklar,

1 Die Wahrscheinlichkeit eines Unfalls mit Todesfolge pro Milliarden Passagier-Kilometern war in den Jahren 2008 bis 2012 bei Schienenfahrzeugen mit 0,13 nach dem Luftverkehr (0,06) am zweit geringsten und damit niedriger als bei (Reise-)Bussen (0,20) und Pkw (3,14), die sich ihrerseits um mehr als den Faktor zehn unterscheiden [111].

2 Ereignis im/am fahrenden Fahrzeug mit mindestens einer getöteten oder schwer verletzten Person bzw. einem Sachschaden von mindestens 150.000 € [111]

3 3 % im Jahr 2007, 1 % in den Jahren 2010 bis 2012 [110, 111]

Kapitel 1 – Einführung und Zielsetzung

- 2006 Luxemburg – 20 Verletzte nach Brandstiftung,
- 2003 Ladhawal (Indien) – 39 Tote, 15 Verletzte nach elektrischem Defekt,
- 2003 Daegu (Südkorea) – 192 Tote, 148 Verletzte nach Brandstiftung,
- 2002 Nancy (Frankreich) – 12 Tote, 8 Verletzte, Brand durch Gepäck auf Herd,
- 2002 Al Ayyat (Ägypten) – 383 Tote, Brandentstehung durch Gaskocher,
- 2000 Kaprun (Österreich) – 155 Tote, Brandentstehung durch Heizlüfter,
- 1995 Baku (Aserbaidshan) – 285 Tote, 265 Verletzte nach elektrischem Defekt.

1.3 Aufgabenstellung

Das Ziel verschiedener, teils internationaler Forschungsprojekte zur Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen⁴ bestand darin, das Brandverhalten konstruktiv eingesetzter Materialien und Produkte, wie etwa Verkleidungen, Sitzen und elektrotechnischer Ausrüstung, festzustellen und zu klassifizieren.

Aus Untersuchungen vergangener Brandereignisse in Personenzügen, wie beispielsweise der verheerenden Brände in Baku 1995 mit über 500 Toten und Schwerverletzten und Kaprun 2000 mit 155 Toten⁵, wird jedoch deutlich, dass auch brennbare Gegenstände, die von Fahrgästen mitgeführt werden, ein Brandszenario signifikant beeinflussen können [26, 136, 171]. Aktuelle Auswertungen zeigen, dass Reisegepäck bis zu 50 % der gesamten Brandlast innerhalb eines Schienenfahrzeuges ausmachen und somit der auslösende Faktor für eine Brandausbreitung bis hin zur Durchzündung des Raumes (*Flashover*) sein kann [136, 161, 164, 171]. Allerdings wurde der Einfluss von Reisegepäck auf die Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen in der Mehrzahl der in der Vergangenheit hierzu durchgeführten Forschungsprojekte⁶ nicht oder nur in sehr geringem Umfang bzw. pauschalisiert berücksichtigt:

Schlussendlich besteht die größte Unbekannte hinsichtlich der Materialien in einem Zug in dem Gepäck, das in den Waggon eingebracht wird. Gepäck kann viele verschiedene Materialien enthalten, die drastisch in Zusammenstellung, Dichte, Menge und Brennbarkeit variieren. Aufgrund des hohen Grades der Variabilität und des Informationsdefizits das Brandverhalten zu beschreiben, wird Gepäck in dieser Analyse nicht berücksichtigt. [196]

Hinsichtlich der Auslegung von Schienenfahrzeugen nach europäisch harmonisierter Norm EN 45545⁷ kommen verschiedene *Zündmodelle* zur Anwendung, die auch

⁴ vgl. Abschnitt 2.1

⁵ vgl. Abschnitt 1.2

⁶ vgl. Abschnitt 2.1

⁷ vgl. Abschnitt 2.2.2

brennendes Reisegepäck berücksichtigen: So existiert neben kleineren *Zündquellen*, wie Streichhölzern, Zigaretten, Gasfeuerzeugen, angezündeten Zeitungen oder technischen Defekten, auch ein Modell, das größere anzunehmende *Zündinitiale*, wie ein brennendes Gepäckstück, darstellen soll [81]. Der dafür vorgesehene zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung⁸ wurde im Forschungsprojekt FIRESTARR⁹ aus Brandversuchen an einzelnen Polstersitzen aus Schienenfahrzeugen abgeleitet [29].

Weitere, variierende Wärmefreisetzungskurven, die ein brennendes Gepäckstück als Zündinitial für einen Fahrzeugbemessungsbrand abbilden, finden sich national auch im »Entwurf der Technischen Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen (TRStrab Brandschutz)« [38] und in den Richtlinien für die Auslegung von S-Bahnen und den gemischten Reisezugverkehr [125]. Auch in der ARGE-Richtlinie zur Funktionsnachweisführung von stationären Anlagen zur Brandbekämpfung in Schienenfahrzeugen wird eine Reisetasche als Referenzbrandlast herangezogen [13]. Allerdings werden stoffliche Emissionen des jeweiligen brennenden Gepäckstückes, wie toxische und sichttrübende Komponenten, die neben der Wärmefreisetzung einen Brand typisieren, sowohl im Zündmodell nach EN 45545 als auch in den nationalen Regelungen und Richtlinien nicht dargestellt.

Zusammenfassend sind das Brandverhalten von Reisegepäck als Zündinitial und die weiteren Auswirkungen bei Bränden in Fahrzeugen bisher vergleichsweise wenig erforscht. Die stofflichen Emissionen solcher Brände, unter denen toxisch und sichttrübend wirkende Substanzen in gasförmiger, flüssiger und fester Form zu verstehen sind, kommen in den aktuellen Regelwerken nicht zur Anwendung. [38, 81, 125, 171, 227]

Kernfragen, die bezüglich dieser Problematik zu stellen sind, lauten:

- Wie lässt sich das Brandverhalten repräsentativer Reisegepäckstücke bezüglich ihrer Wärmefreisetzung sowie der Emission toxischer und sichttrübender Substanzen charakterisieren?
- Welchen Effekt hat ein Gepäckbrand in einem Schienenfahrzeug hinsichtlich a) der Personensicherheit und b) der Brandausbreitung?

Der folgende Abschnitt konkretisiert die zur Beantwortung dieser Fragen erforderlichen Teiluntersuchungen und zeigt zugleich die Struktur dieser Ausarbeitung auf.

⁸ vgl. Abschnitt 3.2.3

⁹ vgl. Abschnitt 2.1

1.4 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit

Kapitel 2 erfasst zunächst den Stand der Technik bezüglich der Brandsicherheit im schienengebundenen Personenverkehr. Dieser basiert maßgeblich auf den Erkenntnissen internationaler Forschungsprojekte und stellt sich anhand geltender europäischer sowie nationaler Rechtsnormen und die konkrete Anwendung in fachspezifischen, anerkannten Regeln der Technik dar.

Kapitel 3 beleuchtet die Mechanismen der Brandentstehung in Schienenfahrzeugen mit dem Ziel, typische Zündvorgänge zu ermitteln und die Verknüpfung zu Reisegepäck herauszuarbeiten. Auf eine theoretische Analyse potentieller Zündszenarien folgt eine statistische Betrachtung tatsächlicher Brandereignisse, bei welcher auch der Einfluss von Reisegepäck Berücksichtigung findet. Die modellhafte Abbildung realer Zündinitiale für Schienenfahrzeuge bildet die Grundlage für brandtechnologische Produktprüfungen und Realbrandversuche. Bereits bestehende Zündmodelle für Schienenfahrzeuge finden sich in spezifischen Normen und Forschungsarbeiten.

Zurzeit befinden sich die Brandschutzanforderungen im Schienenverkehr und damit auch die Möglichkeiten für leistungsorientierte Bemessungen mit numerischen Methoden im Wandel. Brandschutzingenieurverfahren, darunter fällt auch der Einsatz numerischer Simulationsmodelle, finden bei der Auslegung verschiedener sicherheitsrelevanter Systeme und Strukturen vermehrt Anwendung. **Kapitel 4** gibt einen Überblick über die Möglichkeiten von Ingenieurmethoden als Werkzeug zur Nachweisbringung im Sinne der Personensicherheit sowie die Methoden leistungsorientierter Bemessungsansätze in verschiedenen Sektoren. Der Fokus richtet sich hierbei insbesondere auf das Ziel, Ingenieurmethoden zur Bewertung der Personensicherheit in brennenden Schienenfahrzeugen einzusetzen.

Kapitel 5 beschreibt die experimentellen Untersuchungen. Dazu werden real anzunehmende Reisegepäckstücke identifiziert und hinsichtlich ihrer Beschaffenheit und Komposition typisiert. Die Experimentalserie »Vorversuche« verfolgt die Intention, anhand identischer Gepäckstücke den Einfluss variierender primärer Zündquellenintensitäten und -konfigurationen zu analysieren. Im Rahmen der »Hauptversuche« werden daraufhin die Brandkenngrößen repräsentativ für acht Gepäckstücke mit dem als geeignet festgestellten primären Zündinitial ermittelt. Aus energetischer Sicht sind hier in erster Linie die Wärmefreisetzungsraten sowie die emittierte Strahlungsdichte und als stoffliche Messgrößen die Transmission der Rauchgase sowie die Konzentrationen toxisch relevanter Leitgase von Bedeutung.

In **Kapitel 6** erfolgt die Darstellung der experimentell ermittelten Ergebnisse der Vorversuche, auf deren Basis das geeignete Zündinitial für die Hauptversuche ausgewählt wird. Daraufhin werden die Hauptversuche präsentiert, aus denen das typische Brandverhalten von Gepäck abgeleitet wird. Im Anschluss wird dieses Modell mit bereits existierenden Verlaufskurven, die einen Gepäckstückbrand repräsentieren sollen, verglichen.

In **Kapitel 7** wird zunächst das für die numerischen Untersuchungen verwendete Brandsimulationsprogramm »Fire Dynamics Simulator« (FDS) vorgestellt. Im Fokus liegen dabei grundsätzliche Programmeigenschaften und Modellannahmen sowie spezifische Funktionen, die für die nachfolgenden Simulationsrechnungen von besonderem Interesse sind. Daran schließt sich die Umsetzung der in den vorhergehenden Kapiteln thematisierten Experimentalkonfiguration und des neu entwickelten Brandmodells in FDS an. Es gilt, anhand ausgewählter Beurteilungskriterien zu prüfen, ob FDS die energetischen und materiellen Emissionen eines typischen Gepäckstückbrandes in geeigneter Weise abbildet.

Daraufhin wird in **Kapitel 8** das bereits numerisch umgesetzte Gepäckstück-Brandmodell als Zündinitial in ein virtuelles Schienenfahrzeug implementiert, um anhand ausgewählter Szenarien mit variierenden Randbedingungen und Simulationsparametern die Auswirkungen eines Gepäckbrandes vor dem Hintergrund der Kernfragestellungen zu untersuchen. Im Fokus stehen hierbei insbesondere der Aufstellort des Initialbrandes, die Modellierung des Brandverhaltens der Fahrzeugkomponenten sowie die vorherrschenden Ventilationskonditionen. Auf der Basis zusätzlicher Simulationsvarianten wird das Sensitivitätsverhalten charakteristischer Parameter im Detail analysiert.

In **Kapitel 9** werden Erkenntnisse diskutiert eine Bewertung der Personensicherheit anhand der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik vorgenommen. Ferner werden Empfehlungen und Maßnahmen zur Minderung der Szenarien und deren Auswirkungen entwickelt und insbesondere unter dem Aspekt der technischen Realisierbarkeit beleuchtet.

Kapitel 10 fasst die wesentliche Erkenntnis dieser Forschungsarbeit im Sinne der Aufgabenstellung zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Fragestellungen zur Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen, die im Rahmen dieser Untersuchung aufgeworfen werden, jedoch bisher nicht abschließend zu beantworten sind.

Kapitel 2

Stand der Technik der Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen

Das vorliegende Kapitel erfasst den Stand der Technik im Kontext der Brandsicherheit im schienengebundenen Personenverkehr. Dieser basiert maßgeblich auf den Erkenntnissen internationaler Forschungsprojekte und stellt sich anhand geltender europäischer sowie nationaler Rechtsnormen und die konkrete Anwendung in fachspezifischen, anerkannten Regeln der Technik dar.

2.1 Internationale Forschung zur Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen

Die Untersuchung des Brandverhaltens von Schienenfahrzeugen erfährt in den letzten Jahrzehnten wachsendes Interesse und findet sich in verschiedenen internationalen Forschungsvorhaben wieder:

2.1.1 EUREKA-Project FIRETUN, 1995

Im Rahmen dieses öffentlich geförderten Forschungsprojektes wurden von den neun beteiligten europäischen Nationen Laborbrandprüfungen und originalmaßstäbliche Brandversuche an Zügen in Tunnelanlagen durchgeführt. Die Ziele des Projektes bestanden darin, die Möglichkeiten eines optimierten Personen- und Sachwerteschutzes im Brandfall in unterirdischen Verkehrsanlagen zu untersuchen und die strategischen Varianten für Rettungskräfte im Hinblick auf die Personenrettung und die Brandbekämpfung in Tunneln zu analysieren. Erkenntnisse konnten zur interaktiven Abhängigkeit von Brandquellen, Brandlasten und Tunnelgegebenheiten einschließlich der vorherrschenden Ventilationsbedingungen gewonnen werden. Auch Rauch- und Temperaturverteilungen entlang des Tunnels in verschiedenen Querschnitten wurden detektiert. [210, 222]

2.1.2 FIRESTARR, 1997 bis 2000

Ein Konsortium, zusammengesetzt aus Instituten und Einrichtungen sieben europäischer Länder, befasste sich mit dem Forschungsprogramm »Fire Standardisation Research of Railway Vehicles« (FIRESTARR). Es wurde als europäi-

ches Gemeinschaftsprojekt eingerichtet, um die europäischen Normungskomitees CEN/CENELEC bei dem Entwurf des Teil 2 »Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten« des siebenteiligen europäischen Standards EN 45545 »Brandschutz in Schienenfahrzeugen« zu unterstützen.

Schwerpunkte der experimentellen Untersuchungen im kleinen und mittleren Maßstab sowie der Großbrandversuche an Wagenteilkonfigurationen waren, wahrscheinliche Brandszenarien in Personenzügen zu identifizieren, Brandrisiken zu beurteilen und das Brandverhalten von Materialien und Komponenten zu bewerten. Darauf basierend wurden Brandprüfmethoden ausgewählt, bei denen Brandparameter, wie Zündung, Dauer bis zum Vollbrand (Flashover), Sichtverlust und letale Bedingungen für Wageninsassen, Berücksichtigung fanden. Für definierte Betriebskategorien von Personenzügen wurde ein Klassifizierungssystem zur Einstufung des Brandverhaltens für wagenbauliche Bestandteile, Komponenten der Inneneinrichtung und elektrotechnische Produkte mit zugehörigen Brandprüfungen zur Anwendung in der europäisch harmonisierten Norm entwickelt. [29, 58, 222]

2.1.3 NIST – Fire Safety of Passenger Trains, 1999 bis 2004

Ein drei Phasen umfassendes US-Forschungsprogramm wurde vom National Institute of Standards and Technology (NIST) durchgeführt, um die Anwendbarkeit von Brandprüfmethoden und Techniken der Risikoanalyse, die auf der Wärmefreisetzungsraten basieren, bezüglich der Brandsicherheit in Personenzügen zu untersuchen. Hierzu wurden Wärmefreisetzungsraten aus Kleinbrandversuchen ermittelt, um das materialspezifische Brandverhalten zu bestimmen (Phase I). Anschließend kamen Zonen-Brandmodelle zur Anwendung, um mit den generierten Daten im Rahmen einer Risikoanalyse verfügbare und benötigte Evakuierungszeit von Personen aus Zügen anhand von Temperaturen und Sichtweiten zu bewerten (Phase II). Die Verifizierung des verwendeten t^2 -Brandmodells als alternativer Bemessungsansatz für Schienenfahrzeuge erfolgte mit originalmaßstäblichen Brandversuchen (Phase III). [58, 196, 222]

2.1.4 Metro Project, 2009 bis 2012

Das schwedische Forschungsprojekt über Brände und Explosionen in unterirdischen Verkehrsanlagen verfolgte das Ziel, Metro-Systeme sicher zu gestalten und so wurden Empfehlungen hinsichtlich Brandsicherheit, Explosionsschutz, Evakuierung und Rettungsoperationen generiert. Der Fokus lag hierbei auf der Entwicklung von Bemessungsbränden, mathematischen Modellen und Möglichkeiten der

Kapitel 2 – Stand der Technik

Erfassung von Temperaturen und stofflichen Komponenten. In praktischer Anwendung wurden einzelne Gegenstände brandtechnologisch betrachtet, eine Serie modellmaßstäblicher Experimente sowie Brandversuche im Originalmaßstab, auch an realen Fahrzeugen in einem Tunnel, durchgeführt und Korrelationsmodelle abgeleitet. Aspekte wie Evakuierung, Entrauchung von Fahrzeugen und unterirdischen Haltestellen, außergewöhnliche Einwirkungen auf die Fahrzeugstruktur im Sinne von Explosionen, Rettungs- und Brandbekämpfungsmöglichkeiten waren ebenfalls Bestandteile der breit angelegten Untersuchung. [136]

2.1.5 TRANSFEU Project, 2009 bis 2012

Am Projekt TRANSFEU »Transport Fire Safety Engineering in the European Union« beteiligten sich Forschungs- und Brandprüfinstitute, Fahrzeughersteller und -betreiber aus zehn europäischen Nationen. Das von der Europäischen Union geförderte Vorhaben verfügte über ein Budget von 5,5 Mio. Euro und hatte das primäre Ziel, einen ganzheitlichen Ansatz für innovative Design-Lösungen und eine schutzzielorientierte Bewertung des Brandsicherheitsniveaus mit Ingenieurmethoden im Gegensatz zu konventionellen, präskriptiven Anforderungen zu erarbeiten. Dieser sollte zunächst für die Anwendung bei Schienenfahrzeugen gelten und sukzessive auf weitere oberflächengebundene Verkehrsmittel, wie zum Beispiel Busse und Schiffe, transferiert werden können.

Des Weiteren wurde die zeitkontinuierliche Erfassung von im Brandrauch vorhandenen Gaskomponenten, basierend auf Fourier-Transformierter Infrarotspektroskopie (FTIR), als Messverfahren zur Toxizitätsbeurteilung hinsichtlich der Anwendbarkeit in Schienenfahrzeugen und der Weiterentwicklung der harmonisierten Methode in der EN 45545-2 untersucht. Um Materialien bezüglich ihrer Toxizität im Brandfall einstufen zu können, wurde ein Klassifizierungsmodell entwickelt, das ebenfalls in zukünftige Versionen der EN 45545-2 einfließen soll. Andere Schwerpunkte dieses Projektes lagen in der Untersuchung der Anwendbarkeit und der Weiterentwicklung von Modellen zur numerischen Simulation von Brandeinwirkungen auf feuerwiderstandsfähige Bauteile, Rauch- und Brandausbreitung, toxischen Effekten bei Personen, Evakuierungsbetrachtungen sowie der Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Realbrandversuchen an Schienenfahrzeugen. [204]

2.2 Brandschutzanforderungen und Zulassungsarten in Deutschland

Grundsätzlich werden brandschutztechnische Anforderungen im Zusammenhang mit der Zulassung eines neuen Fahrzeuges beziehungsweise einer Fahrzeugserie gestellt. Gesetze und Verordnungen verweisen auf die anerkannten Regeln der Technik.

2.2.1 Zulassungsarten von Schienenfahrzeugen in Deutschland

Internationale Regelungen

Die EU-Richtlinie 2008/57/EG »über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft« [4] regelt den transeuropäischen Schienenverkehr auf dem TEN-Netz¹. Sie verweist auf die Technischen Spezifikationen für Interoperabilität (TSI), die von der European Railway Agency (ERA) erarbeitet und von der EU-Kommission verabschiedet werden. Die TSI sollen die EU-Richtlinie detaillieren, technisch konkretisieren und bei deren Umsetzung unterstützen. Sie verweisen ihrerseits auf das europäisch harmonisierte Normenwerk EN 45545 »Brandschutz in Schienenfahrzeugen«.

Die »Verordnung über die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems (TEIV)« [40] stellt die obligatorische Umsetzung der oben genannten EU-Richtlinie in nationales Recht dar. Nach TEIV stellt das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) Inbetriebnahmegenehmigungen für Eisenbahnfahrzeuge aus. Die von dem EBA hierzu veröffentlichte Verwaltungsvorschrift [104] definiert den Zulassungsprozess und bezieht sich sowohl auf den europäischen Teil der Zulassung als auch auf nationale Vorgaben. Demzufolge bedarf ein nach TEIV zugelassenes Fahrzeug keiner zusätzlichen nationalen Zulassung, um auf dem öffentlichen, regelspurigen Schienennetz betrieben zu werden.

Nationale Regelungen

National unterscheidet man zwei grundsätzliche Zulassungsarten für Schienenfahrzeuge:

- für *Eisenbahnen* nach der Definition im »Allgemeinen Eisenbahngesetz (AEG)« [47] gilt die »Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO)« [43] bzw. die »Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen (ESBO)«;

¹ Transeuropäisches Schienennetz zur Optimierung und Stärkung des wirtschaftlichen Zusammenhalts in der Gemeinschaft [4]

Kapitel 2 – Stand der Technik

- für *Straßenbahnen* im Sinne des »Personenbeförderungsgesetz[es] (PBefG)« [46] sind die Anforderungen nach »Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab)« [39] maßgebend.

Sowohl für die Zulassung nach EBO als auch nach BOStrab müssen die Fahrzeuge so gebaut bzw. beschaffen sein, dass diese den anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Hinsichtlich des Brandschutzes ist darunter die im Jahr 2013 national eingeführte Normenreihe der DIN EN 45545 »Brandschutz in Schienenfahrzeugen« zu verstehen. Im Rahmen der Übergangsfrist kann ebenfalls noch die bisherige DIN 5510 »Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen« angewendet werden.

2.2.2 Normative Anforderungen an die Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen in Deutschland

Im Folgenden werden die beiden zurzeit geltenden Normenreihen zum Brandschutz in Schienenfahrzeugen vorgestellt. Diese sind in der vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Kategorisierung von Fahrzeugen, zu berücksichtigender Szenarien der Brandentstehung sowie enthaltener Brandprüfverfahren für Fahrzeugkomponenten von Bedeutung.

DIN 5510

Bis zur Einführung einer europäisch harmonisierten normativen Grundlage im Jahr 2013 galten zur brandschutztechnischen Gestaltung von Schienenfahrzeugen rein nationale Vorgaben. Für Deutschland ist dies die fünfteilige Normenreihe DIN 5510 »Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen«, deren Anwendung noch bis zum Jahr 2016 zulässig ist [127]. Das allgemeine Schutzziel des Personenschutzes im Brandfall konkretisiert sich über die Teilschutzziele der Verhinderung von Bränden im Fahrgastraum durch Brandstiftung und technische Defekte sowie eine Verzögerung und Begrenzung der Brandausbreitung, falls die vorgenannten Teilschutzziele nicht erreicht werden. Diese sollen hauptsächlich mit nachzuweisenden Anforderungen an das Brandverhalten verwendeter Werkstoffe und Bauteile in Abhängigkeit von der Einbaulage innerhalb und der jeweiligen Brandschutzstufe des Fahrzeuges, die die Evakuierungsmöglichkeiten klassifizieren, erreicht werden. Weitere Maßnahmen bestehen in der funktionalen Prävention von Brandstiftung, brandabschottenden Bauteilen, dem Lauffähigkeitsverhalten im Brandfall, geeigneten Evakuierungsmöglichkeiten sowie der Berücksichtigung von Branderkennungs- und -bekämpfungsmaßnahmen. [69, 70]

DIN EN 45545

Die Anforderungen des Brandschutzes an Schienenfahrzeuge regelt die europäisch harmonisierte Norm EN 45545, die nunmehr auch den Anforderungen an die transeuropäische Operabilität genügt [128]. Nach über 20 Jahren Entwicklungszeit und den Zuarbeiten der Forschungsprojekte FIRESTARR² und TRANSFEU^{3,4} ratifizierte das europäische Normungskomitee (CEN) die EN 45545 im März 2013, woraufhin die deutsche Fassung DIN EN 45545 im August 2013 erschien [128]. Das siebenteilige Regelwerk ähnelt in seiner Struktur der DIN 5510 und lässt inhaltlich weitere Einflüsse der nationalen Normen Frankreichs, Italiens und Großbritanniens erkennen.

Die Schutzziele der EN 45545 sind folgendermaßen formuliert:

- die Wahrscheinlichkeit einer Brandentstehung zu minimieren,
- die Geschwindigkeit und den Umfang der Brandentwicklung zu beschränken und
- die Brandauswirkungen auf Fahrgäste und Personal zu minimieren. [81]

Im Kontext dieser Schutzziele werden Schienenfahrzeuge nach ihrer Bauart in verschiedene Bauartklassen eingeteilt (Tabelle 2.1) sowie anhand der Halte- und Evakuierungsmöglichkeiten innerhalb der spezifischen infrastrukturellen Umgebung in unterschiedliche Betriebsklassen eingestuft (Tabelle 2.2). Aus Bauart- und Betriebsklasse lässt sich eine von drei korrespondierenden Gefährdungsstufen zuordnen (Tabelle 2.3), an welcher sich, neben einbau- und produktspezifischen Kriterien, die Klassifizierungsanforderungen an die Brandsicherheit der verwendeten Materialien und Bauteile maßgeblich orientieren.

Tabelle 2.1: Bauartklassen für Schienenfahrzeuge nach DIN EN 45545-1 [81]

Klasse	Definition
A	Fahrzeuge, die Teil eines automatischen Zuges sind und kein für Notfälle geschultes Personal an Bord haben
D	Doppelstockfahrzeuge
S	Schlafwagen und Liegewagen
N	alle übrigen Fahrzeuge (Standardfahrzeuge)

² vgl. Abschnitt 2.1.2

³ vgl. Abschnitt 2.1.5

⁴ Die in TRANSFEU generierten Ergebnisse sollen im Rahmen der ersten Revision, deren Erarbeitung im Anschluss an die Veröffentlichung begonnen werden soll, in die Norm einfließen [22].

Kapitel 2 – Stand der Technik

Tabelle 2.2: Betriebsklassen und Fahranforderungen⁵ nach DIN EN 45545-1 [81]

Klasse	Definition und Fahranforderungen im Brandfall
1	Fahrzeuge für den Betrieb auf Infrastrukturen, auf denen Schienenfahrzeuge mit minimaler Zeitverzögerung gestoppt werden können und ein sicherer Bereich immer unmittelbar erreicht werden kann. Das Fahrzeug kann mit minimaler Verzögerung anhalten.
2	Fahrzeuge für den Betrieb auf unterirdischen Streckenabschnitten, in Tunneln und/oder auf aufgeständerten Streckenabschnitten, in denen es Bahnhöfe oder Rettungsstationen gibt, die den Fahrgästen einen sicheren Bereich bieten und innerhalb kurzer Fahrzeit erreichbar sind. Fahrzeit im Brandfall: 4 min.
3	Fahrzeuge für den Betrieb auf unterirdischen Streckenabschnitten, in Tunneln und/oder auf aufgeständerten Streckenabschnitten, in denen eine seitliche Evakuierung möglich ist und in denen es Bahnhöfe oder Rettungsstationen gibt, die den Fahrgästen einen sicheren Bereich bieten und innerhalb längerer Fahrzeit erreichbar sind. Fahrzeit im Brandfall: 15 min.
4	Fahrzeuge für den Betrieb auf unterirdischen Streckenabschnitten, in Tunneln und/oder auf aufgeständerten Streckenabschnitten, in denen eine seitliche Evakuierung nicht möglich ist und in denen es Bahnhöfe oder Rettungsstationen gibt, die den Fahrgästen einen sicheren Bereich bieten und innerhalb kurzer Fahrzeit erreichbar sind. Fahrzeit im Brandfall: 4 min.

Tabelle 2.3: Zuordnung der Gefährdungsstufen (HL) nach DIN EN 45545-2 [82]

Betriebsklasse	Bauartklasse			
	N	A	D	S
1	HL1	HL1	HL1	HL2
2	HL2	HL2	HL2	HL2
3	HL2	HL2	HL2	HL3
4	HL3	HL3	HL3	HL3

Grundlage für die festgelegten Anforderungen, insbesondere für die Prüfanforderungen an Materialien und Produkte innerhalb des Anwendungsbereiches der Norm, bilden verschiedene Brandentstehungsszenarien, die sich in unterschiedlichen

⁵ Die technischen Fahranforderungen im Brandfall haben ihren Ursprung in den TSI [1, 3].

Zündmodellen widerspiegeln [81]:

- Brandentstehung durch zufällige Entzündung oder Brandstiftung, wie Zeitungen, Streichhölzer, Zigaretten und Gasfeuerzeuge;
 - Zündmodell 1: Eine Flammenquelle mit einer mittleren Wärmeleistung von 7 kW erzeugt eine Strahlungsdichte zwischen 25 kW/m² und 30 kW/m² und ist für einen Zeitraum von 3 min aufzubringen.
 - Zündmodell 2: Eine Strahlungsdichte mit dem Nominalwert von 25 kW/m² wird im Bereich von 0,1 m² angewendet.

- Brandentstehung durch technische Defekte, vergleichbar mit elektrischen Lichtbögen oder Überhitzungen und Auswirkungen möglicherweise vorhandener entflammbarer Gase und Flüssigkeiten;
 - Zündmodell 3: Eine Strahlungsdichte mit dem Nominalwert von 50 kW/m² wird im Bereich von 0,1 m² angewendet.
 - Zündmodell 4: Eine Flammenquelle mit einer Wärmeleistung von 1 kW wird über einen Zeitraum von 30 s angewendet.

- Brandentstehung durch größere Zündmodelle als in den Abschnitten 4.2 und 4.3 beschrieben, wie Gepäckbrände und Brandstiftung.
 - Zündmodell 5: Eine Flammenquelle erzeugt eine Strahlungsdichte zwischen 20 kW/m² und 25 kW/m², die im Bereich von 0,7 m² mit einer durchschnittlichen Wärmeleistung von 75 kW für einen Zeitraum von 2 min angewendet wird, gefolgt von einer Strahlungsdichte zwischen 40 kW/m² und 50 kW/m², die auch im Bereich von 0,7 m² mit einer durchschnittlichen Wärmeleistung von 150 kW für einen Zeitraum von 8 min angewendet wird.

Bei Zündquellen der beiden erstgenannten Kategorien (Zündmodelle Nr. 1 bis 4) soll durch die Anforderungen an das Brandverhalten der Materialien sichergestellt werden, dass es für einen ausreichend langen Zeitraum, abhängig von der Gefährdungsstufe, nicht zu einer Fluchtunfähigkeit der im Fahrzeug befindlichen Personen kommt [20]. Hierzu enthält die Norm eine Reihe verschiedener Brandprüfverfahren, mit denen die Materialanforderungen hinsichtlich ihrer Entzündbarkeit, Wärmefreisetzungsrate, Flammenausbreitung, optischer Rauchdichte und der Toxizität nachzuweisen sind.

Für den Fall des Einwirkens größerer Zündinitiale (Zündmodell Nr. 5) und einer da-

Kapitel 2 – Stand der Technik

mit möglicherweise einhergehenden Brandausbreitung greifen weitere Brandsicherheitsmaßnahmen, wie Feuerschutzabschlüsse, Branddetektions- und -bekämpfungseinrichtungen sowie die Bildung von Rauch- und Brandabschnitten. Diese sollen den anwesenden Personen ermöglichen, sich an einen sicheren Ort zu begeben, der sich teilweise auch in einem anderen Brandabschnitt innerhalb desselben Fahrzeuges befinden kann [20].

Kapitel 3

Entzündung von Schienenfahrzeugen

Dieses Kapitel beleuchtet die Mechanismen der Brandentstehung in Schienenfahrzeugen mit dem Ziel, typische Zündvorgänge zu ermitteln und die Verknüpfung zu Reisegepäck herauszuarbeiten. Auf eine theoretische Analyse potentieller Zündszenarien folgt eine statistische Betrachtung tatsächlicher Brandereignisse, bei welcher auch der Einfluss von Reisegepäck Berücksichtigung findet. Die modellhafte Abbildung realer Zündinitiale für Schienenfahrzeuge bildet die Grundlage für brandtechnologische Produktprüfungen und Realbrandversuche. Bereits bestehende Zündmodelle für Schienenfahrzeuge finden sich in spezifischen Normen und Forschungsarbeiten.

3.1 Brandentstehung in Schienenfahrzeugen

Zur Brandentstehung ist neben einem Brennstoff und einem Oxidationsmittel¹ eine *Zündquelle* erforderlich, die die notwendige Aktivierungsenergie für die Verbrennungsreaktion bereitstellt. Als *Zündinitial* versteht man einen in der Regel »ortsfremden Körper«, der nach Zündung durch eine Zündquelle seinerseits Energie emittiert und als *sekundäre Zündquelle* auf die nutzungsspezifischen Brennstoffe einwirkt [134].

3.1.1 Theoretische Analyse von Brandentstehungsszenarien

Im Hinblick auf die Personensicherheit macht es einen Unterschied, ob ein Brand innerhalb oder außerhalb der Fahrgast- und Personalbereiche des Fahrzeuges entsteht. Daher sind gefährliche Bereiche, welche die Antriebstechnik, Kraftstofftanks und -leitungen oder elektrische Hochleistungstechnik beherbergen, nach DIN EN 45545-3 von den Fahrgast- und Personalbereichen brandschutztechnisch abzutrennen. Die geforderten Feuerschutzabschlüsse müssen, je nach Betriebsklasse nach DIN EN 45545-1 [81], das Raumabschlusskriterium nach DIN EN 13501-2 [79] für mindestens 15 Minuten erfüllen [83]. Somit können Brandentstehungsszenarien außerhalb der Fahrgast- und Personalbereiche in der vorliegenden Untersuchung mit geringerer Priorität gehandhabt werden, da die Fahrgäste vor den Brandein-

¹ meist Luftsauerstoff

Kapitel 3 – Entzündung von Schienenfahrzeugen

wirkungen für eine gewisse Zeit geschützt sind. Auch eine rasche Brandausbreitung auf den Aufenthaltsbereich von Personen ist zunächst nicht zu erwarten. Ein Unfallereignis, bei dem der Wagenkasten seine Integrität verliert, wird in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

In Fahrgastbereichen sind nutzungsspezifische brennbare Materialien (z. B. Polstersitze), extern eingebrachte Brennstoffe (Bekleidung, Gepäck) und Luftsauerstoff vorhanden. Infolgedessen ist anzunehmen, dass das Wirksamwerden einer entsprechenden Zündquelle eine Brandentstehung bedingt. Zündquellen, die in Fahrgastbereichen potentiell wirksam werden können, lassen sich untergliedern in Zündquellen, die dem System »Fahrzeug« zuzuordnen sind und in Zündquellen, die extern eingebracht werden (vgl. Abbildung 3.1).

Als Zündquellen, die dem System »Fahrzeug« zugeordnet werden können, sind beispielhaft die Folgenden zu nennen:

- elektrische Defekte, wie Lichtbögen, Kurzschlüsse, etc. (vgl. [220]),
- heiße Oberflächen, z. B. durch Wärmestau bei Luftbeheizungsanlagen,
- heiße Oberflächen, z. B. bei elektrischen Geräten in Gastronomiebereichen.

In die Kategorie der extern eingebrachten Zündquellen ist die folgende Aufzählung einzuordnen:

- Defekte bei eingebrachten elektrischen Geräten (z. B. im Reisegepäck),
- unbeabsichtigte Brandstiftung (z. B. glimmende Zigarette fällt auf Polstersitz),
- beabsichtigte Brandstiftung (z. B. Feuerzeug wird an Polstersitz gehalten).

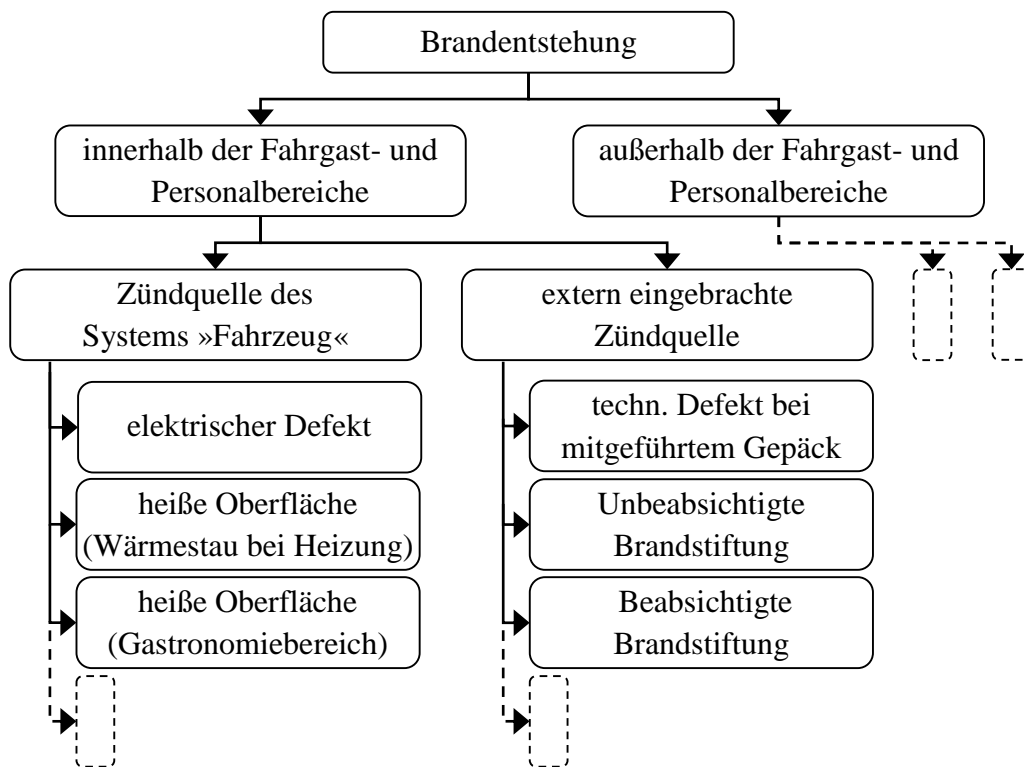


Abbildung 3.1: Systematik der Brandentstehung in Schienenfahrzeugen

3.1.2 Ursachen realer Brandereignisse

In der Literatur finden sich variierende Angaben zur Brandentstehung in Schienenfahrzeugen. Grundsätzlich lassen sich auch hier die *Brandursachen* den Kategorien »technischer Defekt« und »Brandstiftung« (fahrlässig bzw. vorsätzlich) zuordnen [137]. So wertete Hudson eine Anzahl von 2904 Brandereignissen in Schienenfahrzeugen² im Vereinigten Königreich aus den Jahren 1990 bis 1997 statistisch aus. Dabei ergab sich der Anteil der Brandstiftung zu 44 %, elektrische und mechanische technische Defekte lagen bei 39 %. Die verbleibenden 17 % entfielen auf andere Brandursachen, wie Unfälle oder unbekannte Brandentstehung. Separiert man den Güterverkehr, lag der Anteil der Brandstiftung in Personenzügen sogar bei 56 % [135]. Diese Zahlen wurden ebenfalls für die Risikoanalyse zur Brandentstehung in Schienenfahrzeugen im Rahmen des TRANSFEU Projektes³ herangezogen [53].

Im FIRESTARR Projekt⁴ wurden insgesamt 34 Brandereignisse hinsichtlich ihrer Brandursache analysiert. Auch dort identifizierte man Brandstiftung als eine der hauptsächlichen Brandentstehungsursachen [29]. Weitere statistische Auswer-

² hier: Personen- und Güterverkehr

³ vgl. Abschnitt 2.1.5

⁴ vgl. Abschnitt 2.1.2

Kapitel 3 – Entzündung von Schienenfahrzeugen

tungen von Bränden in Personenzügen geben für die Kategorie »Brandstiftung«, abhängig von der zugrunde liegenden Datenbasis, noch höhere Anteile, wie 68 % [58] und 79 % (hier: für Brandentstehung im Fahrzeuginneren) [222] an.

3.1.3 Der Einfluss von Reisegepäck

Kommt es zu Brandereignissen in Personenzügen, ist Reisegepäck in ca. 20 % bis 30 % der Fälle daran beteiligt [29]. In diesem Zusammenhang kann ein Reisegepäckstück entweder das Zündinitial für einen Brand sein oder lediglich eine zusätzliche Brandlast innerhalb des Fahrzeuges darstellen.

Aus Untersuchungen vergangener Brandereignisse in Personenzügen⁵, wie beispielsweise der verheerenden Brände in Baku im Jahr 1995 mit über 500 Toten und Schwerverletzten und Kaprun im Jahr 2000 mit 155 Toten, wird deutlich, dass brennbare Gegenstände, die von Fahrgästen mitgeführt werden, ein Brandszenario signifikant beeinflussen können [26, 136, 171]. So wurden beispielsweise im EUREKA-Projekt⁶ 500 kg Reisegepäck pro Personenwaggon angenommen [228]. Dieser Wert korrespondiert mit den Angaben im Projekt TRANSFEU⁷, das die typische Belegung von Gepäckbereichen mit 300 kg/m² quantifiziert [53]. Auch die Forschungsergebnisse des Metro-Projektes belegen, dass Reisegepäck bis zu 50 % der gesamten Brandlast innerhalb eines Schienenfahrzeuges ausmacht und so der auslösende Faktor für eine Brandausbreitung bis hin zur Durchzündung des Raumes (Flashover) sein kann [136, 171]. Zusammenfassend hat Reisegepäck bei der Dynamik eines Brandes innerhalb eines Schienenfahrzeuges eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung.

3.2 Zündmodelle für Schienenfahrzeuge

Dieser Abschnitt umfasst eine Recherche, welche Zündmodelle zur Beurteilung der Brandsicherheit von Schienenfahrzeugen bereits Anwendung finden. Die Auswertung enthält sowohl normative Zündquellen als auch Zündinitiale aus internationalen Forschungsprojekten und nationalen Richtlinien. Die dargestellten Zündmodelle folgen einer grundsätzlichen Untergliederung⁸ nach ihrer Wärmefreisetzungsrate in »klein«, wie z. B. ein brennendes Streichholz, Feuerzeug, Zeitschrift oder »groß« in der Dimension eines Reisegepäckstückes.

⁵ vgl. Abschnitt 1.2

⁶ vgl. Abschnitt 2.1.1

⁷ vgl. Abschnitt 2.1.5

⁸ vgl. Abschnitt 2.2.2

3.2.1 Kleine Zündinitiale

Die nachfolgende Tabelle listet »kleine« Zündinitiale (< 10 kW) auf, die allesamt normativ erfasst und aufsteigend nach ihrer Wärmefreisetzungsrate geordnet sind.

Tabelle 3.1: »Kleine« Zündinitiale für Schienenfahrzeuge und -komponenten

Bezeichnung	Beschreibung
Glimmende Zigarette	< 1 W für 10 min bis 15 min, anzuwenden auf Matratzen und bestimmte Sitze, gefordert in DIN 5510-2, Details in DIN EN 1021-1 [74] und DIN EN 597-1 [88].
Glühdraht	ca. 15 W für 30 s als ohmscher Widerstand, anzuwenden auf Leiterplatten, gefordert in EN 45545-2, Details in DIN IEC 60695-2-11 [99] und DIN IEC 60695-2-10 [98].
Kleinbrenner	ca. 35 W für 15 s oder 30 s als 20 mm lange Propangasflamme, anzuwenden z. B. auf Lichtdiffusoren und Luftfilter nach EN 45545-2 und div. gelistete Fahrzeugteile nach DIN 5510-2, Details in DIN EN ISO 11925-2 [92] bzw. DIN 53438-1 [66].
Kleinbrenner (elektro)	ca. 50 W für 30 s als 20 mm lange Methangasflamme, anzuwenden auf kleine elektrotechnische Komponenten, gefordert in EN 45545-2 und DIN 5510-2, Details in DIN IEC 60695-11-10 [97] und DIN EN 60695-11-4 [91].
Kleine offene Flamme	ca. 64 W für 30 s als Butangasflamme, anzuwenden z. B. auf loses Zubehör für Polsterungen für Sitze, Liegen und Betten, gefordert in EN 45545-2 und DIN 5510-2, Details in DIN EN ISO 12952-2 [93] bzw. DIN EN 1021-2 [75] und DIN EN 597-2 [89].
Breitschlitzbrenner	ca. 770 W für 180 s als Propangasflamme, anzuwenden auf div. gelistete Fahrzeugteile, gefordert in DIN 5510-2, Details in DIN 54837 [68].

Kapitel 3 – Entzündung von Schienenfahrzeugen

Tabelle 3.1 »Kleine« Zündinitiale für Schienenfahrzeuge und -komponenten
(fortgesetzt)

Bezeichnung	Beschreibung
1-kW-Flamme	ca. 1 kW für 60 s bis 480 s als Propangasflamme, anzuwenden auf Kabel und isolierte Leitungen, gefordert in EN 45545-2 (Zündmodell Nr. 4 nach EN 45545-1 ^{9,10} und DIN 5510-2, Details in DIN EN 60332-1-2 [90].
T-Brenner	ca. 2,8 kW für 60 s oder 180 s als Propangasflamme, kein direkter Bezug zu Schienenfahrzeugen, jedoch realistisches Zündmodell, beschrieben in ISO 11925-3 [139].
Papierkissen	Im Mittel ca. 7 kW, maximal ca. 14 kW für 160 s, vgl. Messkurve in Anhang A.2, anzuwenden auf Sitze, gefordert in DIN 5510-2, Details in DIN 54341 [67].
Quadratischer Brenner	ca. 7 kW für 180 s als Propangasflamme, anzuwenden auf Sitze, gefordert EN 45545-2 (Zündmodell Nr. 1 nach EN 45545-1 ¹¹ , Details in EN 45545-2 [82].

3.2.2 Größere Zündinitiale (außer Gepäckstück)

Dieser Abschnitt skizziert ausgewählte Zündinitiale für Schienenfahrzeuge bzw. deren Komponenten mit einer »größeren« Wärmefreisetzung (> 10 KW), welche allerdings kein Gepäckstück repräsentieren sollen.

Eureka-Project FIRETUN¹², 1995

Zur Zündung von halbierten und vollständigen Personenwagen kamen brennbare Flüssigkeiten, wie Isopropanol, in Mengen zwischen 0,4 kg und 12,3 kg in mehreren offenen Metallbehältern mit einer Öffnungsfläche von jeweils ca. 0,18 m² zur Anwendung.

⁹ vgl. Abschnitt 2.2.2

¹⁰ Die Zündmodelle 2 und 3 beziehen sich auf den Brand in der frühen und weiteren Entwicklungsphase (Strahler verschiedener Intensitäten strahlt auf brennbare Oberflächen), adressieren also nicht die Brandentstehung, sondern die Brandausbreitung.

¹¹ vgl. Abschnitt 2.2.2

¹² vgl. Abschnitt 2.1.1

NIST - Fire Safety of Passenger Trains¹³, 1999 bis 2004

Um ein möglichst breites Spektrum von Brandentstehungsszenarien in Personenzügen abzudecken, wurden verschiedene Zündinitiale verwendet [196]:

- Gasbrenner mit einer Leistung von 17 kW für 80 s nach Technical Bulletin 133 [212], der eine zerknüllte Papierzeitung simulieren soll und in seiner Form und der Aufbringung auf einen Passagiersitz dem Quadratbrenner nach EN 45545-2 ähnelt.
- Quadratischer Gas-Sand-Brenner mit einer Leistung von 25 kW oder 50 kW für die gesamte Versuchsdauer, der auch als Zündquelle für große, gefüllte Müllbeutel als Zündinitial auf Sitzen und in Schlafabteilmöbeln verwendet wurde.
- Runder Gasbrenner mit einer Leistung von 280 kW für 5 min, gefolgt von einer Leistung von 400 kW, um den Effekt größerer Zündinitiale abzubilden.

Frankfurter U-Bahn-Bemessungsbrand, 2002

Als Zündinitial für ein brennendes Fahrzeug, das den Bemessungsbrand der Frankfurter U-Bahn darstellt, wählte man einen mit Einkaufsgütern beladenen Kinderwagen (Buggy) [168]. Für diesen wurde eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 225 kW nach vier Minuten Branddauer experimentell ermittelt [227].

Essener U-Bahn-Bemessungsbrand, 2006

Bei dem Realbrandversuch mit einem 12,5 m langen Abschnitt eines U-Bahn-Fahrzeuges positionierte man zwei IMO-Kissen¹⁴ mit Baumwollbezug auf einem Fahrgastsitz und zündete diese mit einem Papierkissen¹⁵. Die Wärmefreisetzungsrate wird mit 95 kW bei einer Branddauer zwischen 10 min und 15 min angegeben. [173, 217]

Metro Project¹⁶, 2009 bis 2012

Als Zündinitial für Untersuchungen an einzelnen Gepäckstücken¹⁷ kam ein Propan-/Butangasbrenner mit einer Leistung von 25 kW für 90 s zur Anwendung [171]. Für die Brandversuche an Schienenfahrzeugen im Realmaßstab wurden verschiedene Zündinitiale verwendet. Beispielfhaft seien genannt:

- zwei Holzkrippen mit einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von jeweils ca. 150 kW mit und ohne der Zugabe von einem Liter Benzin [59];

¹³ vgl. Abschnitt 2.1.3

¹⁴ Es handelt sich um Polyether-Schaumpolster mit den Maßen 8 cm x 90 cm x 100 cm, die ursprünglich zur Nachweisführung von alternativen Sprinklersystemen für Luxuskabinen auf Passagierschiffen angewendet werden [200].

¹⁵ vgl. Abschnitt 3.2.1

¹⁶ vgl. Abschnitt 2.1.4

¹⁷ vgl. Abschnitt 3.2.3

- fünf Gepäckstücke, übergossen mit insgesamt zehn Litern Benzin [136].

3.2.3 Brennendes Gepäckstück als Zündinitial

Dieser Abschnitt stellt normative sowie in Gutachten und Forschungsprojekten verwendete Zündmodelle für Schienenfahrzeuge dar, die ein brennendes Gepäckstück nachbilden sollen. Sie dienen entweder zur Beurteilung der Personensicherheit innerhalb des Fahrzeuges oder zur Charakterisierung der Brandausbreitung über das gesamte Fahrzeug sowie dessen Wärme- und Rauchfreisetzung zur Dimensionierung von Gebäuden und Anlagen des Schienenpersonenverkehrs. Eine Visualisierung der jeweiligen Brandverlaufskurven und eine zusammenfassende Bewertung finden sich am Ende des Abschnitts.

Zündmodell Nr. 5 nach EN 45545-1

Dieses Zündmodell stellt Brände dar, die schwerwiegender als die Zündmodelle 1 bis 4 sind¹⁸ und bildet dementsprechend z. B. auch Gepäckbrände mit ab. Dieses leistungsstärkste Modell der EN 45545 charakterisiert sich durch eine zweiminütige Wärmefreisetzungsrate von 75 kW, gefolgt von 150 kW für eine Dauer von acht Minuten (vgl. Abbildung 3.2) [81]. Diese zeitlich linearisierte Funktion der Wärmefreisetzungsrate wurde im Forschungsprojekt FIRESTARR¹⁹ aus Brandversuchen an einzelnen Polstersitzen aus Schienenfahrzeugen abgeleitet [29] und z. B. auch im Projekt TRANSFEU [204] verwendet.

Zündinitial für den Fahrzeug-Bemessungsbrand nach TRStrab BS

Die »Technischen Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen (TRStrab BS)« definieren ein brennendes Schienenfahrzeug zur Bemessung unterirdischer Betriebsanlagen. Für diesen Fahrzeugbrand ist ein Zündinitial vorgesehen, dessen Brandverlauf²⁰ sich durch eine »konstant ansteigende Energiefreisetzung bis 120 kW nach 5 Minuten und eine weitergehende Energiefreisetzung bis maximal 150 kW nach 8 Minuten« charakterisiert [38]. Daran schließt sich ein kontinuierliches Absinken der Wärmefreisetzungsrate auf 0 kW nach 30 min an [229]. Mit diesem Energiefreisetzungsprofil soll das Zündinitial »als einhüllende Kurve einer Vielzahl möglicher Brandverläufe von Reisegepäck²¹ verstanden werden« [229].

¹⁸ vgl. Abschnitte 2.2.2 und 3.2.1

¹⁹ vgl. Abschnitt 2.1.2

²⁰ vgl. Abbildung 3.2

²¹ in der Größenordnung von 7 kg [229]

Zündinitial für den S-Bahn-Bemessungsbrand

Im Jahr 2006 wurde im Auftrag der Deutschen Bahn AG ein Bemessungsbrand für S-Bahnfahrzeuge und weitere Fahrzeuge des gemischten Reisezugverkehrs (z. B. Fernbahnfahrzeuge, Doppelstockwagen) entwickelt. Als Zündinitial diente die modifizierte Brandverlaufskurve eines Kunststoff-Hartschalenkoffers, die im Rahmen des FIRESTARR Projektes experimentell ermittelt wurde. Dieser umfasste, inklusive der enthaltenen Kleidungsstücke, eine Gesamtmasse von 10,34 kg und wurde zur Zündung 240 s lang mit einem »Belfagorbrenner« beaufschlagt [29]. Die Modifikation bestand in der Approximation der Wärmefreisetzungskurve²² durch eine Treppenfunktion und dem 200 s früheren Erreichen des Zeitpunktes, an dem die maximale Wärmefreisetzung von 125 kW erreicht wird, »um die thermische Einwirkung allgemeingültig darzustellen« [125].

»Reisetasche« in der Richtlinie für Brandbekämpfungssysteme

Die Richtlinie »Brandbekämpfung in Schienenfahrzeugen« der Arbeitsgemeinschaft Detektionstechnik (ARGE) dient der Spezifizierung von Brandbekämpfungs- bzw. Brandlöschsystemen, wobei sie den Fokus auf den Schutz von Personen an Bord richtet. Zur Erbringung des Wirksamkeitsnachweises für Brandbekämpfungssysteme, wie z. B. Wassernebellöschanlagen, kommt bei Bestätigungsprüfungen in der realen Fahrzeugkonfiguration »als Referenzbrandlast das Brandobjekt Reisetasche zur Anwendung« [13]. Diese Reisetasche ist durch einen konstanten Anstieg der Wärmefreisetzungsrates auf 120 kW nach 5 min und eine Gesamtbrandlast von mindestens 136 MJ definiert [13]. Unter der Annahme des Weiterbrennens mit konstanter Wärmefreisetzungsrates nach der fünften Minute, würde der Gegenstand bei einem Energiegehalt von 136 MJ noch mindestens 17 min weiterbrennen. Die Vorgaben zum Brandobjekt »Reisetasche« erfolgten in Anlehnung an die Untersuchungen von Wilk [227], der das Brandverhalten von Reisegepäckstücken, gezündet durch ein aufgelegtes Papierkissen nach UIC 564-2 [216], analysierte. Abbildung 3.2 zeigt sowohl das Brandobjekt »Reisetasche« nach ARGE-Richtlinie als auch die zugrunde liegenden Versuchsergebnisse von Wilk, beispielhaft anhand einer großen und einer kleinen Reisetasche mit den Massen von 8,0 kg bzw. 4,3 kg.

Zündinitial für den Bemessungsbrand der Metro in Singapur

Im Rahmen einer Master Thesis im Fach Fire Engineering an der Universität Canterbury entwickelte Chiam im Jahr 2005 einen Bemessungsbrand für die »Circle Line« der Singapur Metro. Als Zündinitial für das brennende Fahrzeug diente eine konstante Wärmefreisetzungsrates von 200 kW über einen Zeitraum von 30 min,

²² vgl. Abbildung 3.2

Kapitel 3 – Entzündung von Schienenfahrzeugen

was der gemittelten Wärmefreisetzung von zwei aneinander stehenden und simultan brennenden Reisekoffern entsprechen sollte [58]. Den zugrunde liegenden Versuch führte Morgan im Rahmen der Entwicklung eines Bemessungsbrandes für einen Singapur Flughafen terminal durch [187]. Sowohl die von Morgan gemessene als auch die von Chiam approximierte Brandverlaufskurve ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Einzelne Gepäckstücke im Rahmen des Metro Project

Kumm untersuchte im Jahr 2010 das Brandverhalten einzelner Gegenstände, die üblicherweise von Fahrgästen des Personennahverkehrs mitgeführt werden. Darunter finden sich beispielsweise auch eine Sporttasche, ein großer Rucksack sowie ein kleiner und ein großer Hartschalenkoffer mit einer Gesamtmasse von 9,0 kg bzw. 14,7 kg. Diese wurden zwar nicht selbst als Zündinitial verwendet, jedoch sind die dort ermittelten Brandverlaufskurven ausgewählter Gegenstände als Referenz für die vorliegende Untersuchung von Interesse und ebenfalls in Abbildung 3.2 aufgeführt. Zündquelle für die einzelnen Gegenstände war ein Gasbrenner mit einer (verhältnismäßig hohen²³ Leistung von 25 kW für 90 s [171].

Übersicht über die Brandverlaufskurven von Gepäckstücken

Abbildung 3.2 präsentiert die in diesem Abschnitt vorgestellten Verlaufskurven der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsraten. Sie zeigt sowohl experimentell ermittelte Werte als auch die daraus abgeleiteten modellhaften Brände. Anzunehmen ist, dass die Unterschiede vornehmlich auf die Brennstoffmenge und -komposition, den spezifischen Energiegehalt und auf die Charakteristika der verwendeten Zündinitialen, wie Intensität, Dauer und Angriffsfläche, zurückzuführen sind. Des Weiteren haben sicherlich die Entzündbarkeit des Außenmaterials der Gepäckstücke, die Experimentalkonfiguration und weitere Parameter einen gewissen Einfluss auf das Brandverhalten von Reisegepäck.

²³ vgl. Abschnitt 3.2.1

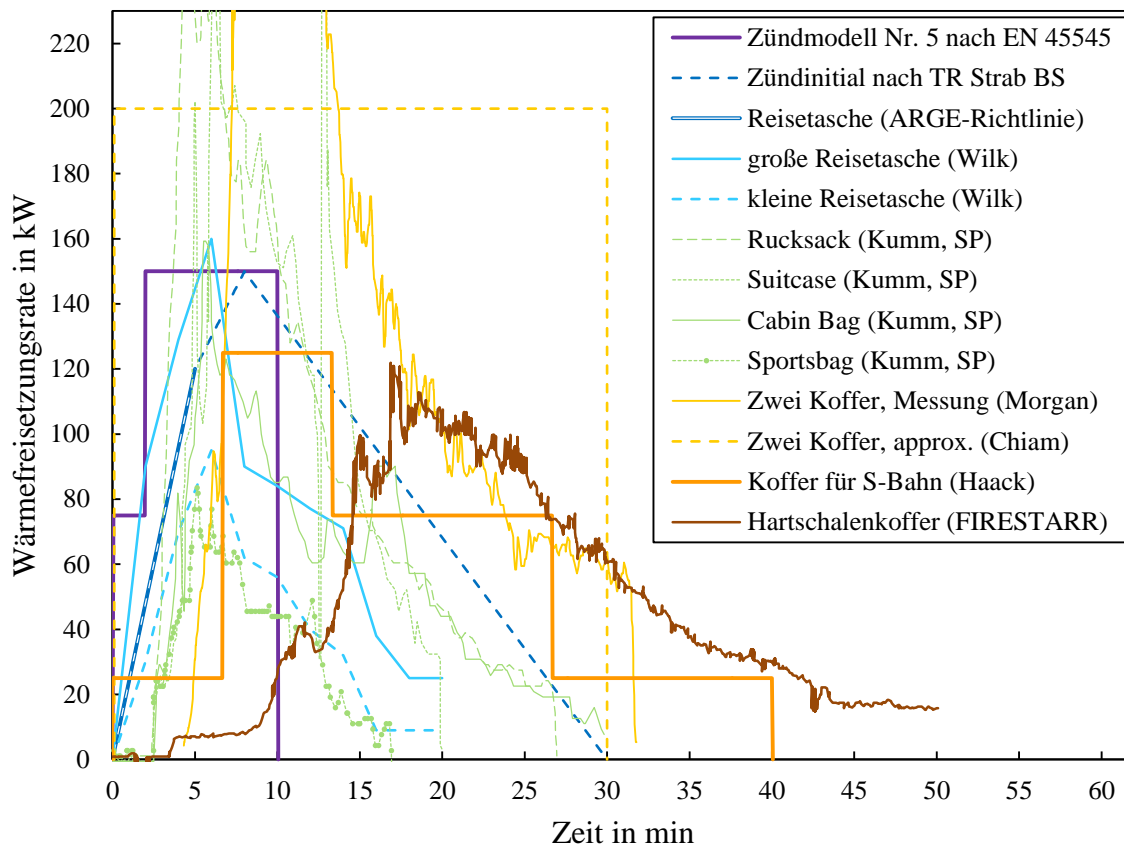


Abbildung 3.2: Übersicht über ausgewählte Zündmodelle, die Gepäckstückbrände repräsentieren sollen

Zusammenfassend existieren experimentell ermittelte Brandverlaufskurven für Gepäckstücke, welche auch in verschiedene vereinfachte und modellhafte Funktionen überführt wurden. Bezüglich der spezifischen Kurvenverläufe, der maximalen Brandleistung und Branddauer weisen die untersuchten Literaturbeispiele lediglich wenig Ähnlichkeit zueinander auf. Alle bisher untersuchten Gepäckstücke haben jedoch gemeinsam, dass deren Brandverhalten ausschließlich auf eine zeitabhängige Wärmefreisetzungsrate reduziert wird. Weitere brandtechnologisch relevante Parameter, die neben der Wärmefreisetzung einen Brand typisieren, wie die Freisetzungsraten toxischer und sichttrübender Komponenten, fehlen.

Kapitel 4

Bewertung der Personensicherheit mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes

Zurzeit befinden sich die Anforderungen des Brandschutzes im Schienenverkehr und damit auch die Möglichkeiten für leistungsbasierte Bemessungen mit numerischen Methoden im Wandel [122]. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Möglichkeiten von *Brandschutzingenieurverfahren* als Werkzeug zur Nachweisbringung. Der Fokus richtet sich hierbei insbesondere auf das Ziel, Ingenieurmethoden zur Bewertung der Personensicherheit in brennenden Schienenfahrzeugen einzusetzen.

4.1 Leistungsbasierte Nachweise der Personensicherheit

In vielen Bereichen, in denen Systeme als »sicher« auszulegen sind, wird ein Sicherheitsniveau durch die Einhaltung spezifischer, präskriptiver Anforderungen gewährleistet [39, 43, 178, 208]. Diese greifen häufig additiv und liefern so konservative Ergebnisse. Dieses starre System begrenzt die Möglichkeiten individueller Gestaltungskonzepte. Daher räumen die Anforderungsgeber den Planern und Konzepterstellern von beispielsweise Gebäuden, Schiffen und Fahrzeugen den Freiraum ein, alternative Bemessungsansätze heranzuziehen. Hierbei stehen ingenieurwissenschaftliche Methoden im Mittelpunkt, um ein angemessenes Sicherheitsniveau zu quantifizieren und so innovative Lösungen wirtschaftlich zu realisieren.

4.1.1 Rechtsverankerungen leistungsbasierter Bemessungsansätze

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die rechtlichen Grundlagen leistungsbasierter Bemessungsansätze sowie die reguläre Nutzung von Ingenieurmethoden, wie numerischen Simulationsverfahren. Anhand der Anwendungen im Bauwesen, der Passagierschiffahrt und natürlich für die Auslegung von Schienenfahrzeugen werden die jeweiligen Abweichungsmöglichkeiten von präskriptiven Anforderungen dargestellt. Die genannten Bereiche haben gemeinsam, dass es sich um Strukturen handelt, bei denen die Sicherheit vieler Personen im Vordergrund steht.

Bauwesen

Die länderspezifischen Bauordnungen bilden in Deutschland die Basis für Bauvorhaben im Sinne des Bauordnungsrechtes. Diese verweisen hinsichtlich der Einhaltung der allgemeinen Anforderungen auf die Beachtung der von der obersten Aufsichtsbehörde eingeführten technischen Baubestimmungen. Von diesen kann jedoch abgewichen werden, »wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die allgemeinen Anforderungen¹ [...] erfüllt werden« [178]. Eine einheitliche Methodik zur Führung qualitativer und quantitativer Nachweise für gleichwertige Lösungen beschreibt der »Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes«. Dieser Leitfaden fokussiert insbesondere die Anwendung auf Gebäude besonderer Art oder Nutzung, sogenannte Sonderbauten, bei denen präskriptive bauordnungsrechtliche Anforderungen nicht umsetzbar sind [134]. Als reguläre Methode der Gebäudeauslegung können Ingenieurmethoden nach den europäisch harmonisierten Eurocodes, DIN EN 1991 bis DIN EN 1996, mittlerweile auch für die Bemessung von Tragwerken im Brandfall eingesetzt werden [134].

In anderen Nationen, z. B. in England und Wales, ist es generell möglich, den Gebäudebrandschutz mit einem leistungsbasierten Ansatz und der Verwendung von Ingenieurmethoden zu bemessen. In einigen Fällen, wie bei großen und komplexen Gebäuden mit verschiedenen Nutzungen, beispielsweise Flughäfen, kann es die einzige Nachweismethode sein, um den gesetzlichen Anforderungen nachzukommen [132].

Maritime Anwendungen

Die grundsätzlichen Brandschutzanforderungen an Passagierschiffe enthält das SOLAS²-Abkommen. Weitere Dokumente der IMO³, wie Codes, Resolutionen und Rundschreiben, konkretisieren die jeweiligen Vorgaben. Nach SOLAS II-2/2.3 lassen sich die Schutzziele entweder durch das Umsetzen der präskriptiven Anforderungen oder mit sogenannten »alternativen Ausführungen und Anordnungen« erreichen. Demnach sind Regelabweichungen zulässig, solange auf der Basis einer ingenieurwissenschaftlichen Analyse die Erfüllung der jeweiligen Schutzziele und funktionalen Anforderungen belegt werden kann [208]. Das Rundschreiben MSC/Circ. 1002 »Richtlinien für alternative Ausführungen und Anordnungen im

1 »Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden« [178].

2 SOLAS: Internationales Übereinkommen zum Schutz des menschlichen Lebens auf See (engl. International Convention for the Safety of Life at Sea) ist eine UN-Konvention zur Schiffsicherheit.

3 Internationale Seeschiffahrtsorganisation (engl. International Maritime Organization)

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

Brandschutz« erörtert die Methodik einer solchen quantitativen Äquivalenzanalyse, in welcher für das »alternative Design« mindestens das gleiche Sicherheitsniveau nachzuweisen ist, wie für ein regelkonformes »Referenzdesign« [188].

Schienenfahrzeuge

Abschnitt 2.2.1 zeigt auf, dass für Schienenfahrzeuge in Abhängigkeit von der Fahrzeugart und dem zu befahrenden Streckennetz unterschiedliche Rechtsverordnungen, z. B. TEIV, EBO, BOStrab, gelten und so verschiedene Zulassungsvarianten möglich sind. Die Vorschriften münden jedoch hinsichtlich des Brandschutzes wiederum in den Normen DIN EN 45545 (bzw. DIN 5510), die als anerkannte Regeln der Technik die Anforderungen konkretisieren⁴. Bei einer Zulassung nach EBO und/oder BOStrab lässt sich allerdings auch die Option nutzen, einen Nachweis gleicher Sicherheit zu führen. So enthalten beide Verordnungen in § 2, Abs. (2) die Klausel: »Von den (allgemein)⁵ anerkannten Regeln der Technik darf abgewichen werden, wenn mindestens die gleiche Sicherheit (wie bei Beachtung dieser Regeln)⁶ nachgewiesen ist« [39, 43]. Bei dem Nachweis gleicher Sicherheit ist es Aufgabe der Konzeptersteller, die Abweichungen und etwaige Kompensationsmaßnahmen quantitativ zu erfassen und eine schutzzielorientierte Gesamtbewertung vorzunehmen [23].

Bei einer Schienenfahrzeugzulassung nach TEIV für das transeuropäische Schienennetz ist ein Nachweis gleicher Sicherheit formal nicht vorgesehen. Jedoch eröffnet beispielsweise die zugrunde liegende TSI für konventionelle⁷ Lokomotiven und Personenwagen »TSI LOC&PAS CR« [5] Optionen für spezielle Anforderungen: So lassen sich Trennwände auch durch andere »Maßnahmen zur Verhinderung der Ausbreitung von Feuer« [5], wie eine stationäre Löschanlage, kompensieren. Als Hilfestellung bei Nachweisen dieser Art kann die EG-Verordnung 352/2009 [7] »über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken [...]« dienen [167]. Sie enthält unter anderem eine harmonisierte Vorgehensweise zur Risikoevaluierung und -bewertung hinsichtlich signifikanter Änderungen im Eisenbahnsystem. Auch in diesem Fall kann die Anwendung von Ingenieurmethoden ein unterstützendes Instrument darstellen.

⁴ vgl. Abschnitt 2.2.2

⁵ »allgemein« enthält nur die BOStrab

⁶ »wie bei der Beachtung dieser Regeln« enthält nur die EBO

⁷ in Abgrenzung zur TSI des Hochgeschwindigkeitsbahnsystems

4.1.2 Ingenieurmäßige Vorgehensweise

Die generelle Vorgehensweise einer leistungs- (auch schutzziel-) basierten Systembemessung mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden ist im internationalen Standard ISO 23932 »Fire Safety Engineering – General Principles« [147] beschrieben. Nationale Brandschutzrichtlinien für bauliche Anlagen, wie der »Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes« offerieren dementsprechende, quasi-identische Ansätze [134]. Auch in den »Technische[n] Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen« [38] ist ein ähnlich strukturierter, leistungsbasierter Bemessungsansatz enthalten. Im Rahmen des TRANSFEU-Forschungsprojektes wurde die ingenieurwissenschaftlich gestützte Nachweisführung ebenfalls adaptiert und weiterentwickelt [54].

Das Identifizieren von *Schutzzielen* ist der erste Schritt des leistungsbasierten Bemessungsansatzes. Sie geben Auskunft darüber, was mit den zu implementierenden Brandschutzmaßnahmen erreicht respektive verhindert werden soll. Oftmals sind die Schutzziele bereits in den zugehörigen Vorschriften und normativen Regelungen zu finden⁸. Die daraus abzuleitenden funktionalen Anforderungen beschreiben die technische Erreichbarkeit bzw. Umsetzbarkeit. Die funktionalen Anforderungen wiederum lassen sich durch quantitativ erfassbare Leistungskriterien konkretisieren, die die Bewertungsbasis zur Gewährleistung des jeweiligen Schutzzieles bilden. Daraufhin wird für das zu bemessende System ein vorläufiges Brandschutzkonzept entwickelt, mit dem die gestellten Leistungskriterien voraussichtlich eingehalten werden können. [147]

Anhand diverser Parameter, wie Nutzungsart, Ventilationsbedingungen, Brandlastverteilung, möglichen Zündinitialen, Branderkennungs- und -bekämpfungsmaßnahmen lassen sich unterschiedliche Brandszenarien generieren, aus denen eine geringe Anzahl von Bemessungsbrand-Szenarien abgeleitet wird. Ziel der Bemessungsbrand-Szenarien ist es, sogenannte »worst credible cases⁹«, also maßgebende Brandereignisse, die mit hinreichender Wahrscheinlichkeit während der Nutzungsdauer des Systems eintreten, abzudecken [134]. Die ingenieurwissenschaftlichen Methoden dienen nun dazu, die Einhaltung der vorher definierten Leistungskriterien für die entwickelten Bemessungsbrand-Szenarien zu beurteilen und daraufhin ggf. die Brandschutzmaßnahmen zu optimieren.

⁸ für Schienenfahrzeuge vgl. Abschnitt 2.2.2

⁹ Im Gegensatz zu den »worst credible cases« ist bei »worst case«-Szenarien die Wahrscheinlichkeit eines Eintretens so gering, dass diese bei der Systemauslegung in der Regel nicht betrachtet werden [134].

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

4.1.3 RSET vs. ASET – Die zeitliche Komponente

Zur Beurteilung der Personensicherheit für ein (Bemessungs-) Brandszenario ist die RSET-ASET-Methode international eingeführt. Hierbei werden zwei Zeitspannen verglichen:

- die für die sichere Flucht benötigte Zeit (RSET¹⁰) und
- die für die sichere Flucht verfügbare Zeit (ASET¹¹) [95].

ASET bezeichnet den Zeitraum von der Brandentstehung bis zum Erreichen von Bedingungen¹², bei denen eine sichere Flucht nicht mehr möglich ist. RSET beginnt ebenfalls mit der Brandentstehung und endet mit dem Zeitpunkt, an dem die Selbstrettungsphase abgeschlossen ist. Die Differenz zwischen ASET und RSET repräsentiert die zusätzlich vorhandene Sicherheit, vgl. Abbildung 4.1. [134]

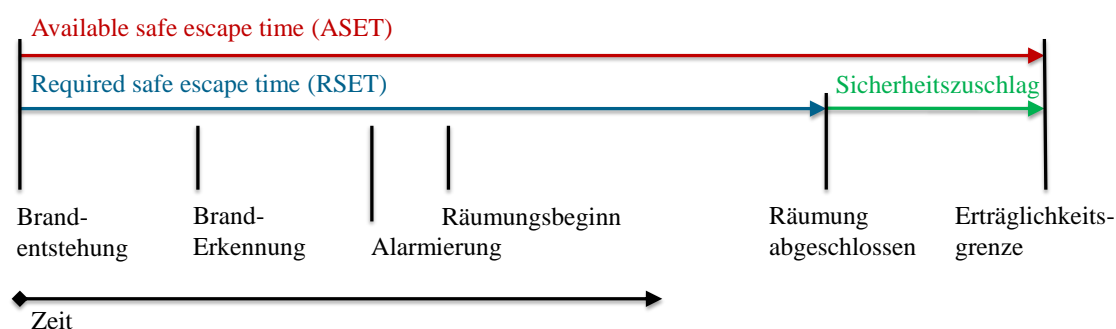


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung von ASET und RSET

4.2 Ermittlung von RSET

4.2.1 Grundsätzliche Betrachtungen

Je mehr Personen von den Auswirkungen eines Brandes betroffen sein können, desto komplexer gestalten sich die Maßnahmen, die eine sichere Evakuierung¹³ ermöglichen. Bei Personenstromanalysen greift man auch auf rechnergestützte Simulationsmodelle zurück, um einerseits die zu erwartende Dauer einer Evakuierung zu ermitteln und andererseits potentielle Staubereiche zu erkennen. Hierbei beeinflussen neben den geometrischen Gegebenheiten personenspezifisch variierende

¹⁰ engl. required safe escape time

¹¹ engl. available safe escape time

¹² hier: Erträglichkeitsgrenze

¹³ Die Begriffe »Räumung« und »Evakuierung« werden hier synonym verwendet, vgl. Glossar.

Parameter, wie Reaktionszeit, Platzbedarf, freie Gehgeschwindigkeit oder Zugehörigkeit zu bestimmten Personengruppen, die Evakuierungsdauer. Daher wird in der Regel eine große Anzahl an Simulationsläufen mit stochastisch verteilten Individualparametern durchgeführt. [134]

4.2.2 Evakuierung von Schienenfahrzeugen

In Triebzügen ohne räumliche Unterteilung können sich zeitgleich mehrere 100 Fahrgäste aufhalten. Dementsprechend finden sich auch Untersuchungen zu Evakuierungsvorgängen bei Schienenfahrzeugen in den Forschungsprojekten Metro¹⁴ [136] und TRANSFEU¹⁵ [204]. Basierend auf empirischen Daten ermittelte man im Rahmen von TRANSFEU Evakuierungszeiten mit dem Simulationsprogramm »FDS+Evac«. Parametervariationen, wie verschiedene Fahrzeuggeometrien, eine Evakuierung zum Bahnsteig oder ins Gleisbett bzw. die Mitnahme von Reisegepäck waren Bestandteile dieser Untersuchungen. Die ermittelten Evakuierungsdauern lagen im Bereich von zwei bis drei Minuten [165].

Im Rahmen der Forschungsarbeiten von Alvear und Capote kam ein stochastisches Simulationsmodell zur Anwendung, das sich ebenfalls auf experimentell generierte Berechnungsparameter stützt. Die hier ermittelten Zeiten für die Evakuierung eines aufrecht stehenden Wagens zum Bahnsteig ergaben sowohl für die experimentellen als auch für die numerischen Untersuchungen Werte in der Größenordnung von zwei Minuten (Mittelwerte) und drei Minuten (95 % Perzentile) [8, 55]. In den Veröffentlichungen von Galea finden sich Analysen zu erschwerten Evakuierungsbedingungen, wie sie bei umgekippten oder unfallbedingt deformierten Wagenkästen zu erwarten sind [118]. Jedoch ist bei solchen Szenarien bereits mit einer gewissen Fluchtunfähigkeit der anwesenden Personen durch Verletzungen oder Schockzustände infolge des Unfallereignisses selbst zu rechnen.

Ein Aspekt, der bei der Ermittlung von RSET bei Schienenfahrzeugen nicht unberücksichtigt gelassen werden darf, ist, dass Schienenfahrzeuge, ähnlich wie etwa Passagierschiffe, ein in sich abgeschlossenes System darstellen, bei dem betroffene Personen im Gefahrenfall nicht zwangsläufig und jederzeit einen Ort absoluter Sicherheit aufsuchen können¹⁶. Somit machen es die infrastrukturellen Gegebenheiten teilweise erforderlich, die Fahrt des Fahrzeuges im Brandfall über eine längere

¹⁴ vgl. Abschnitt 2.1.4

¹⁵ vgl. Abschnitt 2.1.5

¹⁶ vgl. Abschnitt 8.1.1

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

Zeit fortzusetzen, bevor dieses einen geeigneten Ort für eine Evakuierung erreicht¹⁷. Die Möglichkeit, Passagiere vom betroffenen Wagen zunächst behelfsweise in benachbarte Wagen als Ort *relativer Sicherheit* zu verbringen, wird in Abschnitt 8.1.2 diskutiert.

Maßgebend bei der Evakuierung von Schienenfahrzeugen ist also weniger die ermittelte Evakuierungsdauer von nur wenigen Minuten, sondern vielmehr die, durch die Infrastruktur bedingte, verbleibende Fahrzeit des in Brand geratenen Fahrzeuges bis zur nächstgelegenen Evakuierungsmöglichkeit.

4.3 Ermittlung von ASET

Bei einem Brandereignis können Personen verschiedenen Arten von Emissionen ausgesetzt sein. Neben den akut und chronisch schädigenden toxischen Wirkungen stofflicher Brandprodukte kann Brandrauch zu erheblichen Einschränkungen der Sichtverhältnisse und somit zum Verlust der räumlichen Orientierung führen. Auch die thermische Exposition kann die Fluchtfähigkeit beeinträchtigen. Die ISO 13571 »Life-threatening Components of Fire – Guidelines for the Estimation of ASET« [140] verwendet verschiedene Modelle, um die Brandeinwirkungen auf Personen zu quantifizieren und infolgedessen die für die sichere Flucht verfügbare Zeit innerhalb eines spezifischen Brandszenarios abzuschätzen. Für jedes der vier zu beurteilenden Kriterien »erstickend wirkende Brandgase«, »reizend wirkende Brandgase«, »Wärmeeinwirkung« und »Sichtbeeinträchtigung durch Rauch« lässt sich die Zeitspanne bis zur Erträglichkeitsgrenze bestimmen [140].

4.3.1 Sichtverhältnisse

Personen können ab einem gewissen Grad der Verrauchung Objekte nicht mehr optisch wahrnehmen. Sie verlieren die Orientierung und können Ausgangstüren und Fenster nicht mehr lokalisieren, auch wenn sie sich in vertrauter Umgebung befinden. Das Modell der ISO 13571 basiert auf dem Konzept des kleinsten detektierbaren Kontrastes, beispielsweise des geringsten erkennbaren Helligkeitsunterschiedes zwischen einem Gegenstand und dem Hintergrund. [140]

Die Erkennungsweite, wie etwa die eines reflektierenden Rettungswegzeichens im Brandfall, ist von der Konzentration und den Lichtschwächungseigenschaften der vorhandenen Rauchpartikel abhängig. Sie lässt sich vereinfacht über folgende Be-

¹⁷ vgl. Tabelle 2.2 in Abschnitt 2.2.2

ziehung darstellen [117, 190]:

$$S = \frac{C}{K} \quad (4.1)$$

mit S	Erkennungsweite	in m
C	Proportionalitätskonstante (reflektierendes Objekt = 3)	–
K	Extinktionskoeffizient	in m^{-1}

Physikalische Grundlage¹⁸ für die Lichtschwächung durch Brandrauch stellt das Lambert-Beersche Gesetz dar. Es beschreibt die Intensitätsabnahme eines monochromatischen Lichtstrahls über die Lauflänge l [19, 190]:

$$I_\lambda = I_{\lambda,0} \cdot e^{-K \cdot l} \quad (4.2)$$

mit $I_{\lambda,0}$	Intensität des ausgesendeten Lichtstrahls	–
I_λ	Intensität des empfangenen Lichtstrahls	–
$K = K_m \cdot c_m$	Extinktionskoeffizient	in m^{-1}
l	Weglänge	in m
K_m	Spezifischer Extinktionskoeffizient	in $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
c_m	Rauchpartikelkonzentration	in $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Bei Bränden in Schienenfahrzeugen, kommt der Beurteilung der Sichtverhältnisse im Vergleich zu anderen Kriterien jedoch eher eine untergeordnete Rolle zu. Grund ist, dass das Bewertungskriterium »Sichtverhältnisse« primär in baulichen Anlagen bzw. auch auf Passagierschiffen Anwendung findet. Dort ist es für eine sichere Flucht unerlässlich, teilweise große Sichtweiten zu gewährleisten, die beispielsweise über den Nachweis einer minimalen raucharmen Schichthöhe sichergestellt werden [134]. Bei einem Schienenfahrzeug ist aufgrund der geometrischen Gegebenheiten des Innenraumes und der vergleichsweise geringen Entfernungen zu Notausstiegen auch bei einer gewissen Verrauchung des Fahrzeuges kein vollständiger Verlust der Orientierung zu erwarten. Außerdem kann grundsätzlich eine Korrelation zwischen der Sichttrübung durch Rauchpartikel und der toxischen Wirkung von Rauchgasen angenommen werden [134]. Demnach werden erfahrungsgemäß die Grenzkriterien bezüglich der Toxizität in einem begrenzten Raumvolumen ähnlich schnell erreicht, wie der Verlust der Orientierung durch Rauchpartikel.

¹⁸ Die hier dargestellten Gleichungen werden in Abschnitt 5.2.7 wieder aufgegriffen.

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

4.3.2 Rauchgastoxizität

Rauchgasintoxikationen stellen bei Brandfällen die häufigste Todesursache dar [19, 198]. Dabei hängt das Potential eines Materials zur Rauchgasemission von vielen Faktoren, wie seiner chemischen Komposition, der thermischen Beanspruchung und dem Sauerstoffangebot während der Verbrennung ab. [19]

Akut humantoxische Brandgase werden fast ausschließlich inhalativ aufgenommen und entwickeln dabei entweder einen erstickenden oder einen reizenden Effekt. Narkotisch wirkende Brandgase, wie Kohlenmonoxid (CO) und Cyanwasserstoff (HCN) werden über die Lungenbläschen (Alveolen) direkt ins Blut überführt und behindern dort den Sauerstofftransport über verschiedene Wirkmechanismen. Primär sind Schädigungen des zentralen Nervensystems charakteristisch, was sich in Bewusstseinsstörungen, gefolgt von einem Bewusstseinsverlust, äußert. Hydrophile Brandgase, wie Chlorwasserstoff (HCl), Acrolein (C₃H₄O) oder Ammoniak (NH₃) werden großenteils bereits an den Augen bzw. im oberen Respirationstrakt resorbiert, welches mit starken Reizwirkungen in diesen Bereichen einhergeht und so die Fluchtfähigkeit einschränkt [19]. Zwischen den akut narkotisch und akut reizend wirkenden Rauchgasen treten physiologisch keine wechselseitigen Wirkungen auf, so dass die toxische Wirkung beider Mechanismen separat voneinander bestimmt wird [140]:

Narkotische Gase

Der toxische Effekt von erstickend wirkenden Rauchgasen lässt sich durch die aufgenommene Dosis, vereinfacht¹⁹ durch die Konzentration einer Substanz in der Rauchgasatmosphäre über einen Expositionszeitraum, beschreiben. Das Modell der fraktionellen effektiven Dosis (FED) berücksichtigt die Expositions-dosis jeder Einzelkomponente und setzt diese zur jeweiligen, meist konstanten²⁰ Grenzdosis ins Verhältnis. Dabei setzt sich die gegenwärtig vorhandene Gesamtdosis additiv aus den Einzeldosen definierter Zeitinkremente zusammen. Überschreitet die Summe dieser Quotienten einen definierten Grenzwert, tritt der toxische Effekt ein. Dabei korrespondiert der Wert eins per Definition mit einer Fluchtunfähigkeit von 50 % der exponierten Individuen. Für brandschutztechnische Nachweise wird empfohlen, FED-Werte von 0,3 (bzw. 0,1 für besonders sensible Personengruppen) nicht zu überschreiten [123, 134]. Bei einer angenommenen logarithmisch normalverteilten Sensibilität entspricht ein FED-Wert von 0,3 einer Fluchtunfähigkeit von

¹⁹ siehe Forschungsarbeit von Bansemer [19]

²⁰ Die Grenzdosis für Cyanwasserstoff ist keine Konstante, sondern lässt sich durch eine exponentielle Funktion ausdrücken [140].

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

11,4 % und ein Wert von 0,1 einer Fluchtunfähigkeit von 1,1 % der betrachteten Personengruppe [140]. Die fraktionelle effektive Dosis x_{FED} mit den Komponenten CO und HCN berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$x_{\text{FED}} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\nu_{\text{CO}_2} \cdot \varphi_{\text{CO}}}{35.000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{(\nu_{\text{CO}_2} \cdot \varphi_{\text{HCN}})^{2,36}}{1,2 \cdot 10^6} \Delta t \quad (4.3)$$

$$\text{mit } \nu_{\text{CO}_2} = \exp(\varphi_{\text{CO}_2}/5) \quad (4.4)$$

mit	ν_{CO_2}	Atemfrequenz-Erhöpfungsfaktor	–
	φ_{CO_2}	CO ₂ -Konzentration	in Vol.-%
	φ_{CO}	CO-Konzentration	in $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
	35.000	CO-Erträglichkeits-Dosis	in $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
	φ_{HCN}	HCN-Konzentration	in $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
	Δt	Zeitinkrement	in min

Dabei brücksichtigt der Faktor ν_{CO_2} die Steigerung der Atemfrequenz bei erhöhten CO₂-Konzentrationen.

Reizende Gase

Brandgase, die akut reizend auf die Augen und den oberen Atemtrakt wirken, lassen sich durch den Ansatz der fraktionellen effektiven Konzentration (FEC) bewerten. Bei diesem Ansatz addieren sich, wie bei dem FED-Modell, die Einzeleffekte der jeweiligen Komponenten. Jedoch unterstellt das FEC-Modell keinen Zusammenhang zur Dauer der Exposition (Dosisabhängigkeit), sondern berücksichtigt ausschließlich die temporäre toxische Wirkung der gegenwärtig anwesenden Komponente. Die fraktionelle effektive Konzentration x_{FEC} lässt sich folgendermaßen ausdrücken [140]:

$$x_{\text{FEC}} = \frac{\varphi_{\text{HCl}}}{F_{\text{HCl}}} + \frac{\varphi_{\text{HBr}}}{F_{\text{HBr}}} + \frac{\varphi_{\text{HF}}}{F_{\text{HF}}} + \frac{\varphi_{\text{SO}_2}}{F_{\text{SO}_2}} + \frac{\varphi_{\text{NO}_2}}{F_{\text{NO}_2}} \quad (4.5)$$

$$+ \frac{\varphi_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}}}{F_{\text{C}_3\text{H}_4\text{O}}} + \frac{\varphi_{\text{Formaldehyd}}}{F_{\text{Formaldehyd}}} + \sum \frac{\varphi_{\text{weitere Reizgase}}}{F_{\text{weitere Reizgase}}}$$

mit	φ	Konzentration der Reizgaskomponente	in $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
	F	Erträglichkeits-Konzentration der Reizgaskomponente	in $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$

4.3.3 Thermische Einwirkungen

Grundsätzlich benennt die Literatur drei Möglichkeiten thermischer Einwirkungen, die zur Fluchtunfähigkeit und zum Tod führen können: Hypothermie (Hitzschlag),

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

Verbrennungen der Körperoberfläche und Verbrennungen des Atemtraktes [198]:

- Der Haupteffekt einer **Hyperthermie** ist ein Anstieg der Körperkerntemperatur, die normalerweise bei ca. 37 °C liegt. Bereits ab 40 °C ist mit Bewusstseinsintrübungen zu rechnen, irreversible Schädigungen sind ab 42,5 °C zu erwarten. Diese können fatal enden, wenn sie nicht innerhalb weniger Minuten behandelt werden. Der Zeitraum bis zum Eintritt einer Hyperthermie ist von verschiedenen Faktoren, wie Lufttemperatur und -feuchtigkeitsgehalt, körperlicher Tätigkeit und Verfassung sowie der Bekleidung, abhängig. Für eine Expositionszeit von länger als 15 min werden erträgliche Lufttemperaturen von 80 °C für mit Wasserdampf gesättigter Luft und 120 °C für trockene Luft angegeben. Daraus lässt sich schließen, dass die relative Luftfeuchtigkeit die Toleranzzeit maßgeblich beeinflusst. Zwar steigt die Aufnahmekapazität von Luft für Wasser mit der Temperatur, jedoch zeigen Messungen, dass der Wasseranteil in einer Brandatmosphäre mit maximal ca. 10 Vol.-% anzunehmen ist. Somit stellt der Wasserdampfanteil üblicher Brandgase keine ernsthafte Gefährdung dar. [198]
- Die Zeit bis zum Auftreten von **Verbrennungen der Hautoberfläche** ist stark vom Wärmestrom abhängig, der sich aus Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung zusammensetzt. Es entstehen Schmerzen, wenn die Hauttemperatur in 0,1 mm Tiefe eine Temperatur von 44,8 °C erreicht. Dem Schmerz folgen schnell Verbrennungen, die eine Fluchtunfähigkeit, schwere Verletzungen oder den Tod herbeiführen. [198]
- **Verbrennungen des Atemtraktes**, die vom Einatmen von Luft mit einem Feuchtegehalt in der Größenordnung von 10 % resultieren, treten nicht auf, ohne dass auch Hautverbrennungen am Körper oder im Gesicht entstehen. So sind die Erträglichkeitsgrenzen für Hautverbrennungen in der Regel niedriger als für Verbrennungen des Atemtraktes. [198]

Zusammenfassend ist also zur Beurteilung der Wärmeeinwirkung auf Personen lediglich die Berücksichtigung von zwei Kriterien, nämlich das Eintreten von Hautverbrennungen zweiten Grades und die Wärmeeinwirkung bei der eine Hyperthermie das Bewusstsein beeinträchtigt, erforderlich. Der Beurteilungsansatz nach ISO 13571 unterscheidet hierbei die Übertragungsmechanismen Wärmestrahlung und konvektiven Wärmeübergang. Diese werden, ähnlich zu den narkotisch wirkenden Brandgasen, über einen Ansatz der fraktionellen effektiven Dosis bewertet, um die akkumulierte Wirkung auf Personen abzubilden. [140]

Wärmestrahlung

Die Erträglichkeitsgrenze für menschliche Haut liegt etwa bei einer radiativen Strahlungsdichte von 2,5 kW/m². Unter diesem Wert kann die Haut die Einwirkung für 30 min und länger aushalten, ohne dass es zu einer nennenswerten Beeinträchtigung der Erträglichkeit kommt. Bei einer Strahlungsexposition mit höherer Intensität als 2,5 kW/m² verringert sich die Zeit bis zum Auftreten von zweitgradigen Verbrennungen der Haut rapide. Den funktionalen Zusammenhang, ursprünglich entwickelt von Wieczorek und Dembsey [224], zeigt Gleichung 4.6 und visualisiert Abbildung 4.2. [140]

$$t_{\text{Irad}} = 6,9 \cdot \dot{q}^{-1,56} \quad (4.6)$$

mit	t_{Irad}	Zeit bis zu Verbrennungen zweiten Grades	in min
	\dot{q}	Spezifischer radiativer Wärmestrom	in kW · m ⁻²

Die Zeit bis zum Auftreten von Schmerzen durch auftreffende Strahlung kann ebenfalls das Verhalten und die Fluchtfähigkeit von Personen beeinflussen. Sie lässt sich durch die folgende Funktion ausdrücken [140]:

$$t_{\text{Irad}} = 4,2 \cdot \dot{q}^{-1,9} \quad (4.7)$$

mit	t_{Irad}	Zeit bis zu auftretenden Schmerzen	in min
	\dot{q}	Spezifischer radiativer Wärmestrom	in kW · m ⁻²

Konvektiver Wärmeübergang

Zur Quantifizierung der Erträglichkeit bei konvektiver Wärme bietet die ISO 13571 zwei funktionelle Ansätze, die auf experimentell ermittelten Datenpunkten für verschiedene Bekleidungsformen basieren. Der für Brandszenarien in Schienenfahrzeugen infrage kommende funktionale Zusammenhang stützt sich auf Versuchsergebnisse von Crane, bei denen die maximal erträgliche Dauer (Kriterium: Kollaps) für bekleidete Personen ermittelt wurde. Im Speziellen wurden gesunde, männliche Erwachsene in üblicher Geschäftskleidung erhöhten und konstant gehaltenen Lufttemperaturen exponiert und die vier Messpunkte über eine Exponentialfunktion (Gleichung 4.8) korreliert. Der funktionale Zusammenhang ist in Abbildung 4.2 dargestellt [60]:

$$t_{\text{Iconv}} = (4,1 \cdot 10^8) \cdot T^{-3,61} \quad (4.8)$$

Kapitel 4 – Personensicherheit mit Brandschutzingenieurmethoden

mit $t_{I_{conv}}$ Maximal erträgliche Expositionsdauer in min
 T Lufttemperatur in °C

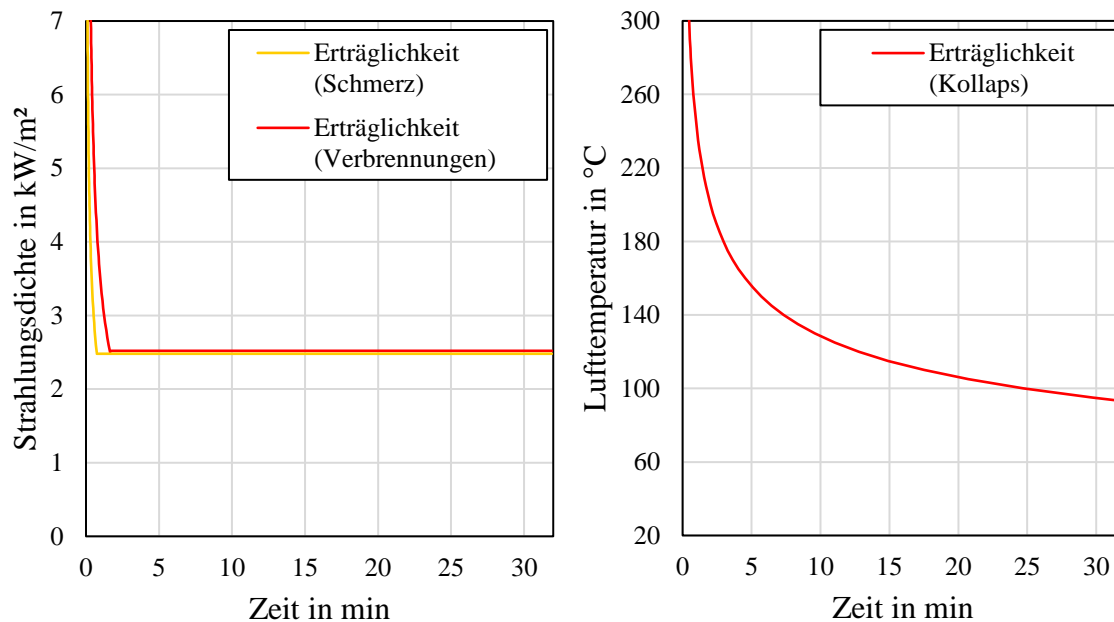


Abbildung 4.2: Erträglichkeit gegenüber Wärmestrahlung (links) und konvektivem Wärmeübergang (rechts) nach ISO 13571

Kapitel 5

Experimentelle Untersuchungen

Dieses Kapitel erörtert die experimentell durchgeführten Untersuchungen, bei denen einerseits der Effekt verschiedener Zündinitiale auf das Brandverhalten von Reisegepäck und andererseits die Ermittlung energetischer und vor allem stofflicher Emissionen typischer Gepäckstücke adressiert werden.

5.1 Versuchsziele

5.1.1 Intention der Vorversuche

Es ist anzunehmen, dass das Brandverhalten eines Gepäckstückes nicht nur durch dessen Komposition, Masse, Packungsdichte oder Oberflächenbeschaffenheit, geprägt ist. Die Zündquelle in ihrer Intensität und die Konfiguration zum Brandobjekt haben ebenfalls signifikanten Einfluss¹. Deswegen werden in Vorversuchen identische Gepäckstücke variierenden Zündquellenintensitäten und -konfigurationen ausgesetzt. Die so generierten Versuchsdaten bilden eine Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Zündquelle für die Hauptversuche. Des Weiteren stellt sich die Frage, inwiefern in Brandversuchen ermittelte Ergebnisse generell reproduzierbar sind. Infolgedessen wird die für die Hauptversuche anzuwendende Zündquelle an einem weiteren identischen Gepäckstück getestet.

5.1.2 Intention der Hauptversuche

Ziel der Hauptversuche ist es, zunächst real anzunehmende Reisegepäckstücke zu identifizieren, hinsichtlich ihrer Beschaffenheit und Komposition zu typisieren und die erforderlichen Brandkenngrößen² zu ermitteln. Anschließend soll ein repräsentatives Brandmodell entwickelt (Kapitel 6) und für numerische Brandsimulationen (Kapitel 7 und 8) nutzbar gemacht werden.

¹ vgl. Kapitel 3

² vgl. Abschnitt 5.2.1

5.2 Versuchskonfiguration und Messtechnik

Da bislang keine anwendbare Versuchskonfiguration zur experimentellen Charakterisierung des Brandverhaltens von Gepäckstücken existiert, wird diese im Hinblick auf möglichst realitätsnahe Bedingungen und die zweckmäßige Erfassung der benötigten Brandkenngrößen entwickelt.

5.2.1 Erforderliche Brandkenngrößen

Um einen Brand im Modell vollständig beschreiben zu können, sind neben der zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrates auch die dynamischen Freisetzungen toxisch relevanter Leitgase sowie die Rauchentwicklungsrates relevant [155]. Allerdings sind nicht sämtliche Brandkenngrößen im Experiment direkt erfassbar, lassen sich jedoch zumeist über messbare Hilfsgrößen bestimmen. Um die Ergebnisse des zu entwickelnden Brandmodells in der Computersimulation mit den Experimenten zu vergleichen, sollen zusätzliche Parameter, wie etwa die emittierte Strahlungsdichte, an verschiedenen Positionen aufgezeichnet werden. Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die Messgrößen einschließlich der Erfassungsmethoden, aus denen sich die erforderlichen Parameter für das Brandmodell ableiten lassen. Die zusätzliche Aufzeichnung der Brandversuche über Video- und Fotoaufnahmen dokumentiert die Branddynamik und etwaige auftretende Brandphänomene.

Tabelle 5.1: Experimentell zu erfassende Brandkenngrößen

Emissionsart	Parameter	Abschnitt
Energetisch	Wärmefreisetzungsrates über die Sauerstoffverbrauchs-Methode	5.2.3
	Effektive Verbrennungswärme über Wärmefreisetzungs- und Massenverlustrate	5.2.4
	Strahlungsdichte über einzelne Wärmeflussensoren	5.2.5
Stofflich	Konzentrationen der Rauchgaskomponenten über FTIR-Spektroskopie	5.2.6
	Rauchgastransmission über Lichtmessstrecke zur Ermittlung des Rauchpartikel-Entstehungsanteils	5.2.7

5.2.2 Versuchskonfiguration

Bei der Entwicklung des Experimentalaufbaus stehen einerseits die Simulation möglichst realitätsnaher Bedingungen und andererseits das praktikable Erfassen der benötigten Brandkenngrößen im Fokus. Die Brandtechnologie der Currenta GmbH & Co. OHG in Leverkusen stellt dafür Ihre Versuchsräumlichkeiten, ausgestattet mit umfangreicher Mess- und Analysetechnik, zur Verfügung und begleitet die Brandversuche. Für die Experimente erweist sich die vorhandene ISO 9705-Abzugshaube [150] als geeignet, da sich mit dieser sowohl die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrate über die Sauerstoffverbrauchs-Methode und die Messung der Rauchgastransmission als auch die Erfassung der toxischen Gaskomponenten im Rohr des Abzuges simultan realisieren lassen. Zudem bietet sie ausreichend Abzugsleistung, um den zu erwartenden Rauchvolumenstrom abzuführen. Unter der quadratischen 3 m x 3 m-Haube besteht ausreichend Platz für die Versuchsanordnung.

Das Gepäckstück wird auf einer nichtbrennbaren Calciumsilikat-Platte positioniert, unter der sich eine Digitalwaage zur kontinuierlichen Erfassung der Massenverluste befindet [148]. Um externe Einflüsse und die Ansprechzeiten der Messinstrumentierung zu verringern, wird die Apparatur mit einer Unterkonstruktion auf ein Höhenniveau von 1,2 m angehoben und die Umrandung der Haube mit zusätzlichen Metallschürzen verkleidet. Auf Stativen sind die Sonden zur Erfassung der Strahlungsdichte und Kaltlicht-Scheinwerfer um die Versuchsplatte herum angeordnet (Abbildungen 5.1 und 5.2).

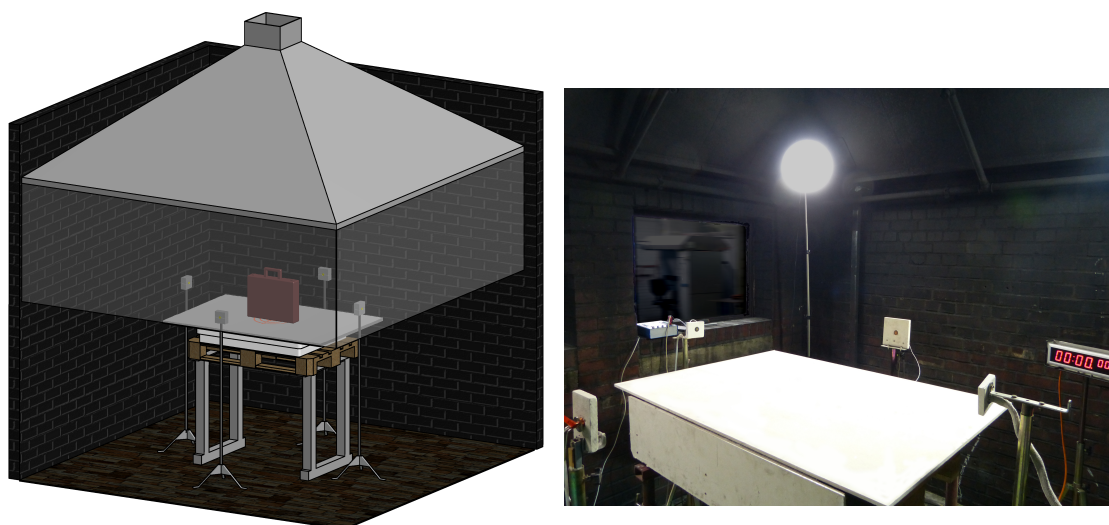


Abbildung 5.1: CAD-Ansicht (links) und Foto (rechts) der Versuchskonfiguration

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

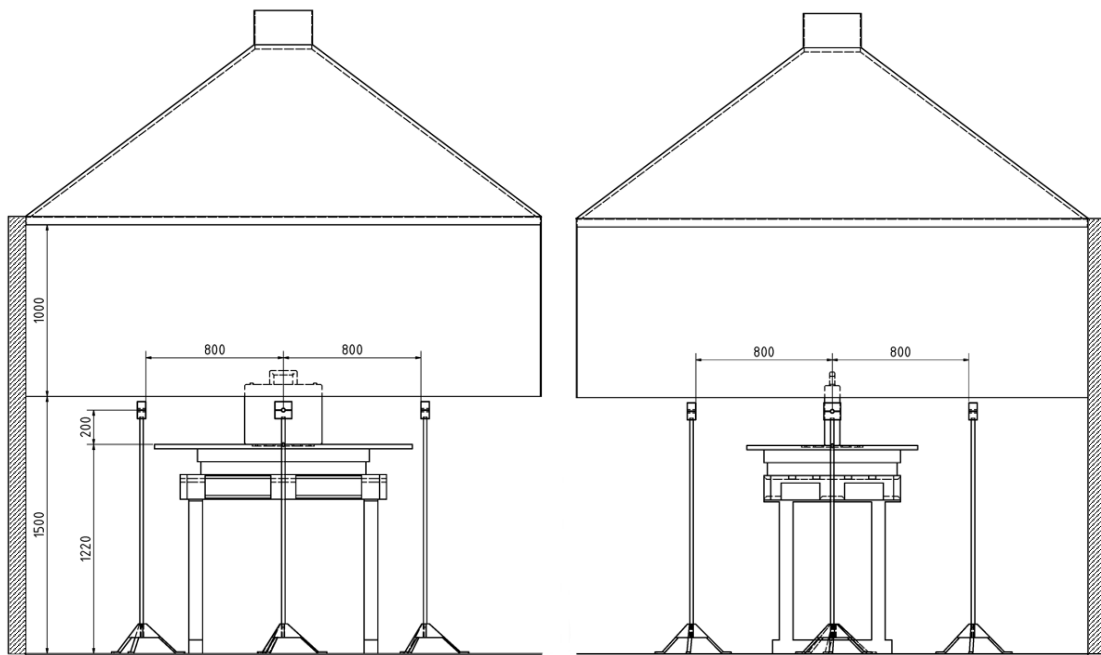


Abbildung 5.2: Front- (links) und Seitenansicht (rechts) des Aufbaus in CAD

5.2.3 Wärmefreisetzungsrate

Die Sauerstoffverbrauchs-Methode

Bereits im Jahre 1917 konnte für eine große Anzahl organischer Flüssigkeiten und Gase gezeigt werden, dass bei deren vollständiger Verbrennung pro Masseneinheit Sauerstoff eine ähnliche Wärmemenge freigesetzt wird. Dieser Zusammenhang ließ sich für feste Brennstoffe ebenfalls bestätigen und mit einem Wert von 13,1 kJ/g Sauerstoff quantifizieren. Dieser Wert wird für praktische Anwendungen genutzt und ist exakt, mit sehr wenigen Ausnahmen, innerhalb von $\pm 5\%$. Die Sauerstoffverbrauchs-Methode wird derzeit als präzisestes Verfahren angesehen, um die Wärmefreisetzung bei experimentellen Bränden zu ermitteln. Die Grundanforderung für dieses Verfahren besteht lediglich darin, dass sämtliche Verbrennungsprodukte gemeinsam über ein Abzugssystem abgeführt werden. An einer Stelle, an der von einer hinreichenden Durchmischung ausgegangen werden kann, werden Durchfluss und Gaszusammensetzung gemessen [160].

Grundsätzlich berechnet sich die Wärmefreisetzungsrate \dot{q} somit aus:

$$\dot{q} = E \cdot (\dot{m}_a \cdot Y_{\text{O}_2}^a - \dot{m}_e \cdot Y_{\text{O}_2}^e) \quad (5.1)$$

mit E	Wärmefreisetzung pro Masseneinheit O_2	$\approx 13,1 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$
$Y_{\text{O}_2}^a$	O_2 -Massenanteil der zuströmenden Luft	$\approx 0,232 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$

$Y_{O_2}^e$	O ₂ -Massenanteil der Verbrennungsgase ³	in g · g ⁻¹
$\dot{m}_e; \dot{m}_a$	Zuströmender bzw. abgeführter Massenstrom	in kg · s ⁻¹

Der Sauerstoffverbrauchs-Faktor

Aufgrund des vorliegenden offenen Systems, kann nicht der zugeführte Luftstrom, sondern nur der über den maschinellen Abzug abgeführte Luftvolumenstrom gemessen werden. Um einen Zusammenhang zwischen dem zu- und dem abgeführten Luftvolumenstrom herzustellen, wird der Sauerstoffverbrauchs-Faktor Φ definiert. Er beschreibt den Anteil des Luftstroms, der, infolge der Verbrennungsreaktion, keinen Sauerstoff mehr enthält [159]:

$$\Phi = \frac{\dot{m}_{O_2}^0 - \dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{O_2}^0} \quad (5.2)$$

mit $\dot{m}_{O_2}^0$	Sauerstoffmassenstrom (Anfangswert)	in kg · s ⁻¹
\dot{m}_{O_2}	Sauerstoffmassenstrom (diskontinuierlich gemessen)	in kg · s ⁻¹

Die Genauigkeit der Messergebnisse lässt sich verbessern, wenn zusätzlich die Konzentrationen von CO₂, CO⁴ und H₂O berücksichtigt werden [160]. Die folgende Formel zeigt den Sauerstoffverbrauchs-Faktor Φ unter Einbeziehung der Anteile von O₂ und CO₂, wie sie beispielsweise in der ISO 9705 [150] zur Anwendung kommt. Eine detaillierte Herleitung findet sich in [159].

$$\Phi = \frac{x_{O_2}^0 \cdot (1 - x_{CO_2}) - x_{O_2} \cdot (1 - x_{CO_2}^0)}{x_{O_2}^0 \cdot (1 - x_{CO_2} - x_{O_2})} \quad (5.3)$$

mit $x_{O_2}^0$	Sauerstoffanteil (Anfangswert)	in mol · mol ⁻¹
$x_{CO_2}^0$	Kohlendioxidanteil (Anfangswert)	in mol · mol ⁻¹
x_{O_2}	Sauerstoffanteil (diskontinuierlich gemessen)	in mol · mol ⁻¹
x_{CO_2}	Kohlendioxidanteil (diskontinuierlich gemessen)	in mol · mol ⁻¹

³ Sauerstoffanalysatoren bestimmen in der Regel den molaren Sauerstoffanteil in einem Gasgemisch, welcher dann zum Massenanteil umgeformt wird.

⁴ Die Bildung von CO findet in der angewendeten Methode nach ISO 9705 keine Berücksichtigung.

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

Abscheidung des Wasseranteils

Bevor das Gasgemisch den paramagnetischen Analysator (siehe unten) durchströmt, wird der Wasseranteil extrahiert. Hierzu nutzt man eine vorgeschaltete Kühlfalle, die bei einer Temperatur von 4 °C zur Auskondensierung des Wasseranteils führt, so dass der resultierende molare Anteil auf einer trockenen Basis messbar ist. Der Sauerstoffanteil der zuströmenden Luft ergibt sich nach ISO/TR 9705-2 [156] aus folgender Gleichung:

$$x_{\text{O}_2}^{\text{a}} = x_{\text{O}_2}^0 \cdot \left[1 - \frac{RH}{100} \cdot \frac{p_s(T_{\text{a}})}{p_{\text{a}}} \right] \quad (5.4)$$

mit	$x_{\text{O}_2}^{\text{a}}$	Sauerstoffanteil (Anfangswert, inkl. Wasserdampf)	in mol · mol ⁻¹
	$x_{\text{O}_2}^0$	Sauerstoffanteil (Anfangswert)	in mol · mol ⁻¹
	RH	Relative Luftfeuchtigkeit	in %
	$p_s(T_{\text{a}})$	Wasserdampf-Sättigungsdruck	in Pa
	T_{a}	Temperatur der Umgebungsluft	in K
	p_{a}	Umgebungsdruck	in Pa

Bestimmung des Volumenstroms im Abzugsrohr

Der Volumenstrom durch den Abzug \dot{V}_{298} , bezogen auf Normaldruck und auf eine Umgebungstemperatur von 25 °C normiert, beträgt nach ISO 9705 [150]:

$$\dot{V}_{298} = (A \cdot k_t / k_p) \cdot \frac{1}{\rho_{298}} \cdot (2 \cdot \Delta p \cdot T_0 \cdot \rho_0 / T_s)^{1/2} \quad (5.5)$$

mit	A	Querschnittsfläche des Abzugrohres	in m ²
	k_t	Korrekturfaktor für den Massenstrom (vgl. [150])	–
	k_p	Korrekturfaktor für die Reynolds-Zahl (vgl. [150])	–
	ρ_{298}	Luftdichte bei Normaldruck und 25 °C	in kg · m ⁻³
	Δp	Gemessene Druckdifferenz	in Pa
	T_0	Null-Temperatur	= 273,15 K
	ρ_0	Luftdichte bei Normaldruck und 0 °C	in kg · m ⁻³
	T_s	Gastemperatur im Abzugsrohr	in K

Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates

Unter Einbeziehung der vorgenannten Ausdrücke berechnet sich die Wärmefreisetzungsrates des Brandes \dot{q} , gezündet mit einem Propangas betriebenen Gasbrenner, wie folgt [150]:

$$\dot{q} = E_{\text{O}_2} \cdot \dot{V}_{298} \cdot x_{\text{O}_2}^a \cdot \left(\frac{\Phi}{\Phi \cdot (\alpha - 1) + 1} \right) - \frac{E_{\text{O}_2}}{E_{\text{C}_3\text{H}_8}} \cdot \dot{q}_B \quad (5.6)$$

mit E_{O_2}	Energiefreisetzung pro verbrauchtem O_2 (generisch für Prüfobjekt, siehe Gl. 5.1)	$\approx 17.200 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
$E_{\text{C}_3\text{H}_8}$	Energiefreisetzung Propan	$= 16.800 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
\dot{V}_{298}	Abzugvolumenstrom (Gl. 5.5)	in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$x_{\text{O}_2}^a$	O_2 -Anteil der zuströmenden Luft (Gl. 5.4)	in $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$
Φ	Sauerstoffverbrauchs-Faktor (Gl. 5.3)	–
α	Reaktionsbedingter Ausdehnungsfaktor (Wert gilt für hydrokarbone Brennstoffe)	$= 1,105$
\dot{q}_B	Wärmefreisetzungsrates der Zündquelle	in kW

Technische Umsetzung

Die Sauerstoffkonzentration wird mit einem paramagnetischen Analysator und die CO - und CO_2 -Anteile mit dem Verfahren der nicht dispersiven Infrarot- (NDIR)-Spektroskopie im selben Instrument nach ISO 19701 [143] quantifiziert. Die erforderliche Systemkalibrierung erfolgt mit einem Propangas-Brenner nach ISO 9705.

5.2.4 Effektive Verbrennungswärme

Die effektive Verbrennungswärme $\Delta h_{c,\text{eff}}$ beschreibt das Verhältnis von Heizwert zur aktuellen Wärmefreisetzungsrates. Bezogen auf die Massenverlustrate ergibt sich die spezifische Größe [16]:

$$\Delta h_{c,\text{eff}}(t) = \frac{\dot{q}(t)}{\dot{m}(t)} \quad (5.7)$$

mit $\Delta h_{c,\text{eff}}(t)$	Effektive Verbrennungswärme	in $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ bzw. $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$
$\dot{q}(t)$	Wärmefreisetzungsrates	in kW
$\dot{m}(t)$	Massenverlustrate	in $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$

Die mittlere effektive Verbrennungswärme $\Delta h_{c,\text{eff,mean}}$ kann als Quotient des Integrals der Wärmefreisetzungsrates über den betrachteten Zeitraum und die Gesamt-massendifferenz Δm betrachtet werden. Aufgrund der diskreten Zeitschritte Δt

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

lässt sich das Integral auch als Summe approximieren. $\Delta h_{c,\text{eff,mean}}$ ist zudem auch als Quotient der Gesamtwärmefreisetzung THR^5 nach DIN 13823 [80] und der Gesamtmassendifferenz Δm darstellbar:

$$\Delta h_{c,\text{eff,mean}} = \frac{\int \dot{q}(t) \delta t}{\Delta m} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\sum \dot{q}(t) \Delta t}{\Delta m} \quad \text{oder} \quad \frac{THR}{\Delta m} \quad (5.8)$$

5.2.5 Strahlungsdichte

Zur Aufzeichnung der Strahlungsdichte kommen Wärmeflussaufnehmer des Typs »Schmidt-Boelter« des Herstellers MEDTHERM [180] zum Einsatz. In Kalziumsilikat eingebettet, werden die Sensoren auf jeder Seite des Versuchsaufbaus im Abstand von 800 mm auf Stativen angeordnet und eine separate Kühlwasserversorgung hergestellt. ISO 14934 [141] beschreibt das Verfahren zur Kalibrierung der Messsonden.

5.2.6 Rauchgaskomponenten

Mit der Methode der Fourier-Transformations-Infrarot (FTIR)-Spektroskopie werden die emittierten Brandgase analysiert. Mit ihr ist es möglich, die toxikologisch relevanten Rauchgaskomponenten⁶ simultan und zeitdiskret zu detektieren und zu quantifizieren [19].

Funktionsprinzip der FTIR-Spektroskopie

Dieses spektralanalytische Verfahren beruht auf der Eigenschaft von elektrisch dipoligen Gasmolekülen, elektromagnetische Strahlung zu absorbieren. Hierzu wird infrarote Strahlung des mittleren⁷ Bereiches durch die zu analysierende Probe auf einen Detektor geschickt. Mit ausgerichteten Spiegeln durchläuft der Lichtstrahl die Gasprobe mehrfach und erreicht eine Gesamtmessstrecke d von 3 m, siehe Abbildung 5.3.

⁵ engl. total heat release

⁶ vgl. Abschnitt 4.3.2

⁷ Hierunter versteht man Wellenlängen zwischen 2,5 μm und 25 μm . Das wiederum entspricht Wellenzahlen (reziproker Wert der Wellenlänge) zwischen 4.000 cm^{-1} und 400 cm^{-1} .

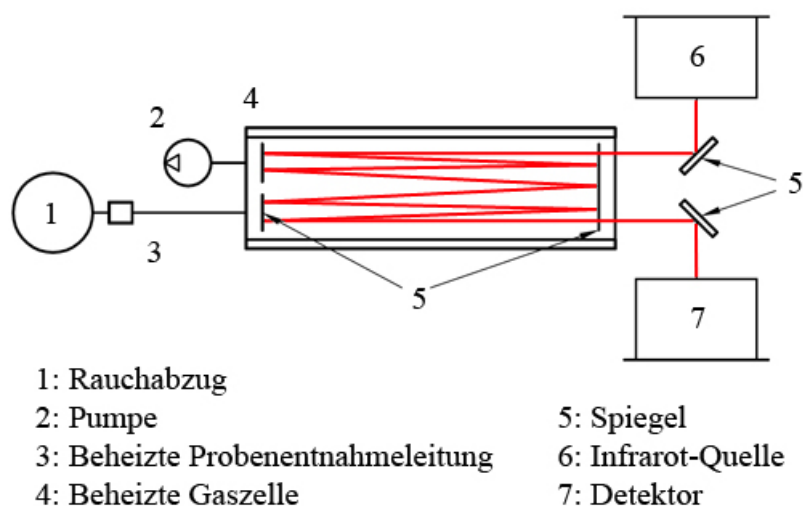


Abbildung 5.3: Schema der Gasentnahme und IR-Messung nach ISO 9705-2

Jede detektierbare Substanz weist hinsichtlich ihrer Molekülstruktur spezifische elektromagnetische Absorptionscharakteristika auf, lässt sich so identifizieren und anhand von kalibrierten Referenzspektren in ihrer Konzentration auch quantifizieren. Das Lambert-Beersche Gesetz liefert den physikalischen Zusammenhang zwischen der Strahlungsintensität $I_{\lambda,0}$ vor und der Strahlungsintensität I_{λ} nach dem Durchlaufen des zu analysierenden Gases der Konzentration c und der Schichtdicke d . Dabei beschreibt der spezifische Extinktionskoeffizient K_m das charakteristische Absorptionsverhalten der vorliegenden Substanz⁸. Zu beachten ist, dass die Zusammenhänge nur für einen begrenzten Wellenlängenbereich anzuwenden sind, da der spezifische Extinktionskoeffizient mit der Wellenlänge variiert. Tiefergehende Betrachtungen zur Theorie und Anwendung der FTIR-Spektroskopie finden sich beispielsweise bei Bansemer. [19]

Technische Umsetzung

In dieser Untersuchung wird ein FTIR-Spektrometer verwendet, das den Detailanforderungen hinsichtlich Intensität, Auflösung, Scanrate, Nachweisgrenzen, etc. der DIN EN 45545-2 [82] entspricht. Die Entnahmestelle für die Gasprobe befindet sich im Rohr der Abzugshaube an einer Position, bei der von einer gleichmäßigen Durchmischung der Rauchgase auszugehen ist. Die Probenentnahmeleitung und die Messkammer werden auf ca. 165 °C beheizt, um die Kondensation von Wasserdampf und die Abscheidung von darin gelösten Brandrauchbestandteilen, wie etwa Cyanwasserstoff und Chlorwasserstoff, zu vermeiden [82]. Allerdings sind der Rauchabzug und die sich anschließende Leitung bis zur Anschlussstelle der Proben-

⁸ vgl. Gleichung 4.2 in Abschnitt 4.3.1

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

entnahme nicht beheizt, was eine vorherige (Teil-) Kondensation entsprechender Substanzen vermuten lässt. Vor dem Eintritt in die Messkammer passiert das Gas einen Vor- und einen Hauptfilter mit 2 μm bzw. 1 μm Porengröße, um die Messstrecke nicht mit Partikeln zu verunreinigen. Vor Beginn der Versuchsreihe wird die zugehörige Messtechnik nach ISO 19702 [144] mit Referenzgasen kalibriert.

Bei der anschließenden Auswertung der generierten Absorptionsspektren stehen besonders die toxikologisch bedeutsamen Leitgase⁹ CO, CO₂, Halogenwasserstoffe (HBr, HCl, HF), Stickoxide (NO, NO₂), Schwefeldioxid (SO₂) und Cyanwasserstoff (HCN) im Fokus.

5.2.7 Rauchgastransmission

Die Rauchgastransmission repräsentiert eine Hilfsgröße, die einerseits zur Bestimmung des Rauchpartikel-Entstehungsanteils sowie andererseits zur Ermittlung der Raucherzeugungsraten dient. Dabei kommt der Rauchpartikel-Entstehungsanteil als Eingabeparameter für die Brandsimulation und die Raucherzeugungsraten beispielsweise beim Einsatz physikalischer Raucherzeugungsmodelle zur Anwendung.

Technische Umsetzung

Die Messung der Rauchgastransmission erfolgt mit einer Lichtmessstrecke, die im Rohr des Rauchabzugs in Höhe der FTIR-Entnahmesonde¹⁰ angeordnet ist. Die Lichtmessstrecke besteht aus einer Weißlichtlampe, Linsen, einer Blende sowie einer Fozelle und entspricht den Detailanforderungen nach ISO 7905 [150]. Eine Überprüfung des optischen Systems mit Neutralsdichtefiltern nach DIN EN 13823 [80] findet im Vorfeld der Versuche statt.

Bestimmung der Rauchpartikelkonzentration

Der Rauchpartikel-Entstehungsanteil resultiert aus der Rauchpartikelkonzentration, die sich wiederum aus der Messung der Lichtschwächung ableiten lässt. Ausgangspunkt bildet die Gleichung 4.2 in Abschnitt 4.3.1. Ersetzt man in dieser den allgemeinen Extinktionskoeffizienten K durch das Produkt aus spezifischem Extinktionskoeffizienten K_m und Rauchpartikelkonzentration c_m , lässt sich der Ausdruck folgendermaßen umformen [192]:

$$c_m = \frac{\ln\left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_{\lambda}}\right)}{K_m \cdot l} \quad (5.9)$$

⁹ vgl. Abschnitt 4.3.2 bzw. DIN EN 45545-2 [82]

¹⁰ vgl. Abschnitt 5.2.6

mit	c_m	Rauchpartikelkonzentration	in $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
	$I_{\lambda,0}$	Intensität des ausgesendeten Lichtstrahls	–
	I_λ	Intensität des empfangenen Lichtstrahls	–
	l	Weglänge	in m
	K_m	Spezifischer Extinktionskoeffizient	in $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

Es ist dabei in der Brandtechnologie üblich, den massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m mit $8,7 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ anzunähern [191]. Somit ist die Rauchpartikelkonzentration ausschließlich in Abhängigkeit von der Lichtschwächung darstellbar.

Damit lässt sich nun der Massenstrom der freigesetzten Rauchpartikel berechnen:

$$\dot{m}_R = c_m \cdot \dot{V} \cdot C_s \quad (5.10)$$

mit	\dot{V}	Rauchgasvolumenstrom	in $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
	C_s	Korrekturfaktor für die radiale Abnahme der Rauchpartikelkonzentration in Wandnähe (hier: 0,97) [192]	

Der Rauchpartikel-Entstehungsanteil

Der Rauchpartikel-Entstehungsanteil¹¹ Ψ_R bezeichnet die freigesetzte Rauchpartikelmasse pro verbrannter Brennstoffmasse. Bei dynamischen Messverfahren lassen sich die entsprechenden Massenströme über Zeitschritte summieren [15, 134]:

$$\Psi_R = \frac{m_R}{m_{BS}} = \frac{\dot{m}_R \cdot \Delta t}{\dot{m}_{BS} \cdot \Delta t} \quad (5.11)$$

mit	Ψ_R	Rauchpartikel-Entstehungsanteil	–
	m_R	Masse der freigesetzten Rauchpartikel	in kg
	m_{BS}	Masse verbrannten Brennstoffes	in kg
	\dot{m}_R	Massenstrom der freigesetzten Rauchpartikel	in $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
	\dot{m}_{BS}	Massenstrom des Brennstoffes	in $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
	Δt	Zeitschritt	in s

Durch Einsetzen der Gleichungen 5.9 und 5.10 erhält man den folgenden Ausdruck für den dynamischen Rauchpartikel-Entstehungsanteil, der sich mit den getätigten Annahmen nun einzig über die Rauchgastransmission und die Massenverlustrate

¹¹ engl. soot yield

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

des Brennstoffes darstellen lässt [192]:

$$\Psi_R = \frac{\dot{m}_R}{\dot{m}_{BS}} = \frac{\ln\left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_\lambda}\right) \cdot \dot{V} \cdot C_s}{K_m \cdot l \cdot \dot{m}_{BS}} \quad (5.12)$$

Die Raucherzeugungsrate

Die Raucherzeugungsrate ist eine zusätzliche Brandkenngröße, die sich aus den Transmissionsdaten ermitteln lässt. Wie eingangs erwähnt, findet sie Anwendung bei physikalischen Raucherzeugungsmodellen, die mit einem Raucherzeugungsaggregat arbeiten. Nach ISO 9705 [150] und DIN EN 13823 [80] berechnet sich die Rauchentwicklungsrate¹² *SPR* über:

$$SPR(t) = \frac{\dot{V}}{l} \cdot \ln\left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_\lambda(t)}\right) \quad (5.13)$$

mit \dot{V}	Rauchgasvolumenstrom des Abzugsystems	in $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
l	Weglänge	in m
$I_{\lambda,0}$	Intensität des ausgesendeten Lichtstrahls	–
I_λ	Intensität des empfangenen Lichtstrahls	–

Somit stellt sich die gesamte Rauchentwicklung¹³ *TSP* als Integral über den Prüfzeitraum bzw. Summe der Rauchentwicklungsraten über die entsprechenden Zeitschritte dar:

$$TSP(t) = \int SPR(t) \delta t \quad \text{bzw.} \quad \sum SPR(t) \Delta t \quad (5.14)$$

5.2.8 Sicherheitsaspekte

Für die experimentellen Untersuchungen sollen möglichst realistische Reisegepäckstücke beurteilt werden. Der Inhalt der einzelnen Koffer und Reisetaschen ist zwar grundsätzlich bekannt, jedoch lässt sich das Brandverhalten einzelner Artikel nicht zuverlässig prognostizieren. Eine zusätzliche Gefährdung können Gegenstände darstellen, bei denen außergewöhnliche Reaktionen zu erwarten sind, wie etwa bei Druckgasbehältern (Deodorant, Rasierschaum) oder Akkumulatoren (Notebook, Rasierer, etc.)¹⁴. Das Sicherheitskonzept setzt sich dafür aus den folgenden Haupt-

¹² engl. smoke production rate

¹³ engl. total smoke production

¹⁴ vgl. Abschnitt 5.3.2

komponenten zusammen:

Generell befinden sich in unmittelbarer Nähe zum Versuchsaufbau keine brennbaren Materialien, so dass nicht von einer Brandausbreitung auf andere Gegenstände ausgegangen werden muss. Neben mobilen Löschgeräten (Kübelspritze, Wasserschlauch, div. Feuerlöcher) kann auch die stationäre Sprühwasser-Löschanlage unter der Haube bei Bedarf unmittelbar in Betrieb genommen werden. Für den Fall einer Rauchentwicklung über die Abzugshaube hinaus, verfügt die Versuchshalle über ein zusätzliches maschinelles Rauchabzugssystem, das ebenfalls an die Rauchgasreinigungsanlage angeschlossen ist. Als persönliche Schutzausrüstung zur Vor- und Nachbereitung der Versuche tragen die Mitarbeiter flammhemmende Schutzkleidung, einen Schutzhelm, einen Gesichtsschutz sowie ein umluftabhängiges Atemschutzgerät. Während der Versuche ist die Überwachung von außen durch ein Sichtfenster möglich.

5.2.9 Abschließende Beurteilung der Experimentalkonfiguration

Unter der Maßgabe, einerseits möglichst realitätsnahe Bedingungen nachzuempfinden und andererseits die benötigten Brandkenngrößen praktikabel zu erfassen, wird in den Abschnitten 5.2.2 bis 5.2.8 eine Experimentalkonfiguration zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Gepäckstücken konzipiert. Um den jeweiligen Ansprüchen nachzukommen, müssen teilweise Kompromisslösungen gefunden werden. So kann sich aufgrund des Einsatzes des Rauchabzugsystems keine Rauchgasschicht ausbilden und in der Realität gegebenenfalls auftretende thermische Interaktionen mit strahlendem Rauchpartikeln oder benachbarten Gegenständen werden im Experiment nicht berücksichtigt. Ein weiteres Merkmal, das mit der kontinuierlichen Rauchabführung als »offenes System« einhergeht, ist die stetige Nachführung von Luftsauerstoff zum Brandobjekt, wodurch tendenziell eher vollständig (z. B. CO_2) als partiell oxidierte (z. B. CO) Verbrennungsprodukte im Experiment zu erwarten sind. Insofern müssen die Einflüsse auf die Brand- und Raucherzeugungsdynamik sowie die in der Realität möglicherweise verstärkte Bildung partiell oxidierter Substanzen bei der Entwicklung des Brandmodells¹⁵ entsprechend Berücksichtigung finden.

¹⁵ vgl. Abschnitt 6.2

5.3 Gepäckstücke

5.3.1 Gepäckstücke für Vorversuche

Für die Vorversuche sind fünf identische Gegenstände erforderlich¹⁶. Diese sollen zum einen ähnlich zu realem Reisegepäck, zum anderen vergleichsweise preisgünstig zu beschaffen sein. Die folgenden Abbildungen zeigen die für die Vorversuche ausgewählten Reisetaschen sowie deren Inhalt, welcher im Anhang A.3 explizit aufgelistet ist.



Abbildung 5.4: Inhalte (links) und fertige Taschen (rechts) für die Vorversuche

5.3.2 Gepäckstücke für Hauptversuche

Für die Hauptversuche werden Gepäckstücke, wie sie typischerweise in Schienenfahrzeugen vorkommen, identifiziert und bezüglich ihrer Beschaffenheit und Komposition analysiert. Hinsichtlich des Zündverhaltens eines Gepäckstückes ist zunächst die Beschaffenheit des Außen- bzw. Oberflächenmaterials ein bedeutendes Kriterium – zumindest für die Szenarien, bei denen die Zündquelle von außen einwirkt. Somit sind Außenmaterialien, wie Leichtmetall oder (Kunst-) Leder, denen eine verhältnismäßig geringe Zündneigung zuzuschreiben ist [227], für diese Untersuchung von nachrangiger Priorität. Dementsprechend stärker in den Fokus rücken aus Kunstfasern hergestellte Reisekoffer und -taschen, bei denen sowohl eine größere Zündneigung als auch ein stärkeres Abbrandverhalten zu erwarten ist [227]. So kommen für die experimentellen Untersuchungen vorrangig Gepäckstücke mit Polyester als Außenmaterial zur Anwendung [184].

¹⁶ vgl. Abschnitt 5.1.1

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

Die Inhalte der Gepäckstücke bestehen aus typischen mitgeführten Reiseartikeln, wie Bekleidung, Hygieneartikel und elektronischen Kleingeräten. Auch im Brandfall potentiell gefährliche Gegenstände, wie Druckgasbehälter (Deodorant, Rasierschaum) oder Akkumulatoren (Notebook, Rasierapparat) charakterisieren typisches Reisegepäck. So wurde im Rahmen des Projektes »Metro¹⁷« ermittelt, dass 28 % der Reisenden Druckbehälter mit sich führen [136]. Mit der Unterstützung des Zentralen Fundbüros der DB Station&Service AG können insgesamt acht Reisekoffer und -taschen zusammengestellt werden, die hinsichtlich Größe, Außenmaterial und inhaltlicher Komposition eine repräsentative Serie typischer Gepäckstücke, wie sie in Schienenfahrzeugen vorhanden sein können, darstellen. Die Abbildungen 5.5 bis 5.12 geben einen Überblick über die Zusammenstellung der Versuchsobjekte¹⁸. Details zu den einzelnen Artikeln enthält Anhang A.4.



Abbildung 5.5: »Geschäftsreise«



Abbildung 5.6: »Reisendes Kind«

¹⁷ vgl. Abschnitt 2.1.4

¹⁸ Die roten Kreuze markieren Artikel, die im Vorfeld der Versuchsdurchführung extrahiert wurden, vgl. Anhang A.4.

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen



Abbildung 5.7: »Reisende Dame«



Abbildung 5.8: »Reisender Herr«



Abbildung 5.9: »Strandurlaub«



Abbildung 5.10: »Winterurlaub«



Abbildung 5.11: »Reisende Seniorin«



Abbildung 5.12: »Reisender Senior«

5.4 Verwendete Zündinitiale

Abschnitt 3.1 analysiert mögliche Brandentstehungsszenarien für Schienenfahrzeuge, arbeitet potentielle Zündquellen heraus und kategorisiert diese. Normative Zündmodelle¹⁹ bilden bereits einen Großteil dieser Zündinitiale ab.

Die für die Vorversuche auszuwählenden Zündinitiale sollen möglichst gut reproduzierbar sein, um die Intensität und die Anordnung der Zündquelle für die Hauptversuche vergleichbar zu machen. Grundsätzlich bieten sich hier Zündquellen an, die auf einer geregelten Brennstoffzufuhr und einer quasi-konstanten Verbrennungseffektivität basieren, wie es beispielsweise bei Gasbrennern der Fall ist. Da die Anzahl der Vorversuche und somit auch die Anzahl möglicher Zündinitiale begrenzt ist, werden diese gruppiert und ein als konservativ zu bewertendes Zündinitial, stellvertretend für jede Gruppe, ausgewählt.

»Innere Zündquellen« für Gepäckstücke, wie defekte Akkumulatoren von Notebooks, Smartphones oder anderen elektronischen Geräten, kommen nicht zur Anwendung, da die Brandausbreitungscharakteristik bei einer von außen einwirkenden Zündquelle als konservativer zu betrachten ist. Dieser Ansatz deckt sich mit dem Szenario einer Brandstiftung, das die Hauptursache für Brände in Schienenfahrzeugen ausmacht²⁰.

5.4.1 Zündinitial »kleine offene Flamme«

Das Zündinitial »kleine offene Flamme« stellt mit einer Wärmeleistung von 64 W für 30 s die geringste Intensität der gewählten Zündinitiale dar. Es dient sowohl in der EN 45545²¹ als auch in der DIN 5510²² zur Beurteilung von Schienenfahrzeugkomponenten und repräsentiert mit einer Flammenlänge von 20 mm kleinere Zündquellen, wie Feuerzeuge und Zündhölzer. Mit seiner Leistung von 64 W ist dieses Zündinitial geeignet, die Einwirkungen der glimmenden Zigarette, des Glühdrahtes und des Kleinbrenners, vgl. Tabelle 3.1 in Abschnitt 3.2.1, mit abzudecken. Um bei der Festlegung der Position der Zündquelle ebenfalls konservativ vorzugehen, wird die Flamme unten seitlich an das zu untersuchende Gepäckstück angelegt (Abbildung 5.13).

¹⁹ vgl. Abschnitt 3.2.1

²⁰ vgl. Abschnitt 3.1.2

²¹ spezifiziert in DIN EN ISO 12952 Teil 2 [93]

²² spezifiziert in DIN EN 1021 Teil 2 [75]



Abbildung 5.13: Zündinitial »Kleine offene Flamme«

5.4.2 Zündinitial »T-Brenner«

Der T-Brenner ist das einzige hier verwendete Zündinitial, das nicht zur normativen Beurteilung der Brandsicherheit in Schienenfahrzeugen nach EN 45545 oder DIN 5510 herangezogen wird, sondern entstammt der ISO 11925 Teil 3 »Ignitability of Building Products Subjected to Direct Impingement of Flame – Part 3: Multi-source test« [139]. Diese Norm enthält eine Zusammenstellung gebräuchlicher Zündquellen verschiedener Intensitäten und deren modellhafte Nachbildung mit gasbetriebenen Brennern. Darunter befindet sich auch ein T-förmiger Brenner, der mit einer Wärmefreisetzungsrate von ca. 2,8 kW für 60 s eine brennende, zerknüllte Zeitung nachempfinden soll. Aufgrund der Übertragbarkeit auf ein mögliches Brandentstehungsszenario in einem Schienenfahrzeug mit einer brennenden Zeitung und deren Reproduzierbarkeit durch einen Gasbrenner, stellt der T-Brenner ein weiteres geeignetes Zündinitial dar. Mit einer Wärmeleistung von ca. 2,8 kW deckt er den Breitschlitzbrenner sowie die 1-kW-Flamme, vgl. Tabelle 3.1 in Abschnitt 3.2.1, mit ab. Er wird, wie die kleine offene Flamme, unten seitlich an das zu untersuchende Gepäckstück angelegt, da in dieser Konfiguration die rascheste Brandentwicklung zu erwarten ist, siehe Abbildung 5.14.



Abbildung 5.14: Zündinitial »T-Brenner«

5.4.3 Zündinitial »Quadratbrenner«

Der Quadratbrenner mit einer Wärmefreisetzungsrate von 7 kW für 180 s dient in der EN 45545 Teil 2 zur Beurteilung von Sitzen. Er wurde aus dem Papierkissentest nach UIC 564-2 [216] entwickelt, der zur Sitzprüfung nach DIN 5510 eingesetzt wird²³. Die normative Versuchskonfiguration sieht vor, den Quadratbrenner mit einem Hebelarm von oben auf die Sitzfläche zu richten und mit einer Kraft von ca. 1 N anzupressen. Diese Anordnung wird in dieser Untersuchung beibehalten und der Brenner von oben auf das zu prüfende Gepäckstück aufgebracht, siehe Abbildung 5.15.



Abbildung 5.15: Zündinitial »Quadratbrenner«

²³ vgl. Abschnitt 5.4.4

Kapitel 5 – Experimentelle Untersuchungen

5.4.4 Zündinitial »Papierkissen«

Der Papierkissentest wird zur Sitzprüfung nach DIN 5510 eingesetzt und auch international als Vandalismus-Szenario gehandhabt [216]. Das Kissen besteht aus mehreren Papierbögen, die nach DIN 54341 [67] zu Kugeln zusammengedrückt, mit einem weiteren Papierbogen umhüllt und zu einem Kissen zusammengeheftet werden. Normativ wird das Papierkissen auf die Sitzfläche gelegt und an den vier Ecken gezündet. Es ist das einzige hier ausgewählte Zündinitial, das keinem vordefinierten Funktional einer Wärmefreisetzungsrate folgt. Der grundsätzliche Brandverlauf²⁴ mit einer Dauer von ca. drei Minuten besteht aus einem Anstieg der Wärmefreisetzungsrate bis zu einem Maximum von ca. 14 kW innerhalb der ersten Minute und einer sich anschließenden Abklingphase.



Abbildung 5.16: Zündinitial »Papierkissen«

²⁴ vgl. Messkurve in Anhang A.2

Kapitel 6

Versuchsergebnisse

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Hauptabschnitte. Zunächst erfolgt die Darstellung der experimentell ermittelten Ergebnisse der Vorversuche, die die Basis für die Auswahl eines geeigneten Zündinitials für die Hauptversuche bilden. Daraufhin werden die Resultate der Hauptversuche präsentiert und für die nachfolgenden Brandsimulationen (Kapitel 7 und 8) das Modell entwickelt, das das typische Brandverhalten eines Gepäckstückes charakterisiert. Abschließend findet sich ein Vergleich des entwickelten Brandmodells mit bereits existierenden Verlaufskurven.

6.1 Auswertung der Vorversuche

6.1.1 Übersicht

Tabelle 6.1: Übersicht über die Vorversuche

Versuch	Arbeitsbezeichnung	Zündquelle
VV1	Reisetasche C	»Kleine offene Flamme«
VV2	Reisetasche E	»T-Brenner«
VV3	Reisetasche B	»Quadratbrenner«
VV4	Reisetasche A	»Papierkissen«
VV5	Reisetasche D	»T-Brenner« (Wiederholung)

6.1.2 Beobachtungen

Die grundsätzliche Branddynamik der einzelnen Gepäckstücke verhält sich vergleichsweise ähnlich, dargestellt durch die Wärmefreisetzungsraten (vgl. Abbildung 6.1). Ausgehend vom Expositionsort der Zündquelle entwickelt sich der Abbrand gleichmäßig über das gesamte Prüfobjekt. Innerhalb von 60 min nach der Entzündung brennen sämtliche Gepäckstücke aus und verlöschen von selbst. Während der Versuche treten keine besonderen Branderscheinungen auf.

6.1.3 Wärmefreisetzungsrates

Um die Versuchsergebnisse auf einer einheitlichen Basis beurteilen zu können, wird die Wärmeleistung der verwendeten Zündinitiale von der gemessenen Wärmefreisetzungsrates subtrahiert. Dies erfordert für den Vorversuch 4 die separate Aufzeichnung der Wärmefreisetzung eines einzelnen Papierkissens¹, da es sich hierbei um einen natürlichen Abbrand handelt². Die ermittelten zeitlichen Wärmefreisetzungsrates zeigt Abbildung 6.1.

Zunächst sind in allen Wärmefreisetzungsprofilen drei charakteristische Brandphasen erkennbar, nämlich Entwicklungs-, Vollbrand- und Abklingphase³. Dabei stellen sich die Ausprägungen der jeweiligen Brandphasen der einzelnen Versuche grundsätzlich vergleichbar dar.

Bezüglich der Anstiege der Wärmefreisetzungsrates in der **Entwicklungsphase** verhalten sich die Effekte der primären Zündinitiale »T-Brenner«, »Quadratbrenner« und »Papierkissen« sehr ähnlich. Diese Übereinstimmungen sind in den entsprechenden Kurvenverläufen innerhalb der ersten Minuten bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzung von ca. 40 kW feststellbar. Lediglich das vergleichsweise geringe Zündinitial »kleine offene Flamme« erzeugt einen stark verzögerten Anstieg der Wärmefreisetzung.

In der **Vollbrandphase** weichen die Kurven jedoch deutlich voneinander ab: Während bei dem Zündinitial »Papierkissen« kurz nach dem Erreichen der maximalen Wärmefreisetzung von ca. 80 kW bereits die Abklingphase einsetzt, verfügen die restlichen Kurven über teilweise sehr ausgeprägte Plateaus von quasi-konstanter Wärmeleistung. Jedoch variieren die mittleren Leistungswerte der einzelnen Brandobjekte während dieser Brandphase zwischen 45 kW für den »T-Brenner«, 50 kW bei der »kleine offene Flamme« und 55 kW für den »Quadratbrenner«.

Die Branddynamik während der **Abklingphase** weist eine, für diese Phase charakteristische, asymptotische Form auf. Die Kurvenverläufe der vier Versuche mit den höherenergetischen Zündinitialen verhalten sich auch in dieser Brandphase ähnlich und nähern sich mit fortschreitender Branddauer immer weiter aneinander an. Lediglich das Experiment mit der »kleinen offenen Flamme« als Zündinitial zeichnet sich durch eine vergleichsweise höhere Wärmefreisetzungsrates in dieser Brandphase aus.

1 vgl. Anhang A.2

2 vgl. Abschnitt 5.4.4

3 vgl. Abschnitt 6.2.3

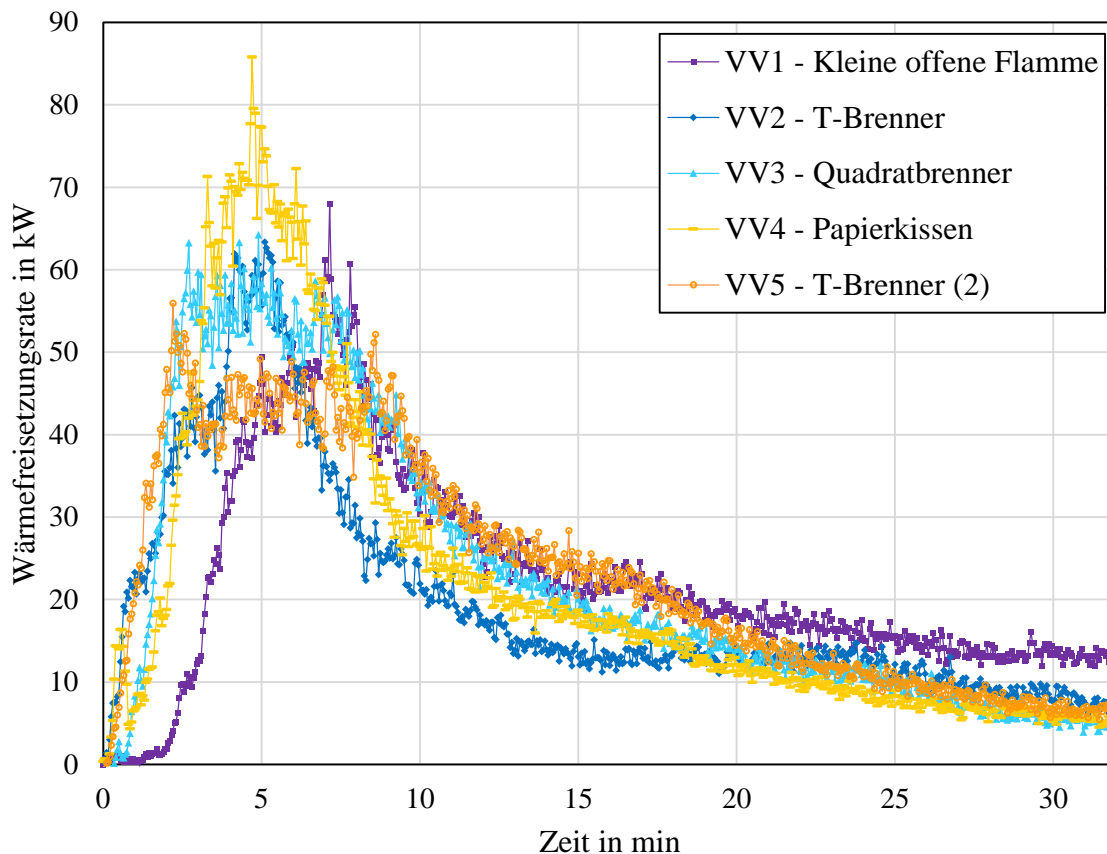


Abbildung 6.1: Wärmefreisetzungsraten der Vorversuche

6.1.4 Auswahl eines Zündinitials für die Hauptversuche

Abschnitt 5.4 erläutert bereits den Auswahlprozess der Zündinitials für die Vorversuche, der sich auf die vorangegangene Analyse zur Brandentstehung in Schienenfahrzeugen⁴ stützt. Die sich anschließende Auswahl eines geeigneten Zündinitials für die Hauptversuche basiert auf den Ergebnissen der Vorversuche. Das gewählte Zündinitial soll primär eine vergleichsweise konservative Brandentwicklung bewirken, um den Effekt weiterer Zündinitials mit abzudecken. Sekundäre Aspekte für die Auswahl spiegeln sich in der Konfiguration zum Prüfobjekt, der Reproduzierbarkeit des Initials und der spezifischen Anwendungsprozedur wider.

⁴ vgl. Kapitel 3

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

Abbildung 6.1 zeigt, dass die drei höherenergetischen Zündinitiale alle zu einem ähnlichen Anstieg der Wärmefreisetzung in der Brandentwicklungsphase führen. Lediglich das Zündinitial »kleine offene Flamme« erzeugt eine verzögerte Brandentwicklung. Somit erweisen sich hinsichtlich des genannten Intensitätskriteriums sowohl der »T-Brenner«, »der Quadratbrenner« als auch das »Papierkissen« als Zündinitiale für die Hauptversuche für geeignet. Hinsichtlich der Konfiguration zeichnen sich jedoch bei den beiden letztgenannten Zündinitialen Nachteile ab, da normativ beide von oben auf den Prüfgegenstand aufgebracht werden. Bei Reisegepäck ist anzunehmen, dass eine Zündung auch im unteren Bereich des Gepäckstückes stattfinden kann und mit einer intensiveren Brandentwicklung einhergeht. Dieses Szenario lässt sich durch die Anwendung der normativen Konfigurationen nicht darstellen. Eine Modifikation der Zündeinrichtung bzw. deren Konfiguration wird ebenfalls nicht als zielführend eingeschätzt. Bezüglich der Reproduzierbarkeit weist das Zündinitial »Papierkissen« eine Schwäche auf, da dessen Wärmefreisetzungsprofil aufgrund des natürlichen Abbrands gewissen Schwankungen unterliegt. Somit erfüllt das Zündinitial »T-Brenner« die gestellten Anforderungen am besten und kommt dementsprechend in den Hauptversuchen zum Einsatz. Tabelle 6.2 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 6.2: Eignungsbewertung ausgewählter Zündinitiale

Kriterium	»Kl. offene Flamme	»T-Brenner«	»Quadratbrenner«	»Papierkissen«
Zündeffekt	-	+	+	+
Konfiguration	+	+	-	-
Reproduzierbarkeit	+	+	+	-

6.1.5 Beurteilung der Wiederholbarkeit

Hält man bei Versuchen den Bearbeiter, die verwendeten Geräte, deren Kalibrierung, die Umgebungskonditionen sowie den Zeitabstand zwischen Messungen unverändert, schafft man »Wiederholbedingungen⁵«. Bei »Vergleichsbedingungen⁶« werden die genannten Faktoren variiert und tragen so zur Streuung der Messergebnisse bei [100].

Um die Wiederholbarkeit der Brandversuche mit Gepäckstücken unter der ISO 9705-

⁵ engl. repeatability

⁶ engl. reproducibility

Haube zu untersuchen, wurden die Vorversuche »2« und »5« nicht nur mit dem gleichen Gepäckstück, inklusive identischem Inhalt und dessen Anordnung, sondern auch mit demselben Zündinitial, dem »T-Brenner« durchgeführt. Eine Beurteilung der Wiederholbarkeit mit quantitativen Methoden wird jedoch nicht angestrebt, da für die statistische Analyse eine Vielzahl an Versuchen erforderlich wäre. Anhand der dynamischen Brandkenngröße »Wärmefreisetzungsrate« (Abbildung 6.1) sowie ausgewählten weiteren Parametern (Tabelle 6.3) werden qualitative Aspekte der Wiederholbarkeit beleuchtet.

Betrachtet man zunächst die zeitabhängigen Wärmefreisetzungsraten beider Versuche, so zeigen beide Kurven während der ersten beiden Minuten der Brandentwicklungsphase eine gute Übereinstimmung. Während der Vollbrandphase erreicht der Vorversuch »2« kurzzeitig Maximalwerte von ca. 60 kW, bevor er in die Abklingphase übergeht. Dem gegenüber steht beim Vorversuch »5« eine deutlich längere Vollbrandphase mit Werten um 45 kW und ein vergleichsweise späteres Einsetzen der Abklingphase. Ab der 20. Versuchsminute bis zum Versuchsende verlaufen beide Kurven wieder nahezu identisch.

Trotz der unterschiedlichen Verläufe der Wärmefreisetzungsraten während der Vollbrandphase weisen beide Versuche mit 2,81 kg bzw. 2,85 kg nahezu identische Massenverluste auf. Die Gesamtwärmefreisetzung THR und die mittlere effektive Verbrennungswärme $\Delta h_{c,\text{eff,mean}}$ ergeben sich damit für den Vorversuch »2« zu 45,3 MJ und 16,1 kJ/g. Für den Vorversuch »5« berechnen sich die entsprechenden Werte zu 50,4 MJ und 17,7 kJ/g. Somit fallen bei diesem Versuch sowohl die Gesamtwärmefreisetzung als auch bei identischem Massenverlust die mittlere effektive Verbrennungswärme etwas höher aus.

Tabelle 6.3: Ausgewählte Parameter der Vorversuche »2« und »5«

Parameter	Vorversuch »2«	Vorversuch »5«
Gesamtmassenverlust Δm^7	2,81 kg	2,85 kg
HRR _{max} (und Zeitpunkt)	63,2 kW (306 s)	55,9 kW (132 s)
THR	45,3 MJ	50,4 MJ
$\Delta h_{c,\text{eff,mean}}^8$	16,1 kJ/g	17,7 kJ/g

⁷ vgl. Anhang A.3

⁸ nach Gleichung 5.7 in Abschnitt 5.2.4

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

Zusammenfassend erzeugt die Wiederholungsprüfung (erwartungsgemäß) keine identischen Resultate. Angefangen bei kleinen Konfigurationsunterschieden von Zündinitial und Reisetasche sowie deren Inhalt und aufgehört bei variierenden Umgebungsbedingungen offener Systeme, existieren viele Größen, die die Branddynamik mehr oder minder beeinflussen. Die Wiederholungsprüfung mit dem Zündinitial »T-Brenner« hat jedoch gezeigt, dass sich ausgewählte Brandkenngößen für diese Untersuchung mit hinreichender Genauigkeit reproduzieren lassen.

6.2 Auswertung der Hauptversuche und Herleitung des Brandmodells

6.2.1 Übersicht

Tabelle 6.4: Übersicht über die Hauptversuche

Versuch	Arbeitsbezeichnung	Zündquelle
HV1	Gepäckstück »Strandurlaub«	»T-Brenner«
HV2	Gepäckstück »Reisender Herr«	»T-Brenner«
HV3	Gepäckstück »Geschäftsreise«	»T-Brenner«
HV4	Gepäckstück »Winterurlaub«	»T-Brenner«
HV5	Gepäckstück »Reisende Seniorin«	»T-Brenner«
HV6	Gepäckstück »Reisendes Kind«	»T-Brenner«
HV7	Gepäckstück »Reisende Dame«	»T-Brenner«
HV8	Gepäckstück »Reisender Senior«	»T-Brenner«

6.2.2 Beobachtungen

Das grundsätzliche Abbrandverhalten stellt sich bei fast allen untersuchten Gepäckstücken ähnlich dar: Nach dem Wirksamwerden des Zündinitials breiten sich die Flammen innerhalb weniger Minuten über das gesamte Prüfobjekt aus. Eine gewisse Zeit steht das Gepäckstück dann im Vollbrand, bis sich mit fortschreitender Versuchsdauer das Flammenvolumen wieder verringert⁹. Im Gegensatz zu den Vorversuchen kommt es bei den Hauptversuchen nicht zum Ausbrand bzw. zur Selbstverlöschung innerhalb der ersten 60 Minuten. Dennoch wird die Messwerterfassung aufgrund praktikabler Aspekte nach ca. 60 Minuten Versuchsdauer gestoppt und eine manuelle Löschung der Gepäckstücke vorgenommen. Dementsprechend basieren die jeweils ermittelten Brandparameter auf einer einstündigen Datenerfassung und vernachlässigen etwaige später auftretende Effekte. Die Abbildungen 6.2 und 6.3 vermitteln einen Eindruck der Branddynamik der ersten beiden Hauptversuche, die ebenfalls den charakteristischen Abbrand der Hauptversuche »4« bis »8« abbilden.

Eine Ausnahme vom oben skizzierten prinzipiellen Brandverlauf findet sich im »Hauptversuch 3«. Der Inhalt des betreffenden Gepäckstückes umfasst unter an-

⁹ vgl. Abschnitt 6.2.3

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

derem ein Notebook und verschiedene Druckbehälter mit brennbarem Treibgas, wie Rasierschaum und Deodorant, siehe Abbildung 5.5. Die signifikante Abweichung besteht darin, dass innerhalb der ersten 15 Minuten des Versuches keine nennenswerte äußere Brandausbreitung stattfindet und keine Wärmefreisetzungsrates messbar ist. Nichtsdestotrotz schwelt der Brand im Inneren des Koffertrolleys, bis es plötzlich zum Bersten eines der enthaltenen Druckgasbehälter kommt, das schlagartig freigesetzte Treibgas eine Stichflamme erzeugt und das Gepäckstück daraufhin in den Vollbrand übergeht (siehe Abbildung 6.4).



Abbildung 6.2: »Hauptversuch 1«, Impressionen bei Zündung, nach 5 min, 10 min, 15 min und 20 min Versuchsdauer



Abbildung 6.3: »Hauptversuch 2«, Impressionen bei Zündung, nach 5 min, 10 min, 15 min und 20 min Versuchsdauer



Abbildung 6.4: »Hauptversuch 3«, Impressionen bei Zündung, nach 5 min, 10 min, 15 min und 20 min Versuchsdauer

6.2.3 Wärmefreisetzungsrates

Abbildung 6.5 stellt die ermittelten Profile der Wärmefreisetzungsrates der Hauptversuche dar. Obwohl sich die einzelnen Gepäckstücke optisch ähneln und demselben Zündinitial exponiert sind, unterscheiden sich die jeweiligen Messkurven voneinander. Das liegt vornehmlich daran, dass die Prüfobjekte selbst und deren Inhalt verschieden sind. Wie in Abschnitt 5.3.2 bereits erläutert, variieren die Gepäckstücke sowohl in ihrer Beschaffenheit als auch im Volumen und damit in der Menge und den Brandeigenschaften der enthaltenen Reiseartikel. Jedoch lässt sich das in Abschnitt 6.2.2 skizzierte, vergleichsweise ähnliche Brandverhalten in den Profilen der Wärmefreisetzungsrates gut wiederfinden:

Die Brandverläufe nach der Zündung lassen sich grundsätzlich in drei charakteristische Phasen untergliedern, vgl. Abbildung 6.5:

- die Brandentwicklungsphase,
- die Vollbrandphase und
- die Abklingphase.

Die Brandentwicklungsphase umfasst die Veränderungen des Brandzustandes nach der Zündung bis zum Übergang in die Vollbrandphase bzw. dem Erreichen einer maximalen Wärmefreisetzungsrates. Die Vollbrandphase charakterisiert sich durch eine Wärmefreisetzung, die sich nahe am Maximum bewegt und über einen gewissen Zeitraum weder signifikant ansteigt oder abfällt. Die Abklingphase beschreibt den Zustand, nachdem ein Großteil des Brennstoffes verbrannt ist und die Wärmefreisetzung merklich abnimmt.

Nachbildung im Brandmodell

Generell ist es beabsichtigt, mit dem zu entwickelnden Brandmodell zum einen die ermittelten Versuchsergebnisse repräsentativ abzudecken und zum anderen dafür möglichst einfache mathematische Ausdrücke zu finden.

Bei ausreichend ventilierten Bränden lässt sich die **Brandentwicklungsphase** durch einen quadratischen Anstieg der Wärmefreisetzungsrates formulieren. Dieser basiert auf der Annahme, dass sich der Brand vom Entstehungsort radial auf einer Fläche A mit konstanter Geschwindigkeit v ausbreitet. Nimmt man weiterhin eine in etwa konstante flächenspezifische Abbrandrate des Brennstoffes \dot{m}'' an, lässt

sich die Wärmefreisetzungsrates $\dot{Q}(t)$ wie folgt ausdrücken [133]:

$$\dot{Q}(t) = \Delta h_{c,\text{eff}} \cdot \dot{m}(t) = \Delta h_{c,\text{eff}} \cdot \dot{m}'' \cdot A(t) = \Delta h_{c,\text{eff}} \cdot \dot{m}'' \cdot \pi \cdot (v \cdot t)^2 = \alpha \cdot t^2 \quad (6.1)$$

mit \dot{Q}	Wärmefreisetzungsrates	in kW
$\Delta h_{c,\text{eff}}$	Effektive Verbrennungswärme	in kJ \cdot g ⁻¹
$\dot{m}(t)$	Abbrandrate des Brennstoffes	in g \cdot s ⁻¹
\dot{m}''	Flächenspezifische Abbrandrate	in g \cdot s ⁻¹ \cdot m ⁻²
$A(t)$	Brandfläche	in m ²
v	Geschwindigkeit der Brandausbreitung	in m \cdot s ⁻¹
α	Brandentwicklungsparameter	in kW \cdot s ⁻²
t	Zeit	in s

Bei dem sogenannten αt^2 -Brandmodell zur Beschreibung der Brandentwicklungsphase ist einzig der Brandentwicklungsparameter α zu definieren. Es existieren verallgemeinerte Ansätze, die bestimmten, nutzungsbezogenen Brandlasten einen typisierten Brandentwicklungs-koeffizienten der Klassen »langsam«, »mittel«, »schnell« oder »sehr schnell« zuordnen [134, 153]. Für die Anwendung in numerischer Brandsimulation ist das αt^2 -Modell ein geeigneter Ansatz, mit dem sich die experimentell ermittelten quadratischen Anstiege der Wärmefreisetzungsrates während der Brandentwicklungsphase gut abbilden lassen. Mit einem Wert von 0,002391 kW/s² für α , was dem Brandentwicklungs-koeffizienten für »langsame Brandausbreitung« entspricht [162], lässt sich die Funktion des Bemessungsbrandes an die experimentell ermittelten Kurven für den Zeitraum der Brandentwicklungsphase von $t = 0$ s bis $t = 200$ s anpassen (vgl. Abbildung 6.5).

Die **Vollbrandphase** der einzelnen Versuche ergibt maximale Wärmefreisetzungsrates im Bereich von 100 kW bis 130 kW, wobei Werte von 120 kW nicht dauerhaft überschritten werden. Das Brandmodell repräsentiert diese Phase mit einer konstanten Wärmefreisetzungsrates von 120 kW über einen Zeitraum von $t = 200$ s bis $t = 1.200$ s. Mit dieser konservativ gewählten maximalen Wärmefreisetzungsrates sollen die in Abschnitt 5.2.9 beschriebenen potentiellen Einflüsse der Experimentalkonfiguration auf die Branddynamik Berücksichtigung finden.

Nach der Vollbrandphase folgt die **Abklingphase**. Charakteristisch ist hier zunächst ein starkes Abfallen, das sich dann asymptotisch einer sehr niedrigen Wärmefreisetzungsrates, in den Experimenten bei ca. 20 kW, annähert. Die realitätsnähere Abbildung der Abklingphase, basierend auf einer natürlichen Exponenti-

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

alfunktion, wäre hier jedoch nicht zielführend, da sich dieser Funktionstyp nicht originär in ein numerisches Brandmodell überführen ließe und auch experimentell, beispielsweise durch einen Gasbrenner, nicht praktikabel umzusetzen ist. In vielen Fällen wird die Abklingphase eines Brandes im Modell auch über einen linearen Abfall approximiert¹⁰. Das entspricht dem grundsätzlichen Verlauf der Reduktion der Wärmefreisetzung und lässt sich durch die Annahme, dass die Brandentwicklung von erheblich größerer Bedeutung ist als die Abklingphase, auch begründen. Konkret erhält die Abklingphase des Brandmodells eine lineare Reduktion der Wärmefreisetzungsrate angefangen bei 120 kW zum Zeitpunkt $t = 1.200$ s auf 0 kW nach insgesamt 3.600 s Branddauer.

Mit der Untergliederung des Brandmodells in die drei charakteristischen Brandphasen können die experimentell ermittelten Daten repräsentativ abgedeckt werden. Auch die Forderung nach einer möglichst einfachen mathematischen Beschreibung lässt sich realisieren. Die Ausdrücke für die Wärmefreisetzungsraten der jeweiligen Phasen des entwickelten Brandmodells fassen die nachstehenden Gleichungen zusammen (vgl. rote Kurve in Abbildung 6.5):

- **Brandentwicklungsphase** für $t = 0$ s bis $t = 200$ s:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 = 0,002931 \frac{\text{kW}}{\text{s}^2} \cdot t^2 \quad (6.2)$$

- **Vollbrandphase** für $t = 200$ s bis $t = 1.200$ s:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\max} = 120 \text{ kW} \quad (6.3)$$

- **Brandabklingphase** für $t = 1.200$ s bis $t = 3.600$ s:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\max} - \frac{\dot{Q}_{\max}}{\Delta t_{\text{Abkling}}} \cdot (t - t_{\text{Abkling}}) = 120 \text{ kW} - \frac{120 \text{ kW}}{2400 \text{ s}} \cdot (t - 1200 \text{ s}) \quad (6.4)$$

mit \dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate	in kW
\dot{Q}_{\max}	Maximale Wärmefreisetzungsrate	= 120 kW
α	Brandentwicklungsparameter	= 0,002931 kW · s ⁻²
t	Zeit	in s
$\Delta t_{\text{Abkling}}$	Dauer der Abklingphase	= 2.400 s
t_{Abkling}	Startpunkt der Abklingphase	= 1.200 s

¹⁰ vgl. z. B. [134]

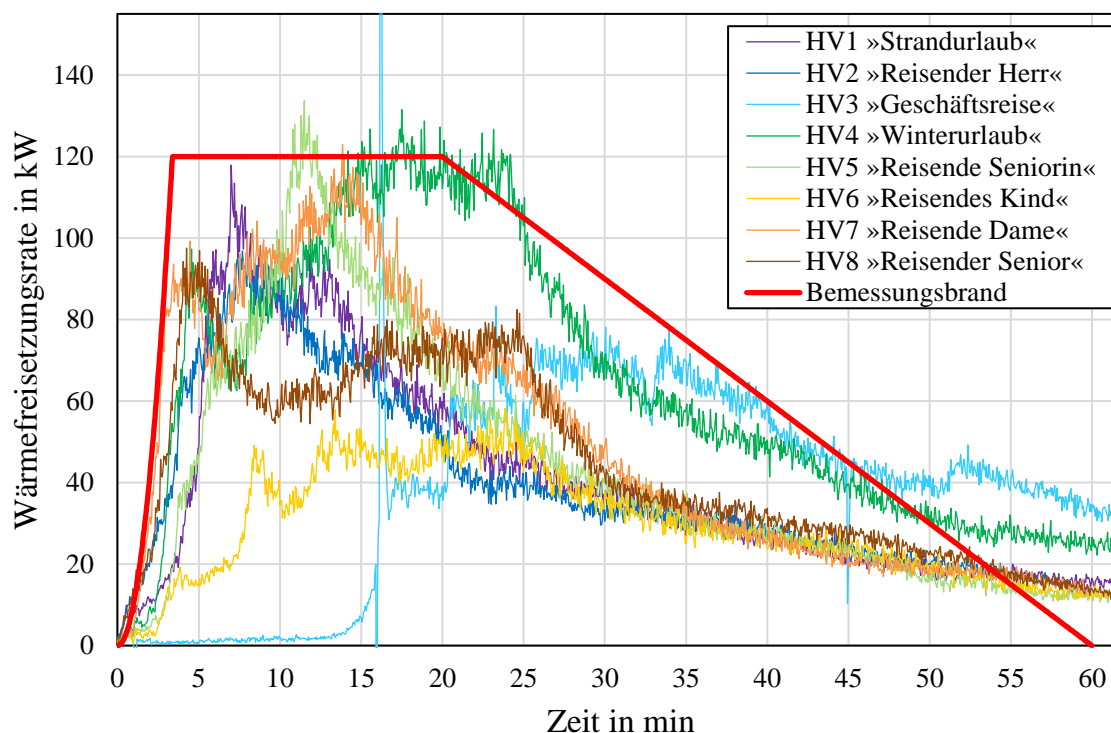


Abbildung 6.5: Wärmefreisetzungsrate der Hauptversuche und Bemessungskurve

6.2.4 Gesamtwärmefreisetzung, effektive Verbrennungswärme

Tabelle 6.5 gibt eine Übersicht über die Gesamtwärmefreisetzung, den Massenverlust und die daraus berechnete mittlere effektive Verbrennungswärme¹¹ der einzelnen Versuche. Da Verbrennungsreaktionen in der Regel nicht vollständig ablaufen, liegen die Werte für die effektive Verbrennungswärme unterhalb des Heizwertes eines Brennstoffes. Der Quotient beider Werte wird als Verbrennungseffektivität χ bezeichnet und liegt bei festen Brennstoffen und gut ventilerten Bedingungen in der Größenordnung von 0,7 bis 0,8 [134].

Ein Großteil der Untersuchungsgegenstände besteht aus Polyester und Baumwolle¹². Für diese Materialien quantifiziert die Literatur Heizwerte im Bereich von 20,3 kJ/g und 28,5 kJ/g respektive 16,5 kJ/g und 20,4 kJ/g [17]. Berücksichtigt man die genannten Verbrennungseffizienzen, so rangieren die berechneten Werte für die mittlere effektive Verbrennungswärme im Erwartungsspektrum.

¹¹ vgl. Abschnitt 5.2.4

¹² vgl. Anhang A.4

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

Tabelle 6.5: Gesamtwärmefreisetzung, mittlere effektive Verbrennungswärme

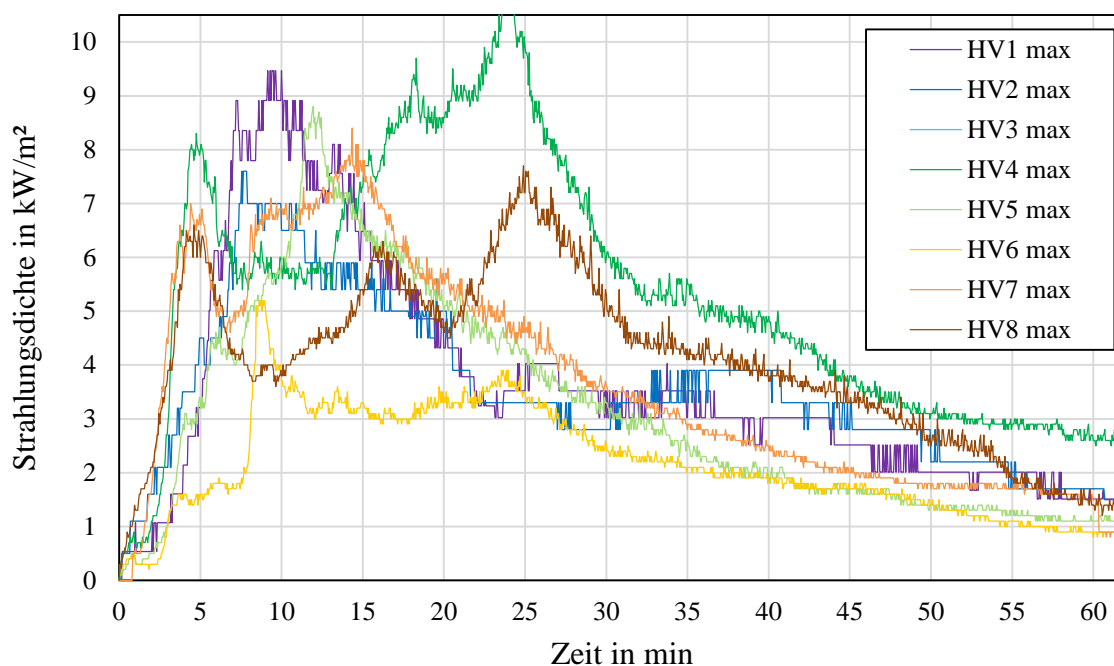
Versuch	Gesamte	Gesamter	Mittlere, effektive
	Wärmefreisetzung	Massenverlust	Verbrennungswärme
	THR	Δm	$\Delta h_{c,eff,mean}$
	in MJ	in kg	in MJ/kg bzw. kJ/g
HV1	195,1	11,0	17,7
HV2	142,1	8,7	16,4
HV3	155,5	9,9	15,7
HV4	234,8	12,8	18,3
HV5	156,7	7,8	20,1
HV6	107,3	4,9	21,9
HV7	180,2	9,3	19,4
HV8	162,3	8,6	18,9
Mittelwert	166,7	9,1	18,5

6.2.5 Strahlungsdichte

Die generierten Daten aus der Messung der Strahlungsdichte dienen hauptsächlich dazu, die energetischen Emissionen des Brandmodells, umgesetzt in der numerischen Brandsimulation, zu prüfen¹³. Hierzu wird konservativ für jeden Zeitpunkt der gemessene Maximalwert der vier Strahlungsdichtesensoren¹⁴ bestimmt und in Abbildung 6.6 überführt. Die emittierte Strahlungsdichte ist für die Brandausbreitung besonders bedeutsam.

¹³ vgl. Abschnitt 7.3.3

¹⁴ vgl. Abschnitt 5.2.5

Abbildung 6.6: Strahlungsdichte der Hauptversuche¹⁵

6.2.6 Rauchgase

Die Rauchgaskomponenten, die ein brennendes Reisegepäckstück typischerweise freisetzt, zu quantifizieren, macht einen essentiellen Bestandteil dieser Untersuchung aus¹⁶. Zur zeitdiskreten Analyse der toxisch relevanten Leitgase im Rauchgasvolumenstrom kommt die Methode der FTIR-Spektroskopie zum Einsatz¹⁷.

Die Versuchskonfiguration ist als offenes System ausgeführt¹⁸ und der Volumenstrom im Rauchabzug beträgt ca. $1 \text{ m}^3/\text{s}$, um eine zielgerichtete Rauchgasabführung gewährleisten zu können¹⁹. Diese Aspekte führen jedoch dazu, dass einige toxische Komponenten, mit einer Freisetzungsrate von nur wenigen Milligramm pro Sekunde, sich im Rauchgasstrom auf wenige $\mu\text{L}/\text{L}$ (ppm)²⁰ verdünnen und so unter die spezifischen Nachweisgrenzen gelangen können. Allerdings sind diese Rauchgasbestandteile der akuten Toxizität untergeordnet.

In den Versuchen lassen sich neben Kohlendioxid und Kohlenmonoxid auch teil-

¹⁵ Die Stufenform der ersten beiden Versuchskurven resultiert aus einer versehentlich zu grob gewählten Rastereinstellung des Signalumwandlers.

¹⁶ vgl. Abschnitt 1.3

¹⁷ vgl. Abschnitt 5.2.6

¹⁸ vgl. Abschnitt 5.2.9

¹⁹ vgl. Abschnitt 6.2.8

²⁰ Nach ISO 19701:2013 ist die Angabe von Volumenkonzentrationen in Mikrolitern pro Liter ($\mu\text{L}/\text{L}$) der immer noch verbreiteten Angabe in ppm (parts per million) vorzuziehen [143].

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

weise nennenswerte Mengen an Chlorwasserstoff nachweisen. Zusätzlich sind im »Hauptversuch 3«, jeweils nach dem Bersten von Druckgasbehältern, erhebliche Konzentrationen an aliphatischen Kohlenwasserstoffverbindungen – den Treibgasen – zu detektieren²¹.

Um geeignete Eingangsdaten für das Brandmodell zu erzeugen, werden die gemessenen molaren Anteile der einzelnen Gaskomponenten c_x mit dem »Idealen Gasgesetz« und dem Abzugvolumenstrom \dot{V}_{298} in entsprechende Freisetzungsmassenströme \dot{m}_x umgerechnet:

$$\dot{m}_x = \frac{c_x}{10^6} \cdot \frac{M_x \cdot p}{R \cdot T_{298}} \cdot \dot{V}_{298} \quad (6.5)$$

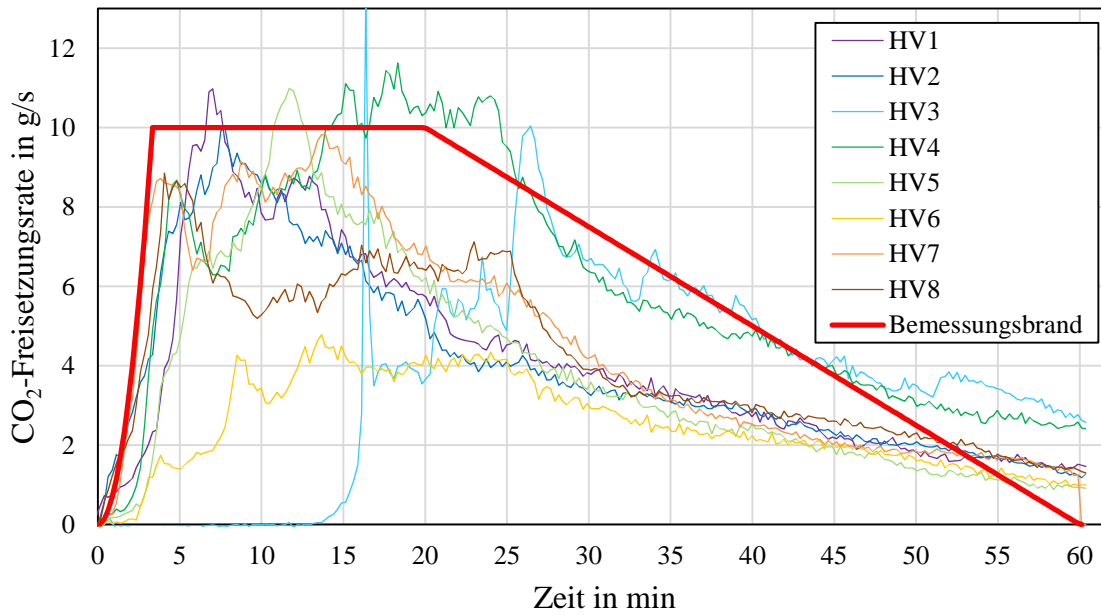
mit \dot{m}_x	Massenstrom der Komponente x	in $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
	c_x Konzentration der Komponente x	in $\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$
	M_x Molare Masse der Komponente x	in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
	p Druck	in Pa
	R Universelle Gaskonstante	= $8,3145 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	T_{298} Normierte Temperatur	= 298 K
	\dot{V}_{298} Normierter Abzugvolumenstrom	in $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

6.2.6.1 Kohlendioxid

Abbildung 6.7 zeigt die Verläufe der CO_2 -Freisetzungsraten für die Hauptversuche. Dabei ist die Ähnlichkeit der jeweiligen Kurvenprofile zu den entsprechenden Wärmefreisetzungsraten nicht zufällig, da die energetischen Emissionen mit den stofflichen Reaktionen korrelieren²². Infolgedessen lassen sich für die Nachbildung der CO_2 -Emissionen im Brandmodell die gleichen mathematischen Beschreibungen anwenden, wie für die Wärmefreisetzungsraten. Hierbei ist lediglich eine Anpassung des Maximums, entsprechend der experimentell ermittelten Freisetzungsraten auf 10 g/s, notwendig (siehe Abbildung 6.7).

²¹ vgl. Abschnitt 6.2.2

²² vgl. Abschnitt 5.2.3

Abbildung 6.7: CO₂-Freisetzungsraten der Hauptversuche und Bemessungskurve

In der Literatur ist es üblich, für verschiedene Brennstoffe und Ventilationsbedingungen nicht die absoluten Freisetzungen, sondern einen (statischen) Entstehungsanteil für CO₂ anzugeben [134]. Dieser berechnet sich in Analogie zum Rauchpartikel-Entstehungsanteil²³ nach der folgenden Gleichung:

$$\Psi_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2}}{m_{\text{BS}}} = \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2}}{\dot{m}_{\text{BS}}} = \frac{10 \frac{\text{gCO}_2}{\text{s}}}{6,5 \frac{\text{gBS}}{\text{s}}} = 1,54 \frac{\text{gCO}_2}{\text{gBS}} \quad (6.6)$$

$$\text{mit } \dot{m}_{\text{BS}} = \frac{\dot{Q}}{\Delta h_{\text{c,eff,mean}}} = \frac{120 \text{ kW}}{18,5 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}} = 6,5 \frac{\text{gBS}}{\text{s}} \quad (6.7)$$

mit Ψ_{CO_2}	CO ₂ -Entstehungsanteil	–
m_{CO_2}	CO ₂ -Freisetzung	in g
m_{BS}	Masse des verbrannten Brennstoffes	in g
\dot{m}_{CO_2}	CO ₂ -Freisetzungsraten	in kg · s ⁻¹
\dot{m}_{BS}	Massenverlustrate des Brennstoffes	in g · s ⁻¹
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsraten	in kW
$\Delta h_{\text{c,eff,mean}}$	Mittlere effektive Verbrennungswärme	in kJ · g ⁻¹

In dieser Untersuchung wird für die CO₂-Freisetzungsraten der für die Vollbrandphase im Brandmodell gewählte Wert von 10 g/s eingesetzt. Zur Bestimmung einer repräsentativen Massenverlustrate des Brennstoffes kommen stellvertretend die maximale Wärmefreisetzung des Brandmodells von 120 kW und die mittlere

²³ vgl. Abschnitt 5.2.7

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

effektive Verbrennungswärme aller Versuche von 18,5 kJ/g zur Anwendung.

Der so ermittelte CO₂-Entstehungsanteil von 1,54 g_{CO₂}/g_{BS} kann nun in Relation zu entsprechenden Literaturangaben gesetzt werden. Tabelle 6.6 enthält eine Auswahl zugehöriger Werte, aufgeschlüsselt nach Brennstoff und Ventilationsbedingungen. Die Entstehungsanteile variieren zwischen 0,91 g/g für Zellulose unter ventilationsgesteuerten und 2,76 g/g für Polyethylen unter brandlastgesteuerten Konditionen. Die untersuchten Gepäckstücke setzen sich zu großen Teilen aus Artikeln zusammen, die vornehmlich aus Polyester, diversen anderen Kunststoffen oder Zellulose bestehen. Für die Verbrennung sind grundsätzlich gut ventilierte (brandlastgesteuerte) Bedingungen anzunehmen. Der ermittelte Wert von 1,54 g/g repräsentiert also verschiedenartige Brennstoffe und korrespondiert daher gut mit den zugehörigen Literaturangaben, vor allem für Polyester bei brandlastgesteuerter Verbrennung.

Tabelle 6.6: Kohlendioxid-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe und Ventilationsbedingungen

Ventilation ²⁴	Zellulose	Polyester	Polyethylen	Polystyrol
brandlastgesteuert [213]	1,30	1,56 - 1,65	2,76	2,33
ventilationsgesteuert [134]	0,91	–	1,78	1,50

6.2.6.2 Kohlenmonoxid

Die CO-Freisetzungsraten der Hauptversuche sind in Abbildung 6.8 dargestellt. Es fällt der Kurvenverlauf auf, der in der Brandentwicklungsphase ähnlich ansteigt und in der Vollbrandphase ein vergleichsweise konstantes Niveau erreicht, wie bei den Profilen der Wärme- und Kohlendioxidfreisetzungsraten. Jedoch ist keine Brandabklingphase erkennbar, wie sie bei den vorher betrachteten Parametern nach ca. 20 min bis 25 min Versuchsdauer deutlich abzulesen ist (vgl. Abbildungen 6.5 und 6.7). Demnach verbleiben die CO-Freisetzungsraten bis über das Versuchsende von 60 min hinaus auf dem nahezu konstanten Niveau, das während der Vollbrandphase, gemessen an den Wärmefreisetzungsdaten, erreicht wird.

Bildet man den Quotienten aus CO₂- und CO-Freisetzung, lassen sich an dem CO₂/CO-Verhältnis (vgl. Abbildung 6.9) die jeweiligen Brandzustände erläutern:

²⁴ Für die ventilationsgesteuerten Werte wurde ein Äquivalenzverhältnis von 2 angenommen [134].

Die Norm ISO 19706 »Guidelines for Assessing the Fire Threat to People« [146] gibt als Kenngröße für einen flammenden, gut ventilerten Brand ein CO_2/CO -Verhältnis von > 20 an, was in den vorliegenden Versuchen der Vollbrandphase entspricht. Für schwelende, also nicht durch flammende Verbrennung geprägte, Brände nennt die Norm Werte in der Größenordnung von 1 bis 10, was auf die geringere Energiefreisetzung und die damit reduzierte Reaktivität der Brandprodukte zurückzuführen ist. Diese Tendenz der Oxidation mit vermehrt partiell oxidierten Reaktionsprodukten lässt sich der Abklingphase des Brandes zuordnen, was die anhaltenden hohen CO-Freisetzungsraten erklärt.

Bei der Entwicklung des CO-Freisetzungssprofils für den Bemessungsbrand werden die in der Experimentalkonfiguration vorherrschenden Ventilationsbedingungen²⁵ mit einer konservativen Wahl der Zahlenwerte berücksichtigt. Für die Brandentwicklungs- und die Vollbrandphase kommen die bereits zuvor genutzten mathematischen Funktionen, mit einer Anpassung der maximalen Freisetzungsrates von $0,16 \text{ g/s}$, zur Anwendung. Allerdings sieht das Brandmodell in diesem Fall, gemäß der Messwerte, keine Abklingphase vor, sondern hält das Maximum bis zur 60sten Minute konstant.

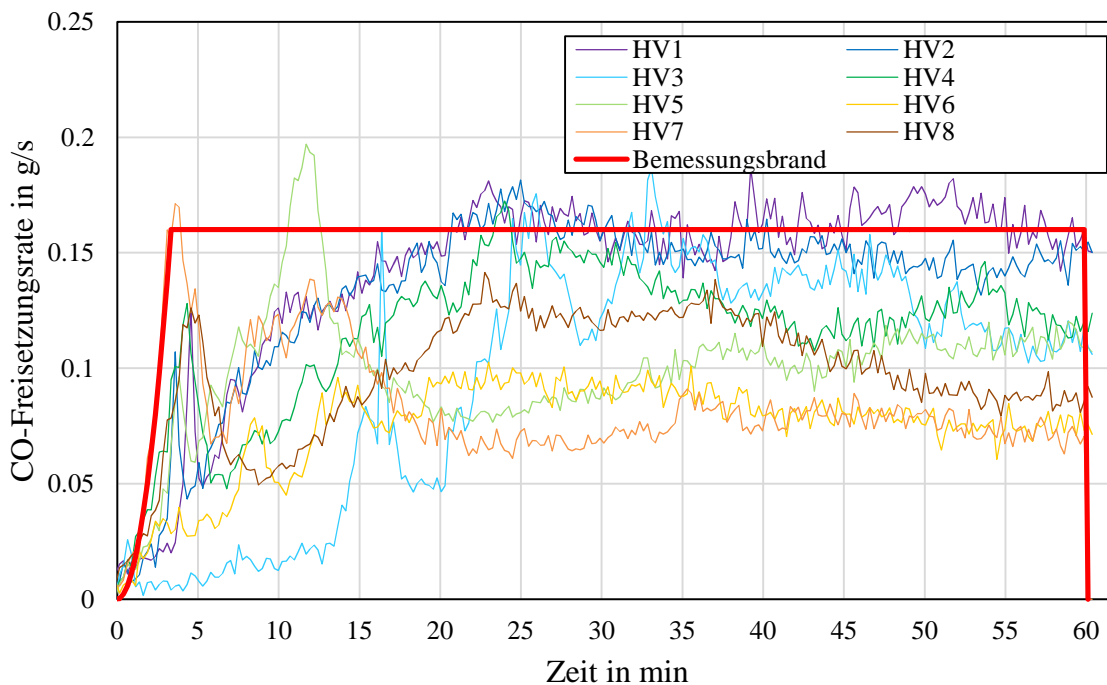
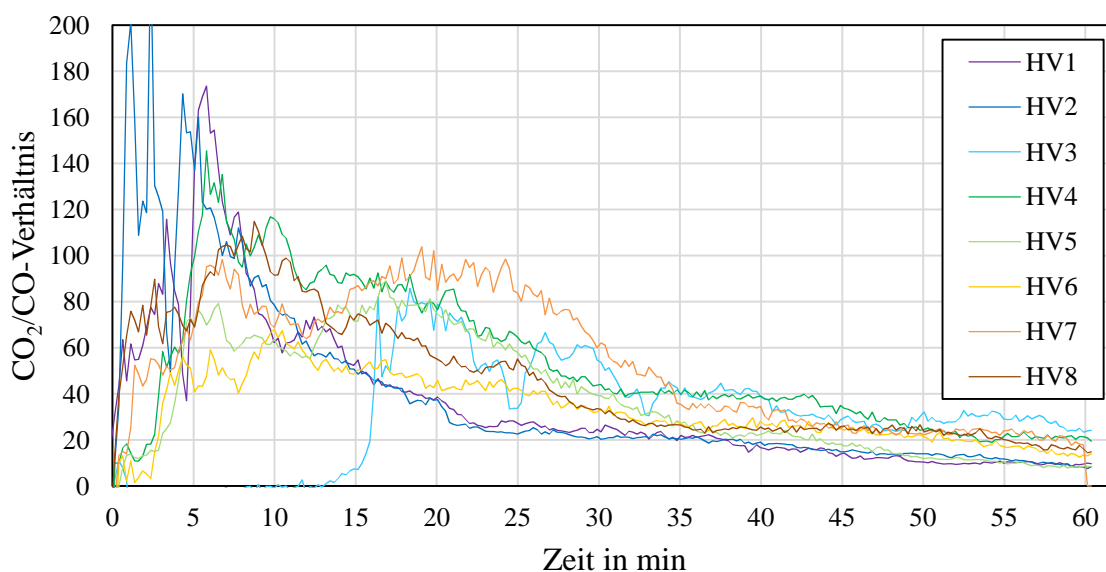


Abbildung 6.8: CO-Freisetzungsraten der Hauptversuche und Bemessungskurve

²⁵ vgl. Abschnitt 5.2.9

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

Abbildung 6.9: CO_2/CO -Verhältnis der Hauptversuche

Ermittelt man den CO-Entstehungsanteil mit der nominellen maximalen Freisetzungsrates von $0,16 \text{ g/s}$ nach Gleichung 6.6, ergibt sich ein Wert von $0,025 \text{ g}_{\text{CO}}/\text{g}_{\text{BS}}$. Vergleicht man diesen mit den in Tabelle 6.7 aufgeführten Literaturangaben, befindet sich der berechnete Wert im Mittel zwischen den Angaben für Zellulose mit $0,04 \text{ g/g}$ und Polyester mit $0,07 \text{ g/g}$ bis $0,08 \text{ g/g}$ für gut ventilierte Bedingungen, was dem Erwartungsbereich bei der zugrunde liegenden Brandlastkomposition entspricht.

Tabelle 6.7: Kohlenmonoxid-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe und Ventilationsbedingungen

Ventilation ²⁶	Zellulose	Polyester	Polyethylen	Polystyrol
brandlastgesteuert [213]	0,004	0,07-0,08	0,024	0,060
ventilationsgesteuert [134]	0,145	-	0,192	0,137

6.2.6.3 Chlorwasserstoff

Chlorwasserstoff stellt die einzige detektierte Komponente der reizend wirkenden, toxischen Brandgase dar²⁷. Es entsteht hauptsächlich bei der Verbrennung von Polyvinylchlorid (PVC), dem bedeutendsten Vertreter halogener Kohlenwasserstoffe mit einem breit gefächerten Anwendungsspektrum [48]. Dabei steht

²⁶ Für die ventilationsgesteuerten Werte wurde ein Äquivalenzverhältnis von 2 angenommen [134].

²⁷ vgl. Abschnitt 4.3.2

die Bildungsrate von HCl unter anderem in Zusammenhang zur Brandtemperatur [131].

Abbildung 6.10 illustriert die Chlorwasserstoff-Freisetzungsraten der Hauptversuche, die sich weniger spezifisch darstellen als die der anderen Gaskomponenten. Um die HCl-Emissionen ebenfalls im Brandmodell zu adressieren, kommt das bereits für die Wärme-, die CO₂- und teilweise für die CO-Freisetzung genutzte Kurvenprofil mit quadratisch ansteigender Entwicklungsphase, konstanter Vollbrand- und linear sinkender Abklingphase²⁸ zur Anwendung. Entsprechend der experimentell ermittelten Werte wird die maximale Chlorwasserstoff-Freisetzung mit 0,04 g/s angenommen (siehe Abbildung 6.10).

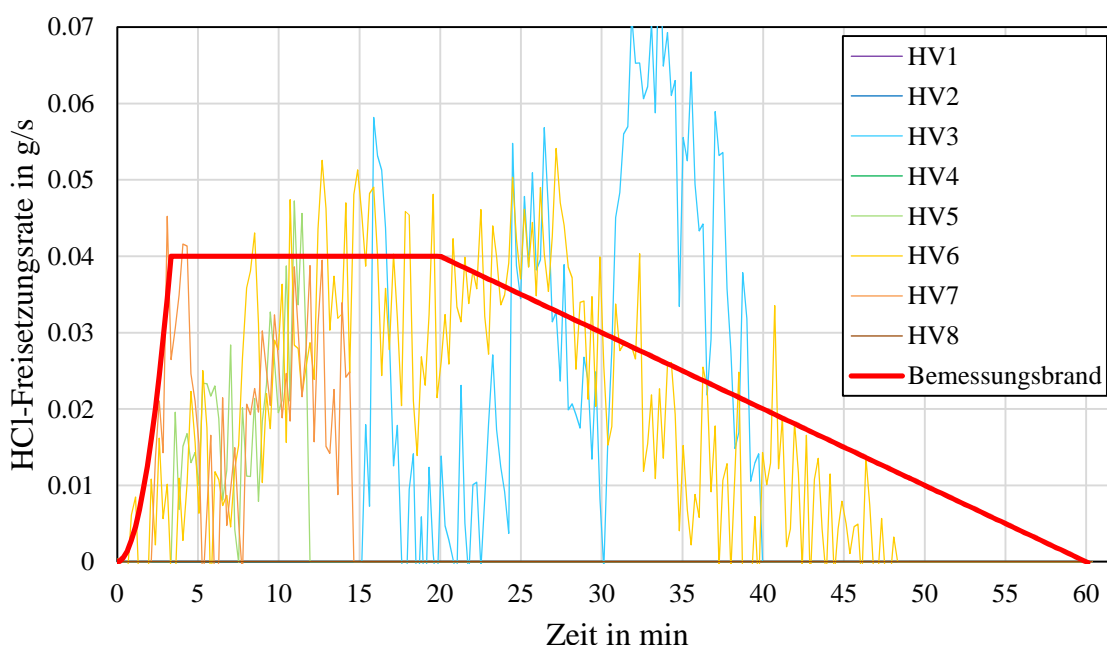


Abbildung 6.10: HCl-Freisetzungsraten der Hauptversuche und Bemessungskurve

Bei Chlorwasserstoff ist zu beachten, dass es in besonderem Maße zur Zersetzung neigt. Zwar zersetzen sich auch andere Brandgase, nur geschieht dies entweder mit einer erheblich langsameren Rate (z. B. Cyanwasserstoff) oder sie treten seltener bzw. in viel geringeren Konzentrationen in Brandatmosphären auf (z. B. Fluorwasserstoff oder Bromwasserstoff) [27]. Zum einen hat Chlorwasserstoff eine starke Tendenz, sich an Oberflächen anzulagern, zum anderen ist es in hohem Maße wasserlöslich und bindet sich an kleinste Wassertropfen, die bei der Wasserdampfkondensation als reguläre Folge der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehen [48]. Maßgebliche Faktoren bei der Zersetzung von Chlorwasserstoff sind

²⁸ vgl. Abschnitt 6.2.3

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

daher der Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre, das Material exponierter Oberflächen und die Luftbewegung. Experimentell ermittelte Halbwertszeiten für die Zersetzungsraten von HCl bewegen sich im Bereich von 0,5 min und 10 min [27]. Bei Versuchen mit Wärmefreisetzungsraten von 200 kW waren die gemessenen HCl-Werte um 15 % geringer als die tatsächliche Emission [48]. Demzufolge ist für diese Untersuchung anzunehmen, dass die verwendete Messtechnik einen gewissen Anteil des vom Brandobjekt emittierten Chlorwasserstoffes nicht erfasst. Da das HCl-Freisetzungsprofil für den Bemessungsbrand jedoch bereits konservativ angesetzt ist, wird von einer Anpassung entsprechend einer vermuteten Zersetzungsrates zunächst abgesehen.

6.2.7 Rauchpartikel

Der dynamische Rauchpartikel-Entstehungsanteil $\Psi_R(t)$ berechnet sich nach den Gleichungen 5.9, 5.10 und 5.11 in Abschnitt 5.2.7. In Abbildung 6.11 ist zu erkennen, dass die Rauchpartikel-Entstehungsanteile während der Brandentwicklungsphase verhältnismäßig höher ausfallen als im weiteren Brandverlauf. Das begründet sich darin, dass in den ersten Brandminuten zunächst die thermische Aufbereitung der Brennstoffe stattfindet. In diesem Stadium entstehen pyrolytische Zersetzungsprodukte, die aufgrund des noch vergleichsweise niedrigen Temperaturniveaus nur zu einem geringeren Anteil mit Sauerstoff reagieren und somit vermehrt als nicht oxidierte Partikel in die Atmosphäre entweichen. Grundsätzlich verlaufen die Werte der Rauchpartikel-Entstehungsanteile über den Versuchszeitraum nahezu konstant im Bereich von 0,01 g/g und 0,04 g/g.

Lediglich die Resultate des dritten Hauptversuchs »HV3« kennzeichnen sich mit dem Maximum im Bereich von 0,24 g/g durch signifikant höhere Werte. Diese Ergebnisse lassen sich über das im Vergleich zu den anderen Versuchen stark abweichende Brandverhalten begründen: Innerhalb der ersten 15 Minuten schwelt das Gepäckstück vornehmlich im Inneren, was eine stark unterventilierte Verbrennungsreaktion bedeutet, die mit einer erheblich höheren Freisetzungsrates unverbrannter Pyrolyseprodukte einhergeht. Nach dem Eintreten des Druckgefäßzerknalls, gefolgt von der Durchzündung des Gepäckstückes²⁹, war das optische System leider derart beschädigt, dass im weiteren Versuchsverlauf keine weitere Aufzeichnung möglich war.

Für die Implementierung des zu entwickelnden Brandmodells in die Brandsimulati-

²⁹ vgl. Abschnitt 6.2.2

on ist die Vorgabe eines konstanten Wertes für den Rauchpartikel-Entstehungsanteil erforderlich. Hierbei ist wiederum die Charakteristik der Versuchskonfiguration als offenes System mit mechanischer Rauchableitung zu berücksichtigen. Demzufolge wird angenommen, dass bei einem Gepäckstückbrand unter realitätsnäheren Konditionen ein höherer Rauchpartikel-Entstehungsanteil zu erwarten ist³⁰. Dementsprechend werden die gemittelten Messergebnisse von ca. 0,02 g/g mit einem Sicherheitszuschlag ergänzt und für das Brandmodell ein konstanter Rauchpartikel-Entstehungsanteil von 0,03 g/g festgelegt.

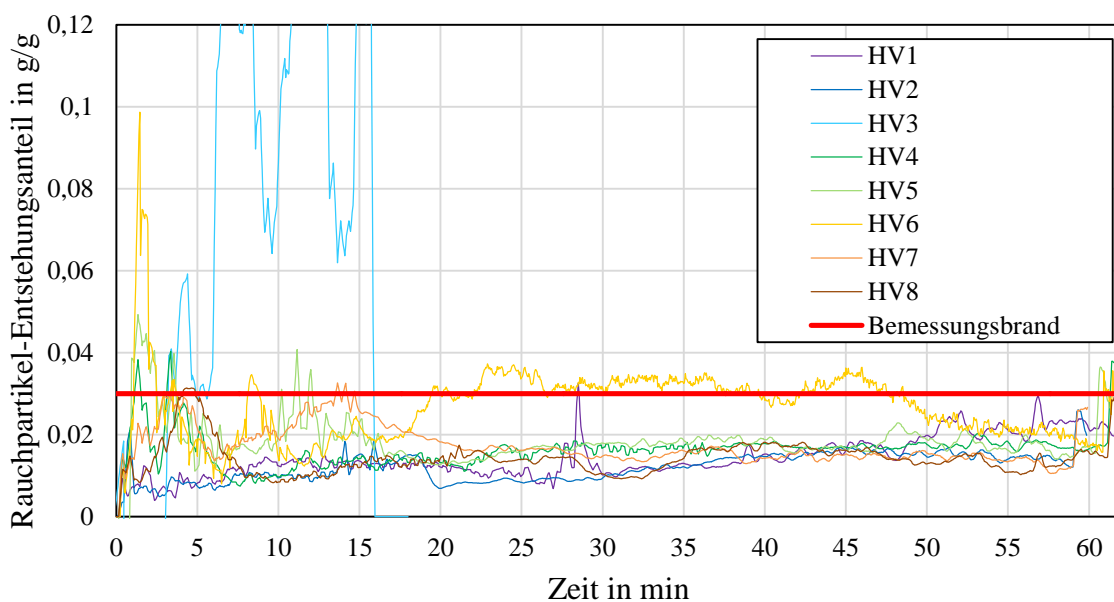


Abbildung 6.11: Rauchpartikel-Entstehungsanteile der Hauptversuche und Bemessungskurve

Tabelle 6.8 enthält statische Rauchpartikel-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe und verschiedene Ventilationsbedingungen. Hierbei fällt auf, dass sich die experimentell ermittelten Werte eher im unteren Bereich der dargestellten Literaturwerte für gut ventilierte Verbrennungsvorgänge einzuordnen sind. Die Ergebnisse sind trotzdem erwartungsgemäß, da aufgrund der Versuchsanordnung mit optimalen Ventilationsverhältnissen ein Großteil der emittierten Pyrolyseprodukte auch oxidieren kann. Auch für die erheblich höheren Messwerte des »HV3« korrespondieren die Resultate gut mit denen für ventilationsgesteuerte Verhältnisse, die gegenüber den brandlastgesteuerten Konditionen um einiges höher liegen.

³⁰ vgl. Abschnitt 5.2.9

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

Tabelle 6.8: Rauchpartikel-Entstehungsanteile für ausgewählte Brennstoffe und Ventilationsbedingungen

Ventilation ³¹	Zellulose	Polyester	Polyethylen	Polystyrol
brandlastgesteuert [213]	0,015	0,090	0,060	0,164
ventilationsgesteuert [134]	0,028	-	0,098	0,330

Raucherzeugungsrate

Die Raucherzeugungsrate stellt eine zusätzliche Brandkenngröße dar, die bei der Charakterisierung von Bränden Anwendung findet³². Sie dient zwar nicht als Eingangsparameter in die numerische Simulation, kann aber beispielsweise für physikalische Raucherzeugungsmodelle genutzt werden. Die mit Gleichung 5.13 berechneten Werte finden sich in Abbildung 6.12. Diese beinhaltet ebenfalls die Nachbildung der Raucherzeugungsrate für das zu entwickelnde Brandmodell unter Verwendung der in Abschnitt 6.2.3 hergeleiteten Kurvenform.

Die maximale Raucherzeugungsrate von 1,2 m²/s erhält man, wenn man den mittleren Rauchpartikel-Entstehungsanteil³³ von 0,02 g/g, bei der nominellen Wärme-freisetzungsrate von 120 kW und die nominelle Massenverlustrate des Brennstoffes von 6,5 g/s sowie einen Rauchgasvolumenstrom von 1 m³/s in die Gleichungen 5.12 und 5.13 einsetzt.

³¹ Für die ventilationsgesteuerten Werte wurde ein Äquivalenzverhältnis von 2 angenommen [134].

³² vgl. Abschnitt 5.2.7

³³ Auf einen Sicherheitsbeiwert, wie für den in der Brandsimulation genutzten konstanten Rauchpartikel-Entstehungsanteil, wird an dieser Stelle verzichtet; eine szenarioabhängige Prüfung der Anwendungsbedingungen wird jedoch empfohlen.

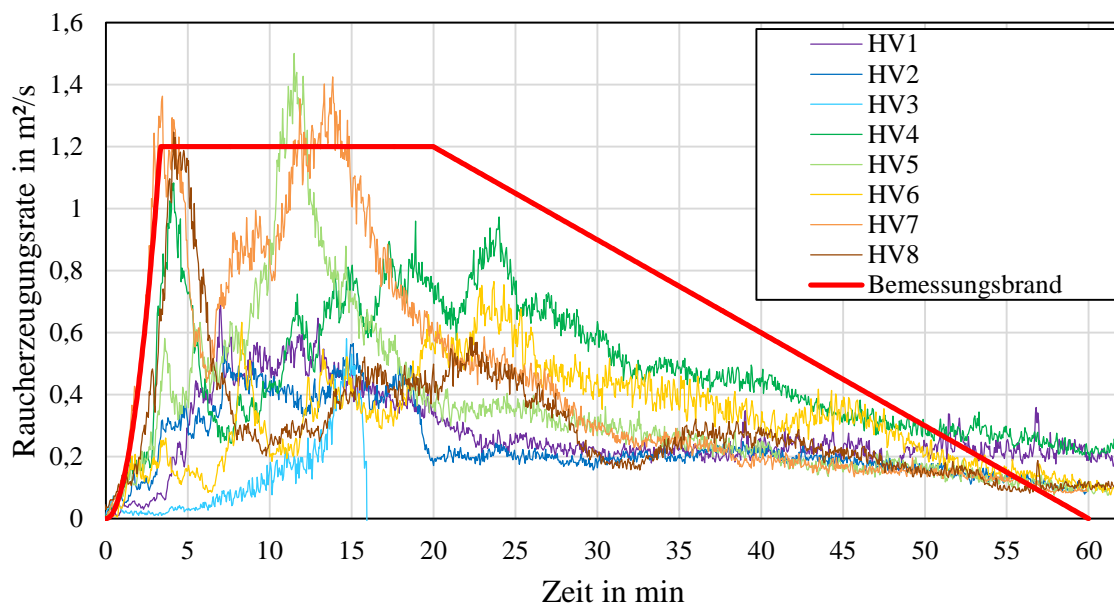


Abbildung 6.12: Raucherzeugungsraten der Hauptversuche und Bemessungskurve

6.2.8 Abluftvolumenstrom

Abbildung 6.13 visualisiert die Volumenströme im Rauchabzugssystem. Der Nominalwert von $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$ dient als Referenz für die Prüfung des entwickelten Brandmodells in Abschnitt 7.2.8.

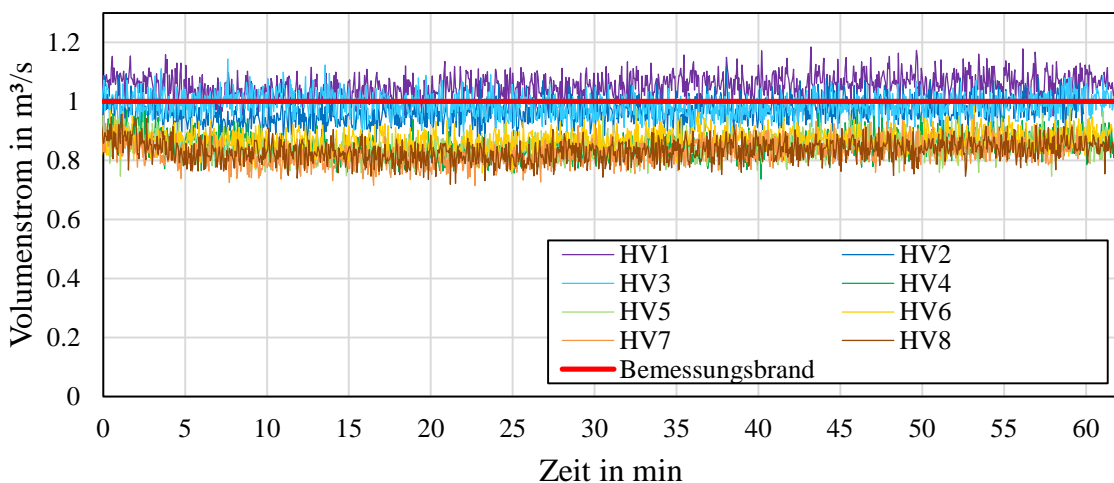


Abbildung 6.13: Abluftvolumenströme der Hauptversuche

6.3 Vergleich und Diskussion mit bestehenden Brandverlaufskurven

Die in den Abschnitten 6.2.3, 6.2.6 und 6.2.7 entwickelten Teilmodelle für die Wärmefreisetzungsrates sowie die Emissionen toxischer und sichtrübender Substanzen erlauben nun, das Brandverhalten eines typischen Gepäckstückes vollständig zu beschreiben und beantworten damit die erste der beiden Kernfragestellungen dieser Forschungsarbeit³⁴.

Dieser Abschnitt vergleicht das in dieser Untersuchung entwickelte Brandmodell mit den existierenden, modellhaften Verlaufskurven für Gepäckbrände, die in Abschnitt 3.2.3 bereits vorgestellt wurden. Allerdings beschränkt sich die vergleichende Diskussion auf die Angaben zur Wärmefreisetzungsrates, da hinsichtlich stofflicher Emissionen zu wenig Datenmaterial verfügbar ist³⁵. Abbildung 6.14 enthält eine Übersicht über die nachfolgend diskutierten zeitabhängigen Wärmefreisetzungsrates und das in dieser Untersuchung entwickelte Brandmodell.

Zündmodell Nr. 5 nach EN 45545-1

Dieses normative Zündinitial, das unter anderem auch einen Gepäckbrand mit abbilden soll, weist mit seiner zweistufigen Wärmefreisetzung innerhalb der ersten zehn Minuten eine durchgehend höhere Wärmefreisetzung als das vorliegende Brandmodell auf. Die bis zu diesem Zeitpunkt freigesetzten Energiemengen belaufen sich auf 81 MJ respektive 56 MJ. Allerdings endet die Wärmefreisetzung des normativen Zündinitials an diesem Zeitpunkt, wohingegen das hier entwickelte Brandmodell noch weitere 216 MJ und somit insgesamt 272 MJ an Wärmeenergie emittiert. Es ist also festzuhalten, dass das Zündmodell Nr. 5 nach EN 45545-1 in der initialen Brandphase konservativer angelegt ist und damit das neu entwickelte Brandmodell hinreichend abdeckt. Allerdings setzt es wegen der nur zehnmündigen Branddauer insgesamt nur ca. 30 % der Wärmeenergie frei, die das hier entwickelte Brandmodell emittiert. Das normative Zündmodell eignet sich also ab der zehnten Brandminute nicht mehr zur repräsentativen Abbildung eines brennenden Gepäckstückes.

Zündinitial für den Fahrzeug-Bemessungsbrand nach TR Strab BS

Dieses Zündinitial idealisiert ein Reisegepäckstück mit einer Masse von etwa 7 kg [229], repräsentiert also ein kleineres Zündinitial als die in dieser Untersuchung

³⁴ vgl. Abschnitt 1.3

³⁵ vgl. Abschnitte 1.3 und 3.2.3

behandelten Gepäckstücke mit Massen zwischen 12 kg und 19 kg³⁶. Der Anstieg der Wärmefreisetzungsraten während der Brandentwicklungsphase verläuft trotz des Masseunterschieds nahezu parallel zum hier entwickelten Brandmodell. Jedoch kennzeichnet sich das Zündinitial aus der TR Strab BS durch eine höhere maximale Wärmefreisetzungsrate von 150 kW nach 8 min, an die die lineare Abklingphase mit dem Ende nach 30 min Branddauer unmittelbar anschließt [229].

Die Gesamtwärmefreisetzung des Zündinitials beläuft sich auf ca. 140 MJ, was einem Anteil von 51 % der emittierten Wärme des hier entwickelten Brandmodells ausmacht. Dieser Unterschied basiert maßgeblich auf der doppelten Branddauer von 60 min des Brandmodells. Insgesamt ähneln sich die Brandverläufe der idealisierten 7-kg-Reisetasche und des in dieser Untersuchung entwickelten Brandmodells, das größere Gepäckstücke repräsentiert, im Hinblick auf die Ausprägung der Brandentwicklungsphase und das Niveau der maximalen Wärmefreisetzungsrate. Bei den emittierten Gesamtwärmemengen und den zugehörigen Branddauern zeigen sich jedoch erhebliche Differenzen, die auf die jeweiligen Masseunterschiede und damit die unterschiedlichen brennbaren Gesamtmassen beider Brandmodelle zurückgeführt werden können.

Zündinitial für den S-Bahn-Bemessungsbrand

Die modifizierte Brandverlaufskurve eines Hartschalenkoffers bildet die Brandentwicklungsphase über einen zweistufigen Anstieg der Wärmefreisetzungsraten ab, der sich zum hier entwickelten Brandmodell zeitlich verzögert darstellt. Das Niveau der maximalen Wärmefreisetzungsrate mit 125 kW ist ähnlich, wird allerdings erst nach 400 s (ca. 6:40 min) erreicht und klingt zudem auch bereits nach 800 s (ca. 13:20 min) Branddauer stufenförmig bis zur 40sten Minute wieder ab.

Damit bestimmt sich die Gesamtenergiefreisetzung zu 140 MJ, was wiederum ca. 51 % der emittierten Energiemenge des hier entwickelten Brandmodells ausmacht. Diese Ähnlichkeit zu dem Zündinitial aus der TR Strab BS ist jedoch zufällig, da den Wärmefreisetzungsraten jeweils unterschiedliche Experimentaldaten zugrunde liegen. Insgesamt entspricht das stufenförmig angenäherte Wärmefreisetzungsratenprofil des Zündinitials für den S-Bahn-Bemessungsbrand dem grundsätzlichen Brandverlauf des vorliegenden Brandmodells. Jedoch unterschätzt das stufenförmige Profil die Intensität der Brandentwicklungs- und die Länge der Vollbrandphase.

36 vgl. Anhang A.4

»Reisetasche« in der Richtlinie für Brandbekämpfungssysteme

Bei dem »Brandobjekt Reisetasche« stellt sich die Brandentwicklungsphase über einen linearen Anstieg der Wärmefreisetzungsrate auf 120 kW nach 5 min dar. Damit verläuft diese Brandphase relativ ähnlich intensiv zum quadratisch approximierten Profil des hier entwickelten Brandmodells. Die Vollbrandphase weist somit eine identische Wärmefreisetzungsrate auf, setzt jedoch fast 2 Minuten verzögert ein. Da der weitere Verlauf der Wärmefreisetzungsrate des »Brandobjektes Reisetasche« nicht explizit angegeben ist, sondern lediglich die Gesamtwärme mit 136 MJ quantifiziert wird, können die Länge der Vollbrandphase sowie das Einsetzen und der Verlauf der Brandabklingphase nur abgeschätzt werden³⁷. Zusammenfassend ähneln sich Form und Niveau beider Modelle in der Entwicklungs- und Vollbrandphase, wobei das »Brandobjekt Reisetasche« für die Modellierung der Brandentwicklung einen linearen Anstieg der Wärmefreisetzungsrate verwendet und insgesamt nur 136 MJ Energie freisetzt, wohingegen das hier entwickelte Brandmodell die zweifache Menge emittiert.

Zündinitial für den Bemessungsbrand der Metro in Singapur

Dieses Zündinitial ist das einzige, das zwei simultan brennende Gepäckstücke repräsentieren soll und ist daher nur bedingt vergleichbar. Der Brandverlauf ist stark idealisiert und durch eine konstante Wärmefreisetzungsrate von 200 kW über einen Zeitraum von 30 min abgebildet. Damit verläuft die statische Wärmefreisetzungsrate über diesen Zeitraum weit oberhalb des hier entwickelten Brandmodells, welches jedoch seinerseits zwischen der 30sten und der 60sten Brandminute noch Energie emittiert. Die freigesetzte Gesamtwärme beläuft sich für das Modell der beiden simultan brennenden Koffer auf 360 MJ, was einem Wert von 132 % des einzelnen Gepäckstückes aus dieser Untersuchung entspricht.

Einzelne Gepäckstücke im Rahmen des Metro Project

Bei diesen Brandverlaufskurven einzelner Gepäckstücke handelt es sich jeweils um die gemessenen Versuchsdaten, die an dieser Stelle als Referenz dienen und nicht um bereits modifizierte beziehungsweise modellhafte Vereinfachungen der Brandverläufe. Auf die Darstellung der Daten in Abbildung 6.14 wird daher verzichtet, diese sind jedoch in Abbildung 3.2 in Abschnitt 3.2.3 enthalten. Die insgesamt vier dargestellten Brandobjekte werden nicht einzeln diskutiert, sondern die charakteristischen Merkmale zusammengefasst und mit dem vorliegenden Brandmodell verglichen.

³⁷ vgl. Abschnitt 3.2.3

Die Anstiege der Wärmefreisetzungsraten verhalten sich ähnlich zum hier entwickelten Brandmodell und vor allem die Übereinstimmungen in der quadratisch ausgeprägten Form der Brandentwicklungsphase sind deutlich. Allerdings erreichen die maximalen Wärmefreisetzungsraten weitaus höhere Werte als das vorliegende Brandmodell und die Vollbrandphasen sind kaum erkennbar, da die Wärmefreisetzungsraten kurz nach Erreichen der jeweiligen Maxima stark abfallen und der Ausbrand schnell voranschreitet. Diese weitaus kürzeren, jedoch erheblich intensiveren Vollbrandphasen lassen sich auf das verwendete Zündinitial von 25 kW für 90 s zurückführen.

Zusammenfassende Bewertung

Die vergleichende Untersuchung des entwickelten Brandmodells zu den bereits existierenden, modellhaften Brandverlaufskurven für Gepäckstücke zeigt, dass letztere für die Nachbildung der Brandentwicklungsphase oft einen stufenförmigen oder linearen Anstieg der Wärmefreisetzungsraten verwenden. Das lässt sich damit begründen, dass ein quadratischer Anstieg, wie er für das vorliegende Brandmodell zur Anwendung kommt, zwar die Brandausbreitung realitätsnäher abbildet³⁸, sich jedoch beispielsweise mit einem Gasbrenner nur in Verbindung mit einer automatisch gesteuerten Brennstoffzufuhr nachempfinden lässt. Die Niveaus der maximalen Wärmefreisetzungsraten für ein einzelnes Gepäckstück rangieren untereinander im Bereich zwischen 120 kW und 150 kW, unterscheiden sich allerdings in Dauer und Zeitpunkt. Die insgesamt freigesetzten Wärmemengen variieren zwischen 81 MJ und 140 MJ, was signifikant unterhalb der Gesamtwärmeemission des vorliegenden Brandmodells von 272 MJ liegt.

³⁸ vgl. Abschnitt 6.2.3

Kapitel 6 – Versuchsergebnisse

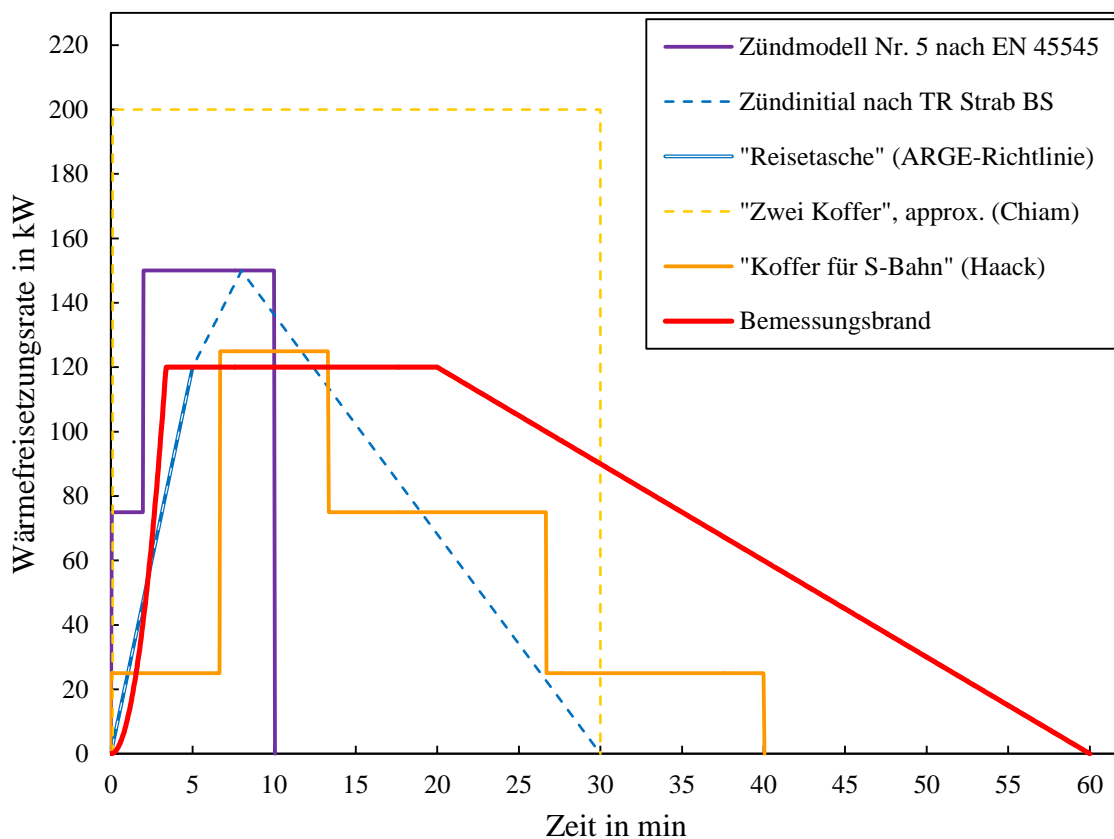


Abbildung 6.14: Entwickelter Gepäckstück-Bemessungsbrand und weitere Brandmodelle, die ein Gepäckstück repräsentieren

Kapitel 7

Numerische Untersuchungen zur Experimentalkonfiguration

In Kapitel 4 werden die Ingenieurmethoden des Brandschutzes und deren Anwendungsspektren, auch bei Schienenfahrzeugen, bereits vorgestellt. Dieses Kapitel behandelt nun die Umsetzung des in den Kapiteln 5 und 6 entwickelten Gepäckstück-Brandmodells mit einer Methode des Brandschutzingenieurwesens. Dabei gliedert sich das Kapitel in zwei Einheiten:

Zunächst erfolgt in Abschnitt 7.1 die Vorstellung des für die numerischen Untersuchungen verwendeten Programms »Fire Dynamics Simulator« (FDS). Im Fokus liegen dabei grundsätzliche Programmeigenschaften und Modellannahmen sowie spezifische Funktionen, die für die nachfolgenden Simulationsrechnungen von besonderem Interesse sind. Daran schließt sich in den Abschnitten 7.2 und 7.3 die Umsetzung der in den vorhergehenden Kapiteln thematisierten Experimentalkonfiguration und des entwickelten Brandmodells mit FDS an. Es gilt anhand ausgewählter Beurteilungskriterien zu prüfen, ob FDS die energetischen und materiellen Emissionen eines typischen Gepäckstückbrandes in geeigneter Weise abbildet, bevor das Brandmodell in Kapitel 8 als Zündinitial für die Brandsimulationen mit einem Schienenfahrzeug eingesetzt wird.

7.1 Brandsimulationsprogramm – Fire Dynamics Simulator

7.1.1 Überblick

Brandsimulationsmodelle lassen sich grundsätzlich in physikalische und mathematische Modelle einteilen. Letztere untergliedern sich in probabilistische und deterministische Anwendungen. Der »Fire Dynamics Simulator« (FDS) gehört zur Gruppe der Feldmodelle, die, neben empirischen Berechnungsansätzen und Zonenmodellen, in die Kategorie der mathematischen deterministischen Modelle der Brandsimulation einzuordnen sind (vgl. Abbildung 7.1).

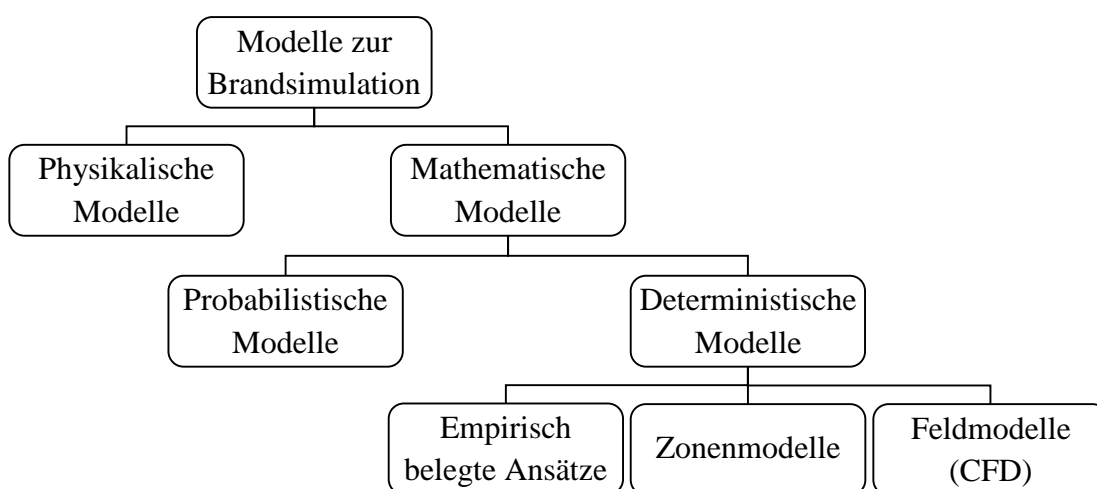


Abbildung 7.1: Systematik der Modelle zur Brandsimulation nach [134]

Feldmodelle¹ basieren auf einem mathematischen Algorithmus zur numerischen Lösung strömungsdynamischer Probleme. Dabei wird der betrachtete Simulationsraum in eine Vielzahl einzelner Kontrollvolumina, den Gitterzellen, unterteilt. Bei der »Finite-Volumen-Methode« sind diese Zellen frei formbar. Liegt der Diskretisierung des Simulationsraumes die »Finite-Differenzen-Methode« zugrunde, orientieren sich quaderförmige Zellen an einem statischen Gitternetz. Die fundamentalen strömungsdynamischen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie, die als partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung vorliegen, werden in Differenzengleichungen überführt und anhand von Anfangs- und Randbedingungen sowohl für jede Raumzelle als auch für endliche Zeitintervalle numerisch gelöst. Mit Submodellen für Strahlungstransport und Verbrennung lassen sich auch komplexe Brandszenarien berechnen. Der Einsatz von Feldmodellen als Ingenieurmethode des Brandschutzes repräsentiert heutzutage den Stand der Technik. [34, 134, 154]

¹ engl. computational fluid dynamics, CFD

Der **Fire Dynamics Simulator** (FDS) ist die Umsetzung eines CFD-Modells zur Abbildung brandinduzierter Strömungen. Mit dem Fokus auf dem Transport von Rauch und Wärme berechnet FDS Strömungsfelder, die auf der numerischen Lösung einer modifizierten Form der Navier-Stokes-Gleichungen für langsame, thermisch angetriebene Fluide basieren. Das Programm verfügt über Submodelle, mit denen sich unter anderem Verbrennungsreaktionen, Strahlungstransport, technische Branderkennung und Sprinklerdüsen modellieren lassen. FDS wurde im Jahr 2000 vom »National Institute of Standards and Technology« (NIST) als frei verfügbares Programm herausgegeben und unterliegt seither einer kontinuierlichen Weiterentwicklung². [117]

Die folgenden Abschnitte geben einen Einblick in die Funktionsweise, verschiedene charakteristische Eigenschaften und die zugrunde liegenden Modellannahmen von FDS, die für die vorliegende Untersuchung von Bedeutung sind. Detailinformationen zu den in FDS implementierten mathematischen Algorithmen, Submodellen, etc. finden sich im Userguide [117] und in der zugehörigen Serie der Technical Reference Guides 1 bis 4 [114, 115, 116, 179].

7.1.2 Hydrodynamisches Modell

FDS berechnet das Strömungsfeld auf Basis der hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie (Navier-Stokes-Gleichungen). Diese werden durch die ideale Gasgleichung und eine Erhaltungsbilanz für Stoffkomponenten ergänzt. Als Grundlage für die räumlich-numerische Approximation dient die Finite-Differenzen-Methode, die den Simulationsraum in eine dreidimensionale, orthogonale Gitterstruktur überführt. Der Lösungsalgorithmus arbeitet mit einem expliziten Predictor-Corrector-Verfahren und einer Genauigkeit zweiter Ordnung für Raum und Zeit. Für das Zentrum jeder Gitterzelle werden die thermodynamischen Zustandsgrößen, wie Druck, Temperatur und Massenanteile der Stoffkomponenten berechnet. Vektorielle Größen, wie die Geschwindigkeit, werden für die entsprechenden Zelloberflächen angegeben. FDS modelliert Turbulenzen standardmäßig über den Ansatz der Large-Eddy-Simulation (LES) nach Smagorinsky. Grundsätzlich ist es aber auch möglich, Turbulenzen direkt aufzulösen, jedoch erfordert die Direct-Numerical-Simulation (DNS) ein äußerst feines Gitternetz. Rauchpartikel, Wasser- und Brennstofftropfen lassen sich als Lagrange'sche Partikel abbilden. [114]

² Bei den in dieser Untersuchung durchgeführten Simulationsrechnungen liegt die Programmversion 5.5.3 zugrunde, da diese gegenüber der aktuellen Version 6.1.0 vom Mai 2014 bereits anhand zahlreicher Anwendungen validiert werden konnte (vgl. Abschnitt 7.1.6).

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

7.1.3 Wärmetransport

FDS bildet die Wärmetransportmechanismen Wärmeleitung, konvektiven Wärmeübergang und Wärmestrahlung mit unterschiedlichen Modellansätzen ab.

Die **Wärmeleitung** in Objekten berechnet FDS anhand der eindimensionalen Fourier-Gleichung. Dabei erfolgt jedoch lediglich eine Betrachtung der Oberfläche eines Objektes, die aus mehreren Materialschichten bestehen kann. Die Definition der thermischen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit, Dicke, Dichte und spezifischer Wärmekapazität für die einzelnen Schichten ersetzt die hinterlegte Voreinstellung »inert«. Auch der Rückseite einer Oberfläche lassen sich verschiedene thermodynamisch wirksame Charakteristika, wie »insulated³« oder »exposed⁴«, zuweisen. Standardmäßig nimmt FDS auf der Rückseite der inneren Materialschicht eines Objektes einen Luftspalt bei Umgebungstemperatur an. [114]

Zur Modellierung des **konvektiven Wärmeübergangs** zwischen Fluiden und Festkörpern unter Verwendung des LES-Turbulenzansatzes kombiniert FDS empirische Korrelationen und differenziert zwischen freier und erzwungener Konvektion. In die Berechnung des konvektiven Wärmestromes fließen unter anderem die Ausrichtung der Oberfläche, deren charakteristische Länge sowie diverse Ähnlichkeitskennzahlen zur Beschreibung der vorliegenden Strömungsverhältnisse ein. [114]

Das Submodell zur Darstellung des **Strahlungstransportes** in FDS basiert auf einer Finiten-Volumen-Methode, die sich auf das bestehende Gitter stützt und zur Lösung der Strahlungstransportgleichung für ein nichtstrahlendes, graues Gas standardmäßig 100 diskrete Raumwinkel verwendet. Die spektrale Abhängigkeit wird allerdings nicht exakt berechnet, sondern das Strahlungsspektrum in einzelne spektrale Bänder separiert. Dabei ergibt sich der mittlere Absorptionskoeffizient tabellarisch in Abhängigkeit von der Temperatur und den vorhandenen stofflichen Komponenten. [114]

7.1.4 Modellierung von Pyrolyse und Verbrennung

Verbrennungen sind hochkomplexe physikalisch-chemische Vorgänge, die eine Vielzahl von Prozessen beinhalten. Die Freisetzung sowie der Übergang von Reaktanden zu Verbrennungsprodukten umfasst verschiedenste Zwischenreaktionen, ein-

3 kein Wärmetransport über die Rückseite

4 Wärmetransport in das auf der Rückseite vorhandene Gitternetz

hergehend mit der Bildung, der Interaktion sowie dem Zerfall diverser kurzlebiger Komponenten und freier Radikale. In vielen Fällen sind diese instabilen Zwischenprodukte, deren Erzeugungs- und Zersetzungsraten unbekannt. [154]

Bei der Verbrennungsmodellierung unterscheidet FDS grundsätzlich die seriell ablaufenden Prozesse der Pyrolyse, also der thermisch induzierten Zersetzung des festen Brennstoffes in flüchtige Moleküle und der exothermen Reaktion des gasförmigen Brennstoffes mit Sauerstoff, der eigentlichen Verbrennung und bildet diese mit zwei voneinander unabhängigen Submodellen ab. Dabei existieren zur Modellierung von Pyrolyseprozessen in FDS verschiedene Methoden, die sich hinsichtlich ihrer Detaillierungsgrade und Komplexitätsebenen unterscheiden. Demnach ist es möglich, den Pyrolyse-Quellterm über eine vordefinierte Wärmefreisetzungsrate direkt vorzugeben, diesen mit einer Temperaturabhängigkeit zu verknüpfen oder den Pyrolyseprozess anhand des thermischen Gleichgewichts auf der Materialoberfläche und der Arrhenius-Gleichung zu berechnen. Dabei bedingen einerseits die Verfügbarkeit der Materialeigenschaften und andererseits die Eignung des jeweiligen Pyrolysemodells für die spezifische Anwendung die Auswahl der Methode. [114, 117]

7.1.4.1 Vorgabe des Pyrolyse-Quellterms

Bei dieser einfachsten Form der Simulation gibt der Anwender eine flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate \dot{q}'' über eine zeitabhängige Funktion $f(t)$ vor. In Verbindung mit der effektiven Verbrennungswärme $\Delta h_{c,\text{eff}}$ bestimmt FDS daraus den gasförmigen Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{BS}'' . Optional kann eine radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit hinzugefügt und/oder der Startzeitpunkt der Funktion an das Erreichen einer vordefinierten (Zünd-) Temperatur an der Oberfläche gekoppelt werden.

$$\dot{m}_{\text{BS}}'' = \frac{\dot{q}'' \cdot f(t)}{\Delta h_{c,\text{eff}}} \quad (7.1)$$

mit \dot{m}_{BS}''	Flächenspezifische Brennstofffreisetzungsrates	in $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
\dot{q}''	Flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate	in $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
$f(t)$	Zeitabhängige Funktion	–
$\Delta h_{c,\text{eff}}$	Effektive Verbrennungswärme	in $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

7.1.4.2 Pyrolysemodellierung nach Arrhenius

FDS verfügt zudem über einen detaillierteren Ansatz zur Nachbildung der Feststoffpyrolyse anhand der von Arrhenius aufgestellten Zusammenhänge, der auf der Vorgabe kinetischer Parameter und Reaktionspfade basiert. Eine Feststoffoberfläche kann in FDS aus mehreren Materialschichten bestehen, die sich wiederum aus einzelnen Materialkomponenten zusammensetzen. Für eine Materialkomponente i können unterschiedliche Reaktionen j bei verschiedenen Temperaturen T_s stattfinden. Dabei sind für jede einzelne Reaktion kinetische Parameter zur Bestimmung der individuellen Reaktionsrate r_{ij} zu definieren. Diese berechnet sich als Funktion der lokalen Massenkonzentration sowie basierend auf der Arrhenius-Gleichung zur mehrstufigen Modellierung der Pyrolyse (siehe Gleichung 7.3).

Die brandtechnologischen Reaktionskennwerte, wie die Aktivierungsenergie A und der präexponentielle Faktor E , lassen sich beispielsweise aus thermogravimetrischen Analysen⁵ in Verbindung mit dem Verfahren der Dynamischen Differenzkalorimetrie⁶ für die jeweiligen Materialien ableiten. Alternativ ist es auch möglich, eine thermogravimetrische Analyse in FDS hypothetisch nachzubilden, um die erforderlichen Parameter A und E intern berechnen zu lassen. Dabei sind eine nominelle Aufheizrate, die Temperatur der maximalen Massenverlustrate des Brennstoffes, der pyrolytisch reaktive Temperaturbereich und eine Referenzrate als Quotient aus der Reaktionsrate bei der Referenztemperatur und dem an der Reaktion beteiligten Massenanteil der Materialkomponente zu definieren. [117]

Die volumetrische Freisetzungsrate des gasförmigen Brennstoffes \dot{m}''' über alle Materialkomponenten i und Reaktionen j berechnet sich wie folgt [114]:

$$\dot{m}''' = \rho_{s0} \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \nu_{ij} \cdot r_{ij} \quad (7.2)$$

$$\text{mit } r_{ij} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s0}} \right) = A_{ij} \cdot \left(\frac{\rho_{s,i}}{\rho_{s0}} \right)^{n_{s,ij}} \exp \left(- \frac{E_{ij}}{R \cdot T_s} \right) \quad (7.3)$$

mit \dot{m}'''	Brennstofffreisetzungsrate	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
ρ_{s0}	Ursprungsdichte der Materialschicht	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ν_{ij} ,	Reaktiver Brennstoffanteil	–
r_{ij}	Rate der Reaktion j der Materialkomponente i	in s^{-1}

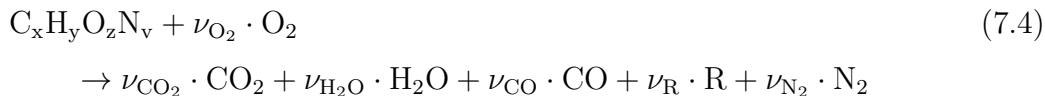
⁵ Die Thermogravimetrie (TGA) ist eine Analysemethode, bei der der Massenverlust einer Probe in zeitlicher Abhängigkeit zur Änderung der Umgebungstemperatur aufgezeichnet wird.

⁶ Bei der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) handelt es sich um ein thermisches Verfahren zur Messung von abgegebenen oder aufgenommenen Wärmemengen einer Probe.

t	Zeit	in s
A_{ij}	Präexponentieller Faktor	in s^{-1}
$\rho_{s,i}$	Dichte der Materialkomponente i	in $kg \cdot m^{-3}$
$n_{s,ij}$	Ordnungszahl der Reaktion	–
E_{ij}	Aktivierungsenergie	in $J \cdot mol^{-1}$
R	Universelle Gaskonstante	in $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
T_s	Temperatur der Materialkomponente i	in K

7.1.4.3 Modellierung der Verbrennung

FDS erlaubt für die Modellierung der Verbrennungsreaktion in der Gasphase lediglich einen Brennstoff mit definierter Komposition und begrenzt ebenfalls die Anzahl der Verbrennungsreaktionen auf eine beziehungsweise zwei. Eine der simpleren Methoden zur chemischen Beschreibung einer Verbrennung ist die Reaktion eines Kohlenwasserstoffes mit Sauerstoff, welche Kohlendioxid, Wasserdampf, Kohlenmonoxid und Ruß entstehen lässt [117]:



mit $C_x H_y O_z N_v$ Molekulare Brennstoffkomposition
 ν Molarer stöchiometrischer Entstehungskoeffizient

Selbst mit diesem einfachsten Ansatz sind noch sechs verschiedene gasförmige Komponenten (Brennstoff, O_2 , CO_2 , H_2O , CO , N_2) und die entstehenden Rauchpartikel R zu berücksichtigen. In FDS lässt sich diese globale, einstufige Reaktionsgleichung für die Verbrennung in der Gasphase noch um die Reaktionsprodukte »unverbrannter Wasserstoff« und »sonstige Komponenten« erweitern. Definiert man jedoch neben der chemischen Brennstoffzusammensetzung gemäß Gleichung 7.4 die massenspezifischen Entstehungsanteile für Kohlenmonoxid, Rauchpartikel, unverbrannten Wasserstoff und sonstige Reaktionsprodukte, ermittelt FDS intern die entsprechenden Mengen der entstehenden Verbrennungsprodukte anhand hinterlegter Korrelationen.

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

Dabei kommt in der Regel⁷ das sogenannte Mischungsbruch-Modell zum Einsatz, mit dem sich die Anzahl der notwendigen Transportgleichungen auf zwei reduzieren lässt: Eine für den gasförmigen Brennstoff und eine für die Reaktionsprodukte. Der Mischungsbruch Z steht für den Quotienten aus der Masse des freigesetzten, gasförmigen Brennstoffes und der Gesamtmasse innerhalb eines Volumens. So ist dem Mischungsbruch an der Oberfläche eines Brenners der Wert 1 zugeordnet und in der Frischluft beträgt er 0. FDS nimmt grundsätzlich an, dass beim Aufeinandertreffen von Brennstoff und Sauerstoff die Verbrennung unmittelbar und vollständig stattfindet, also die zeitliche Dimension des Verbrennungsprozesses im Vergleich zur Bewegung des Strömungsfeldes vernachlässigbar gering ist [186].

Es können jedoch auch mehrstufige Reaktionen sowie der Einfluss von Löschgasen oder Wassernebel innerhalb einer Modellerweiterung abgebildet werden. Abbildung 7.2 veranschaulicht die verschiedenen Zustände des Mischungsbruches beispielhaft für die Massenanteile $Y_{\text{Brennstoff}}$ des Brennstoffes Methan mit den entsprechend entstehenden Massenanteilen für Kohlendioxid $Y_{\text{Kohlendioxid}}$ und Wasserdampf $Y_{\text{Wasserdampf}}$.

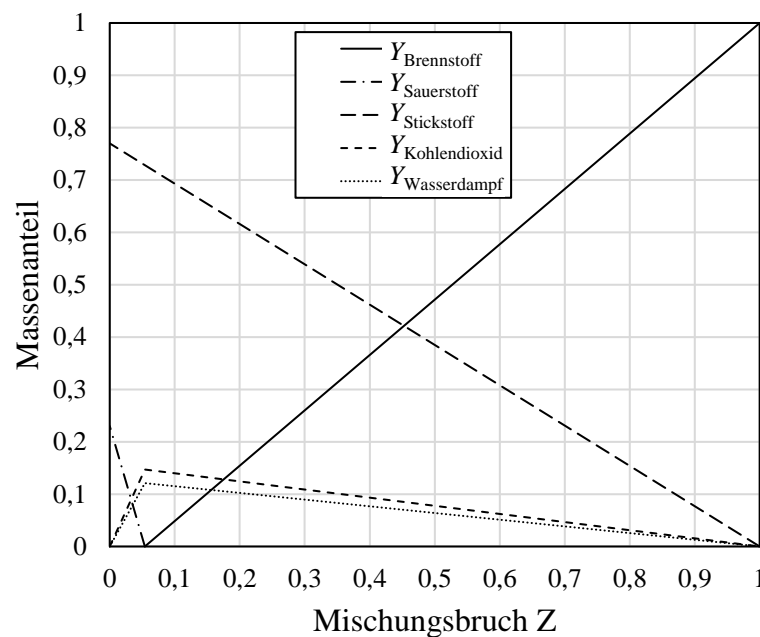


Abbildung 7.2: Zustandsbeziehungen der Massenanteile Y des Mischungsbruches für Methan [114]

⁷ Bei sehr feiner Gitterauflösung kann im DNS-Modus auch ein mehrstufiges Finite-Rate-Verbrennungsmodell verwendet werden [114].

7.1.5 Berechnungsmodi

FDS-Berechnungen lassen sich sowohl auf einem Computer mit einem einzigen Prozessor bzw. Prozessorkern⁸ als auch auf mehreren Computern und der Verwendung einer Vielzahl von CPUs durchführen. Die letztere Methode ist netzwerkbaasiert und gliedert sich in die Ansätze »OpenMP«, »MPI« und »OpenMPI«, die neben der Version mit nur einem Prozessor im Folgenden kurz skizziert werden.

Single Prozessor Version

Für Brandsimulationen kleineren Umfanges im Hinblick auf die Anzahl der Gitterzellen und/oder die Simulationsdauer eignet sich die Berechnung mit nur einer CPU. Aufgrund der seriellen Abarbeitung sämtlicher Rechenschritte stößt diese Methode jedoch verhältnismäßig schnell an ihre zeitlichen Aufwandsgrenzen.

MPI Version

Bei der Benutzung der parallelen Berechnungsmethode MPI⁹ ist der Simulationsraum zwingend in mehrere, miteinander verbundene Berechnungsgitter aufzuteilen. FDS berechnet daraufhin das Strömungsfeld in verschiedenen Prozessen, die entsprechend der Anzahl der erzeugten Berechnungsgitter jeweils einzelnen CPUs mit eigenen Hauptspeichern zugeordnet werden. MPI ist dabei das Protokoll, das die Kommunikation zwischen den Prozessen herstellt. Diese parallele Methode ermöglicht die Einbeziehung einer großen Zahl von CPUs und damit die Bewältigung großer Simulationsaufgaben. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass Berechnungsfehler aufgrund des Datentransfers zwischen den einzelnen Berechnungsgittern auftreten. [202]

OpenMP Version

OpenMP¹⁰ ist eine Programmierschnittstelle, die Programmcodes auf der Ebene von Schleifen parallelisiert und in verschiedenen Teilprozessen¹¹ ausführt. OpenMP ist für Systeme mit mehreren Prozessorkernen¹² und einem gemeinsamen Hauptspeicher¹³ ausgelegt und seit Version 5.4 in FDS implementiert. Ein Vorteil gegenüber MPI besteht darin, dass die Aufteilung des betrachteten Volumens in mehrere Berechnungsgitter nicht notwendig ist, sondern die Berechnung mit einem einzigen Gitter stattfindet. Dementsprechend kann es nicht zu Fehlern infolge der

8 engl. central processing unit, CPU

9 engl. message-passing-interface

10 engl. open multi-processing

11 engl. threads

12 engl. core

13 engl. shared memory

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

Informationsübergabe an den Netzübergängen kommen. [202]

Open-MPI Version

Open-MPI stellt die Verknüpfung aus MPI und OpenMP dar, umfasst also den Ansatz, mehrere Shared-Memory-Systeme (OpenMP) zu einem Distributed-Memory-System (MPI) zusammenzuschließen. Mit solchen hybriden Architekturen lassen sich parallele Berechnungen noch einmal beschleunigen, jedoch stellt die Nutzung hohe Ansprüche an das Computernetzwerk. [202]

7.1.6 Validierung von FDS

Ein herausragendes Merkmal des Fire Dynamics Simulator ist, dass dieser weltweit Anwendung findet, von Genehmigungsbehörden anerkannt wird und damit das meistgenutzte CFD-Brandsimulationsprogramm darstellt. FDS wurde bereits an zahlreichen Anwendungen aus dem baulichen Sektor und auch bei der Simulation von Schienenfahrzeugbränden erfolgreich validiert [56, 116]. So konnten ebenfalls im Forschungsprojekt TRANSFEU Brände in verschiedenen Schienenfahrzeugkonfigurationen, wie Abteile, Einzel- und Doppelstockwagen, anhand von Realbrandversuchen experimentell untersucht und mit FDS modelliert werden [31, 35, 36, 52].

7.1.7 Anwendungsgrenzen von FDS

Bei FDS existieren jedoch Anwendungsgrenzen, die auf die inhärenten Annahmen und Vereinfachungen der Berechnungsalgorithmen zurückzuführen sind. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über ausgewählte Charakteristika, die die Anwendung von FDS beschränken.

Brandphänomene

FDS ist zur Effizienzsteigerung des implementierten Rechenalgorithmus nur für kleine Mach-Zahlen¹⁴ anzuwenden. Im Gegenzug schließt dieser Ansatz die Modellierung von »schnellen« Brandphänomenen, wie Explosionen oder Schockwellen, aus.

Diskretisierung

Das orthogonal strukturierte, numerische Gitternetz führt zu Einschränkungen bei der Modellierung nicht rechtwinkliger Geometrien, die FDS trotz spezieller

¹⁴ Bei einem Verhältnis der Strömungs- zur Schallgeschwindigkeit (Mach-Zahl) von kleiner 0,3 können auch Gase näherungsweise als inkompressibel angenommen und somit eine reziproke Temperatur-Dichte-Abhängigkeit erzeugt werden, was zu einer kürzeren Rechenzeit und einer Reduzierung der mathematischen Variablen führt [114, 221].

Hilfsfunktionen für Schrägen und Bögen nur angenähert abbilden kann [114]. Ein weiterer Aspekt der Diskretisierung sind räumliche Ausdehnungen: Während Verbrennungsprozesse auf wenigen Millimetern stattfinden, können untersuchte Gebäudeabmessungen mehrere hundert Meter betragen [186]. Das Brandsimulationsprogramm muss also Annahmen treffen und Modelle zur Verfügung stellen, um diese Dimensionen abzubilden.

Verbrennung

FDS benutzt das Mischungsbruch-Verbrennungsmodell, das den gasförmigen Brennstoff als skalare Größe darstellt und nur eine vordefinierte Reaktion zulässt¹⁵. Die Verbrennungsreaktion beschränkt sich auf nicht vorgemischte, diffusionsgetriebene Verbrennungsprozesse und die Freisetzung von Verbrennungsprodukten basiert auf einer empirischen Gleichung und nicht auf einer realen Verbrennungsrechnung [112]. Das Brandverhalten sowie die energetischen und stofflichen Emissionen der Materialien basieren also maßgeblich auf den Parametereingaben und nicht auf chemisch-physikalischen Wechselwirkungen [112]. Das bedeutet eine sehr vereinfachte Annahme zur Beschreibung realer Verbrennungsprozesse.

7.2 Modellierung der Experimentalkonfiguration

7.2.1 Intention

Bevor das in Abschnitt 6.2 entwickelte Modell eines brennenden Gepäckstückes als Zündinitial in die Geometrie eines Schienenfahrzeuges implementiert wird (Abschnitt 8.1), soll zunächst anhand geeigneter Parameter geprüft werden, ob mit dem Modell das Brandverhalten realer Gepäckstücke in der Simulationsumgebung abgebildet werden kann. Hierzu erfolgt die geometrische Umsetzung der in Abschnitt 5.2 konzipierten Experimentalkonfiguration sowie der zugehörigen Messanordnung mit dem Fire Dynamics Simulator und den energetischen sowie stofflichen Emissionen des generischen Kofferbrandmodells als Quelltermen. Im Hinblick auf die Übertragung des Brandes auf andere Gegenstände kommt der vom Initialbrand ausgehenden Strahlungsdichte ein hoher Stellenwert zu. Als Brandkenngrößen zum Vergleich des toxischen Potentials und der Sichtbehinderung durch Brandrauch zwischen den Experimentaldaten und dem numerisch implementierten Brandmodell erweisen sich die volumetrischen Konzentrationen der toxischen Komponenten und die Rauchgastransmission im Abzugsrohr als geeignet.

¹⁵ vgl. Abschnitt 7.1.4

7.2.2 Geometrische Diskretisierung

Bei der Festlegung einer Zellgröße für das numerische Berechnungsgitter gilt es, verschiedene Umstände ergebnisorientiert zu berücksichtigen. Um das sich einstellende Strömungsfeld möglichst präzise zu modellieren und die Verbrennungsreaktion in der Gasphase geeignet nachzubilden, müssen einerseits die geometrischen Randbedingungen mit einer feinen Diskretisierung möglichst realitätsnah erfasst werden. Andererseits begrenzen die verfügbare Rechenzeit und -kapazität die Zellenanzahl¹⁶ auf das notwendige Maß, damit sich Dauer und Rechenaufwand für die Brandsimulation akzeptabel handhabbar gestalten.

Um das Konvergenzverhalten, also den Einfluss verschiedener Zellgrößen auf die Simulationsergebnisse zu untersuchen, werden Berechnungsvarianten mit einem kubischen Gitternetz und Zellkantenlängen von 2,5 cm, 5 cm und 10 cm durchgeführt. Damit ergeben sich für die verschiedenen Varianten 3.304.800, 440.640 beziehungsweise 55.080 Zellen. Eine gröbere Diskretisierung ist hinsichtlich der Abbildung der geometrischen Randbedingungen nicht mehr zielführend und eine noch höhere Zellenanzahl bei Kantenlängen unter 2,5 cm ist aufgrund des vielfach höheren Rechenaufwandes nicht mehr darstellbar.

Zur Beurteilung der Eignung einer gewählten Netzeinteilung ist es auch üblich, diese ins Verhältnis zum Durchmesser des Brandes zu setzen [117]. Hierbei lässt sich der Ansatz zur Bestimmung eines charakteristischen Branddurchmessers D^* für schwerkraftgetriebene Plumes nach folgender Gleichung verwenden [117]:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{5}{2}} = 0,41\text{m} \quad (7.5)$$

mit D^*	Charakteristischer Branddurchmesser	in m
\dot{Q}	Wärmefreisetzungsrate	= 120 kW
ρ_∞	Dichte der Umgebungsluft	= 0,88kg · m ⁻³
c_p	Spez. Wärmespeicherkapazität der Luft	= 1,01J · kg ⁻¹ · K ⁻¹
T_∞	Temperatur der Umgebungsluft	= 400 K
g	Erdbeschleunigung	= 9,81m · s ⁻²

Der dimensionslose Ausdruck $D^*/\delta x$ kann verwendet werden, um die Eignung der

¹⁶ Die Halbierung der Kantenlänge eines kubischen Gitternetzes verachtfacht zum einen die Zellenanzahl und halbiert zum anderen den Zeitschritt, was zu einer Erhöhung des Rechenaufwandes um ca. den Faktor 16 führt [202].

gewählten nominellen Zellengröße δx zu bewerten¹⁷.

$$\frac{D^*}{\delta x} = 16,4 \ (\delta x = 2,5 \text{ cm}) = 8,2 \ (\delta x = 5 \text{ cm}) = 4,1 \ (\delta x = 10 \text{ cm}) \quad (7.6)$$

mit D^*	Charakteristischer Branddurchmesser	= 0,41 m
δx	Nominelle Zellgröße	in m

In Validierungsstudien für FDS variierte dieser Indikator zwischen 4 und 16 [117]. Das bedeutet, dass eine Zellkantenlänge von 10 cm ($D^*/\delta x = 4,1$) zwar von den Validierungsstudien abgedeckt wird, sich allerdings die feineren Diskretisierungen mit einer Zellkantenlänge von 5 cm bzw. 2,5 cm ($D^*/\delta x = 8,2$ bzw. 16,4) als geeigneter erweisen und exaktere Ergebnisse versprechen lassen. Die Methode des Quotienten aus charakteristischem Branddurchmesser und nomineller Zellkantenlänge stellt einerseits eine Vergleichbarkeit zu anderen Studien her, ersetzt jedoch andererseits keine Sensitivitätsanalyse zur Diskretisierung des Simulationsraumes [130].

Neben den Berechnungsvarianten mit unterschiedlich feiner Diskretisierung, werden auch die verschiedenen parallelen Berechnungsmodi in die Sensitivitätsanalyse integriert¹⁸. Dementsprechend wird die numerische Simulation des Brandmodells in der Experimentalkonfiguration sowohl mit einem einzelnen Gitternetz zur parallelen Berechnung mit dem Shared-Memory-Ansatz OpenMP als auch mit mehreren Gitternetzen zur Anwendung der Distributed-Memory-Methode unter MPI umgesetzt, um eine Vergleichbarkeit beider Parallelisierungsarchitekturen herstellen zu können. Für die Simulationsvariante mit MPI wird das Berechnungsvolumen in insgesamt zehn Einzelnetze zerlegt. Hierzu teilt sich das zu diskretisierende Volumen an einer horizontalen Ebene direkt unterhalb der Brandquelle (siehe Abbildung 7.4), um Netzgrenzen innerhalb des sich formierenden Auftriebstrahles (Plume) zu vermeiden, was zu Rechenungenauigkeiten führen kann [117]. Um die beiden übereinanderliegenden zentralen Netze gruppieren sich jeweils vier weitere Netze, die das äußere Strömungsfeld repräsentieren. Der Plumbereich im Zentrum wird mit einer Gitterweite von 2,5 cm diskretisiert, um das Strömungsverhalten des Auftriebsstrahls möglichst realitätsgetreu nachzubilden. Den äußeren Netzen ist eine Zellkantenlänge von 5 cm zugeordnet. Eine Übersicht über die verschiedenen Berechnungsvarianten folgt in Abschnitt 7.2.9.

¹⁷ Die Größe $D^*/\delta x$ kann als die Anzahl der Berechnungszellen angesehen werden, die den charakteristischen (nicht notwendigerweise den physikalischen) Branddurchmesser überspannen.

Je mehr Zellen den Brand überspannen, desto besser ist die Auflösung der Berechnung [117].

¹⁸ vgl. Abschnitt 7.1.5

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

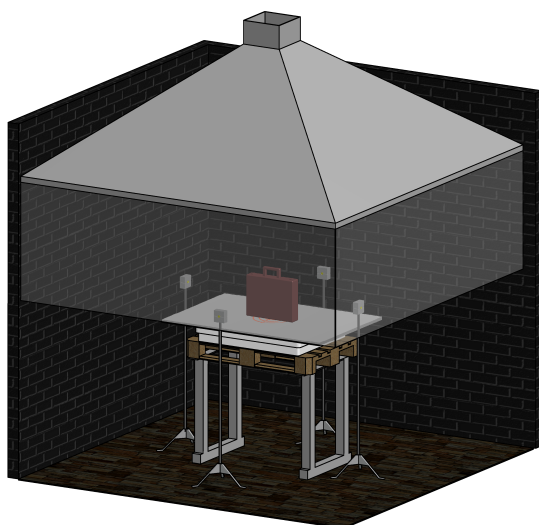


Abbildung 7.3: Schrägansicht (CAD)

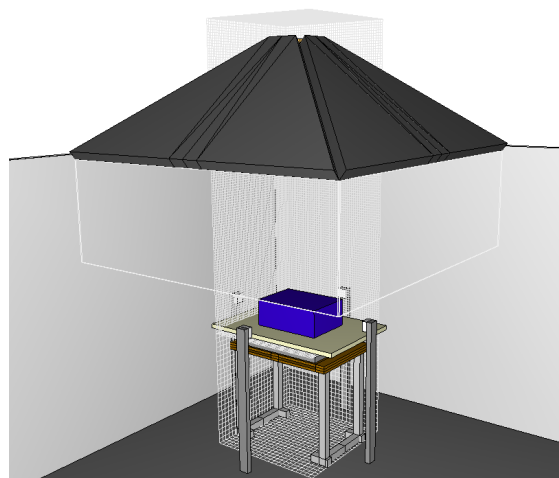


Abbildung 7.4: Schrägansicht (Pyrosim) zeigt 2 von 10 Netzen

7.2.3 Materialdaten

Die thermophysikalischen Materialdaten für die Komponenten der Experimentalkonfiguration werden in die Simulation integriert, um den Wärmetransport innerhalb der Bauteile zu modellieren. Sie entstammen, abgesehen vom Gepäckstück, der Materialbibliothek des Programms PyroSim [194], das als grafische Oberfläche zur Simulationserstellung verwendet wird.

Tabelle 7.1: Thermophysikalische Materialdaten für die Brandsimulation

Stoff	Massen- dichte	Wärmeleit- fähigkeit	Spez. Wärme- kapazität	Emissivität
	ρ	λ	c	ϵ
	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	–
Mauerwerk	750	0,36 bis 0,45	1,04	0,80
Stahl	7850	45,8	0,46	0,95
Kalziumsilikat	720	0,12	1,25 bis 1,55	0,83
Gepäckstück ¹⁹	230	0,18	1,20	0,90

¹⁹ Die mittlere Massendichte wurde aus Volumen und Masse der gefüllten Gepäckstücke berechnet, die Werte für die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität für thermoplastische Kunststoffe gemittelt [193, 219].

7.2.4 Brandmodell – Wärmefreisetzung

Die Geometrie des liegenden Gepäckstückes wird für die Simulation quaderförmig angenähert und die Maße anhand der in Abschnitt 5.3.2 vorgestellten Gepäckstücke für die Hauptversuche gemittelt²⁰. Für den Quader mit den Abmessungen 65 cm x 50 cm x 30 cm werden alle Seiten- und die Deckfläche als Brandfläche angesetzt, wodurch sich die Gesamtoberfläche zu 1,015 m² berechnet. Für diese Fläche wird das in Abschnitt 6.2.3 entwickelte, modellhafte Profil der Wärmefreisetzungsrates eines typischen Gepäckstückes als zeitabhängige Funktion einer flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrates implementiert²¹.

7.2.5 Brandmodell – Gasfreisetzung

7.2.5.1 Methodik

Das Standard-Verbrennungsmodell in FDS sieht vor, entstehende Brandgase über statische Entstehungsanteile in der Reaktionsgleichung zu berücksichtigen²². Um jedoch das entwickelte Brandmodell auch für die emittierten Bandgase²³ adäquat in die Simulationsumgebung zu überführen, ist es erforderlich, die Erzeugung dieser Komponenten von dem statischen Entstehungsanteil und damit von der Wärmefreisetzungsrates zu entkoppeln. Das lässt sich erreichen, indem man die entsprechenden dynamischen CO₂-, CO- und HCl-Erzeugungsrates, zumindest anteilig, als zusätzliche Gase in Form von passiven Skalaren mit separaten Transportgleichungen in die Simulation implementiert. Dieser Ansatz wurde in ähnlicher Form bereits im Projekt TRANSFEU²⁴ verwendet [35, 36, 52].

Ein Nachteil dieser Methode kann allerdings darin bestehen, dass bei dem Hinzufügen zusätzlicher Gase in das Simulationsvolumen der volumetrische Sauerstoffanteil lokal künstlich abgesenkt wird. So ist es theoretisch möglich, dass es bei größeren Freisetzungsrates dazu kommt, dass die Pyrolysegase erst mit gewissem Abstand zur Materialoberfläche verbrennen, nämlich dort, wo der Sauerstoffgehalt wieder über dem Grenzwert für eine Verbrennung von standardmäßig 15 % vol. liegt. Bei Gasfreisetzungsrates in der Größenordnung, wie sie in der vorliegenden Simulation zusätzlich ergänzt werden, ist dieses Phänomen jedoch nicht zu erwarten bzw. nicht signifikant zu bewerten.

²⁰ Die jeweiligen Abmessungen sind in Anhang A.4 enthalten.

²¹ vgl. Abschnitt 7.1.4.1

²² vgl. Abschnitt 7.1.4.3

²³ vgl. Abschnitt 6.2.6

²⁴ vgl. Abschnitt 2.1.5

7.2.5.2 Kohlendioxid

Für das Gas CO_2 wird von der oben beschriebenen Methode abgewichen und ein alternativer Ansatz genutzt, mit dem sich in diesem speziellen Fall auf das Hinzufügen einer weiteren Transportgleichung verzichten lässt, wodurch sich für die große Anzahl der durchzuführenden Simulationen²⁵ die benötigte Rechenzeit verringern lässt. Da die CO_2 -Freisetzungsrates des Brandmodells proportional zur Wärme-freisetzungsrates verläuft²⁶, lässt sich an dieser Stelle mit einem konstanten Entstehungsanteil arbeiten. Dieser kann jedoch nicht manuell vorgegeben werden, da sich die CO_2 -Erzeugungsrates aus der vorgegebenen, globalen Verbrennungsreaktion in Verbindung mit der materialspezifisch definierten, effektiven Verbrennungswärme berechnet (vgl. Gleichung 7.4). Eine Steuerung des CO_2 -Entstehungsanteils in der Simulation lässt sich allerdings über eine Modifizierung der materialspezifischen, effektiven Verbrennungswärme vornehmen, insofern man die daraus resultierenden Effekte entsprechend berücksichtigt. Die folgenden Absätze erläutern die Vorgehensweise.

FDS ermittelt den molaren CO_2 -Entstehungsanteil ν_{CO_2} für die vom Anwender definierte Brennstoffzusammensetzung wie folgt [117]:

$$\nu_{\text{CO}_2} = \nu_{\text{C}_{\text{BS}}} - \nu_{\text{CO}} - (1 - X_{\text{H}}) \cdot \nu_{\text{S}} = 0,934 \frac{\text{mol}_{\text{CO}_2}}{\text{mol}_{\text{BS}}} \quad (7.7)$$

$$\text{mit } \nu_{\text{CO}} = \Psi_{\text{CO}} \cdot \frac{M_{\text{BS}}}{M_{\text{CO}}} \text{ und } \nu_{\text{S}} = \Psi_{\text{S}} \cdot \frac{M_{\text{BS}}}{M_{\text{S}}} \quad (7.8)$$

Dieser lässt sich auch als massenspezifischer CO_2 -Entstehungsanteil Ψ_{CO_2} ausdrücken:

$$\Psi_{\text{CO}_2} = \frac{\nu_{\text{CO}_2}}{\nu_{\text{C}_{\text{BS}}}} \cdot \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{BS}}} = 2,428 \frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{\text{g}_{\text{BS}}} \quad (7.9)$$

mit ν_{CO_2}	Molarer CO_2 -Entstehungsanteil	in $\text{mol}_{\text{CO}_2} \cdot \text{mol}_{\text{BS}}^{-1}$
$\nu_{\text{C}_{\text{BS}}}$	Kohlenstoffanteil im Brennstoff ²⁷	in $\text{mol}_{\text{C}} \cdot \text{mol}_{\text{BS}}^{-1}$
ν_{CO}	Molarer CO -Entstehungsanteil (konstant)	in $\text{mol}_{\text{CO}} \cdot \text{mol}_{\text{BS}}^{-1}$
X_{H}	Molarer Wasserstoffanteil im Rauch	in $\text{mol}_{\text{H}} \cdot \text{mol}_{\text{BS}}^{-1}$
ν_{S}	Molarer Rauchpartikel-Entstehungsanteil	in $\text{mol}_{\text{S}} \cdot \text{mol}_{\text{BS}}^{-1}$
Ψ_{CO}	CO -Entstehungsanteil ²⁸	in $\text{g}_{\text{CO}} \cdot \text{g}_{\text{BS}}^{-1}$
Ψ_{S}	Rauchpartikel-Entstehungsanteil ²⁹	in $\text{g}_{\text{S}} \cdot \text{g}_{\text{BS}}^{-1}$

²⁵ vgl. Abschnitte 7.2.9 und 8.1.13

²⁶ vgl. Abschnitte 6.2.3 und 6.2.6.1

M_{BS}	Molare Masse des Brennstoffes	in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
M_{CO}	Molare Masse von CO	in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
M_S	Molare Masse der Rauchpartikel	in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$
Ψ_{CO_2}	CO ₂ -Entstehungsanteil	in $\text{g}_{CO_2} \cdot \text{g}_{BS}^{-1}$
M_{CO_2}	Molare Masse von CO ₂	in $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Der CO₂-Entstehungsanteil ist also an die Brennstoffkomposition und die Entstehungsanteile weiterer Komponenten gebunden. Die letztendliche Freisetzungsrate von CO₂ ist jedoch auch vom Brennstoffmassenstrom abhängig. Dieser wiederum berechnet sich bei vorgegebenem Pyrolyse-Quellterm, also vordefinierter Wärmefreisetzungsrates³⁰, aus eben dieser in Verbindung mit der materialspezifischen, effektiven Verbrennungswärme. Und genau diese Korrelation lässt sich vom Anwender in geeigneter Weise modifizieren:

Gibt man die entsprechend gewünschte CO₂-Freisetzungsrates vor, berechnet sich zusammen mit dem von FDS ermittelten CO₂-Entstehungsanteil ein Brennstoffmassenstrom (Gleichung 7.10). Aus dem Quotienten von Wärmefreisetzungsrates³¹ und Brennstoffmassenstrom³² lässt sich nun die modifizierte, effektive Verbrennungswärme des Brennstoffes herleiten (Gleichung 7.11). Da sich die CO₂-Produktion proportional zur Wärmefreisetzungsrates verhält, stellt sich die modifizierte, effektive Verbrennungswärme als Konstante dar.

$$\dot{m}_{BS} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\Psi_{CO_2}} = \frac{10 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{s}}}{2,428 \frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{g}_{BS}}} = 4,119 \frac{\text{g}_{BS}}{\text{s}} \quad (7.10)$$

$$\Delta h_{c,\text{eff}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{BS}} = \frac{120 \text{ kW}}{4,119 \frac{\text{g}_{BS}}{\text{s}}} = 29.131 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (7.11)$$

Mit der benutzerdefinierten Vorgabe einer materialspezifischen, effektiven Verbrennungswärme gelingt es also, den CO₂-Entstehungsanteil manuell zu steuern. Die Effekte auf andere Berechnungsparameter, die von der angepassten spezifischen, effektiven Verbrennungswärme abhängen, sind jedoch entsprechend zu berücksichtigen³³.

Wie eingangs erwähnt, ergibt sich mit der Modifikation der effektiven Verbren-

27 hier: CH_{1,4}O_{0,22}; vgl. Abschnitt 7.2.8

28 hier: 0,039; vgl. Abschnitt 7.2.5.3

29 hier: 0,03; vgl. Abschnitt 7.2.6

30 vgl. Abschnitt 7.1.4.1

31 Maximalwert von 120 kW gewählt; vgl. Abschnitt 6.2.3

32 Maximalwert von 10 $\frac{\text{g}_{CO_2}}{\text{s}}$ gewählt; vgl. Abschnitt 6.2.6.1

33 vgl. folgende Abschnitte

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

nungswärme der Vorteil, auf eine zusätzliche Transportgleichung in der Simulation verzichten zu können, da die CO₂-Freisetzungsraten proportional zur Wärmefreisetzungsraten verläuft. Die große Anzahl der durchzuführenden Simulationen rechtfertigt diesen vergleichsweise komplexeren Ansatz, da sich so die benötigten Ressourcen verringern. Grundsätzlich bietet sich jedoch an, keine Modifikation der materialspezifischen, effektiven Verbrennungseffektivität vorzunehmen und damit die Effekte auf weitere Parameter berücksichtigen zu müssen, sondern die CO₂-Freisetzung, wie oben erläutert, anteilig über eine zusätzliche Transportgleichung zu ergänzen.

7.2.5.3 Kohlenmonoxid

Die CO-Freisetzung verläuft bis zum Zeitpunkt $t = 1.200$ s proportional zur Wärmefreisetzung. Bis zu diesem Zeitpunkt lässt sich die CO-Freisetzungsraten über einen konstanten, massenspezifischen Entstehungsanteil Ψ_{CO} in die Simulation integrieren. Der numerische Wert ergibt sich als Quotient aus der maximalen CO-Freisetzungsraten³⁴ von $0,16 \frac{\text{g}_{\text{CO}}}{\text{s}}$ und dem in Abschnitt 7.2.5.2 berechneten, modifizierten Massenstrom von $4,119 \frac{\text{g}_{\text{BS}}}{\text{s}}$ bei maximaler Wärmefreisetzungsraten³⁵ von 120 kW:

$$\Psi_{\text{CO}} = \frac{\dot{m}_{\text{CO}}}{\dot{m}_{\text{BS}}} = \frac{0,16 \frac{\text{g}_{\text{CO}}}{\text{s}}}{4,119 \frac{\text{g}_{\text{BS}}}{\text{s}}} = 0,039 \frac{\text{g}_{\text{CO}}}{\text{g}_{\text{BS}}} \quad (7.12)$$

Ab dem Zeitpunkt $t = 1.200$ s verhält sich die CO-Freisetzungsraten nicht mehr affin zur Wärmefreisetzungsraten. Während die Wärmefreisetzungsraten von hier an kontinuierlich absinkt und zum Zeitpunkt $t = 3.600$ s endet, verbleibt die CO-Freisetzungsraten³⁶ auf dem Maximum und endet abrupt bei $t = 3.600$ s. Daraus folgt, dass die Differenz zwischen der CO-Freisetzungsraten, die aus dem bereits implementierten, konstanten Entstehungsanteil resultiert, zwischen den Zeitpunkten $t = 1.200$ s und $t = 3.600$ s durch eine additive Freisetzung über eine separate Transportgleichung zu ergänzen ist. Diese kompensiert das kontinuierliche Absinken der CO-Freisetzungsraten über den an den Brennstoffmassenstrom und somit an die Wärmefreisetzungsraten gekoppelten Entstehungsanteil, um das in Abschnitt 6.2.6.2 entwickelte Profil der CO-Freisetzung entsprechend umzusetzen.

³⁴ vgl. Abschnitt 6.2.6.2

³⁵ vgl. Abschnitt 6.2.3

³⁶ vgl. Abschnitt 6.2.6.2

7.2.5.4 Chlorwasserstoff

Eine HCl-Freisetzung ist im Verbrennungsmodell von FDS grundsätzlich nicht vorgesehen³⁷. Die in Abschnitt 6.2.6.3 hergeleitete, zeitabhängige Freisetzung von Chlorwasserstoff wird deshalb in der Simulation mit einer additiven Transportgleichung realisiert.

7.2.6 Brandmodell – Rauchpartikelfreisetzung

Die Auswertung der Hauptversuche in Abschnitt 6.2.7 ergibt, dass sich der Rauchpartikel-Entstehungsanteil als näherungsweise konstant darstellt und mit einem konstanten Wert von $\Psi_R = 0,03$ Gramm Rauch pro Gramm Brennstoff angenommen werden kann. Es ist jedoch für die Simulation der modifizierte Brennstoffmassenstrom³⁸ und damit eine möglicherweise von den Experimentalergebnissen abweichende Rauchpartikel-Freisetzungsrates zu berücksichtigen, was nachstehend geprüft wird.

Die in der Simulation generierte Rauchpartikel-Freisetzungsrates $\dot{m}_{R,Sim}(t)$ berechnet sich wie folgt:

$$\dot{m}_{R,Sim}(t) = \Psi_R \cdot \dot{m}_{BS}(t) = \Psi_R \cdot \frac{\dot{Q}(t)}{\Delta h_{c,eff}} \quad (7.13)$$

mit	$\dot{m}_{R,Sim}(t)$	Rauchpartikel-Freisetzungsrates	in $g \cdot s^{-1}$
	Ψ_R	Rauchpartikel-Entstehungsanteil	in $g \cdot g^{-1}$
	$\dot{m}_{BS}(t)$	Brennstoffmassenstrom	in $g \cdot s^{-1}$
	$\dot{Q}(t)$	Wärmefreisetzungsrates	in kW
	$\Delta h_{c,eff}$	effektive Verbrennungswärme	in $kW \cdot g^{-1}$

Der korrespondierende Rauchpartikel-Entstehungsanteil für die Versuchsergebnisse berechnet sich nach Gleichung 5.10 in Abschnitt 5.2.7. Abbildung 7.5 zeigt das Profil der Rauchpartikelfreisetzung, wie es nach Gleichung 7.13 für die Simulation zu erwarten ist, in Verbindung mit den Rauchpartikel-Freisetzungsrates der experimentellen Untersuchungen. Die gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe zwischen den Experimentalergebnissen und der Simulationsprognose lässt demnach erwarten, dass die vom modellierten Gepäckstück emittierte Rauchpartikelfreisetzung die ermittelten Resultate der realen Gepäckstücke geeignet abbildet.

³⁷ vgl. Abschnitt 7.1.4.3

³⁸ vgl. Abschnitt 7.2.5.2

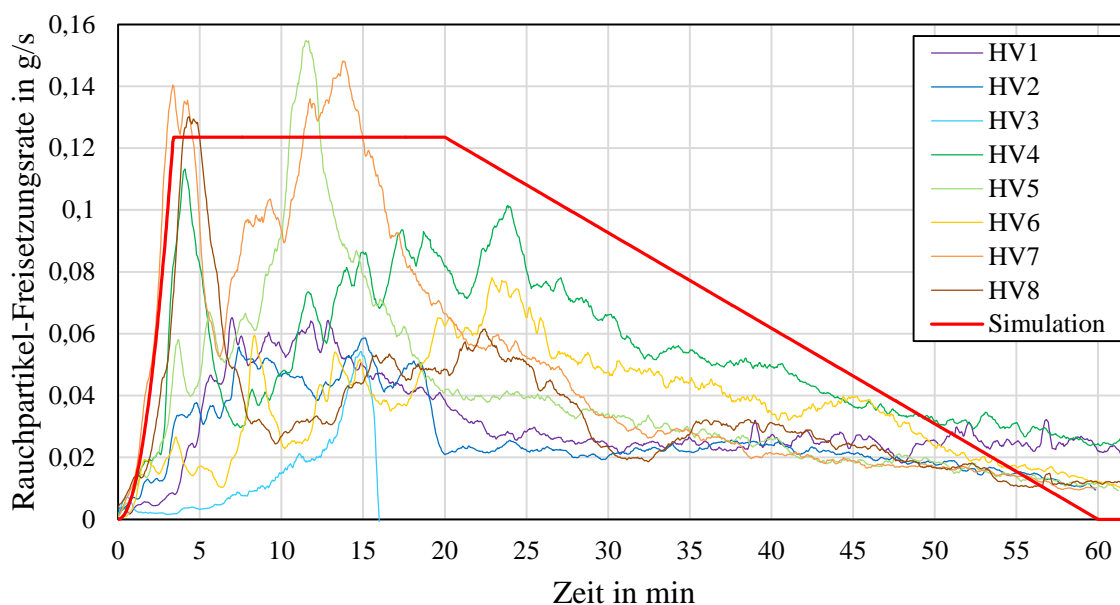


Abbildung 7.5: Rauchpartikel-Freisetzung der Hauptversuche und der Simulation (Prognose)

7.2.7 Instrumentierung

Strahlungsdichte

Um den an einer gekühlten Oberfläche absorbierten Wärmestrom zu quantifizieren, was dem Prinzip der in Abschnitt 6.2.5 beschriebenen Strahlungssensoren des experimentellen Aufbaus entspricht, bietet FDS den Parameter »gauge heat flux« an [117]. Dieser wird für die Simulation verwendet, sodass an den Positionen der Strahlungssonden im Experiment auch während der Simulation die Strahlungsdichte über punktförmige Sensoren aufzeichnen lässt.

Rauchgase

Zur Erfassung der volumetrischen Anteile der Rauchgaskomponenten Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Chlorwasserstoff dienen jeweils punktförmige Sensoren, welche zentrisch im Rohr der Abzugshaube positioniert sind.

Transmission

Die optischen Eigenschaften des Brandrauchs lassen sich, prinzipiell ähnlich zum Experimentalaufbau, über eine Lichtmessstrecke aufzeichnen. Diese wird, wie die Gassensoren, am Übergang zwischen dem oberen Ende der Haube und dem Rauchabzugsrohr angeordnet, wobei der ausgegebene Parameter – die Lichtschwächung – nachträglich zu invertieren ist, um die Transmissionswerte zu erhalten.

7.2.8 Randbedingungen

Zur Berechnung der Verbrennungsreaktion³⁹ ist in FDS eine globale Brennstoffkomposition vorzugeben. Diese ist jedoch für die vorliegende Simulation von sekundärer Bedeutung, da sowohl die energetischen als auch die materiellen Emissionen des Brandmodells vordefiniert sind⁴⁰ und an dieser Stelle auch keine weiteren brennbaren Komponenten vorhanden sind. Als globale Brennstoffkomposition wird ein Polyester der Zusammensetzung $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,22}$ [213] mit einem globalem Heizwert von 13.000 kJ/kg [49] angenommen, da diese synthetischen Polymere die mit am häufigsten auftretenden Materialien der in Kapitel 5 und 6 untersuchten Gepäckstücke und deren Inhalte⁴¹ darstellen.

Die folgende Tabelle fasst weitere globale Parameter zusammen, die in der Simulation berücksichtigt werden:

Tabelle 7.2: Randbedingungen der Simulation

Parameter	Wert	Kommentar
Umgebungstemperatur	$T_\infty = 14 \text{ }^\circ\text{C}$	vgl. Anhang A.1
Umgebungsdruck	$p_\infty = 99500 \text{ Pa}$	gemittelter Messwert
Relative Luftfeuchte	$RH = 35 \text{ } \%$	gemittelter Messwert
Spezifischer Extinktionskoeffizient	$K_m = 8,7 \frac{\text{m}^2}{\text{g}}$	vgl. Abschnitt 5.2.7
Abluftvolumenstrom	$\dot{V} = 1,0 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	vgl. Abschnitt 6.2.8
Strahlungsanteil	$\dot{Q}_{\text{rad}} = 0,35 \cdot \dot{Q}$	Standardwert [117]

7.2.9 Simulationsvarianten

Neben den in Abschnitt 7.2.2 dargestellten Überlegungen zur Sensitivität der Diskretisierung adressiert dieser Abschnitt die unterschiedlichen verwendeten Berechnungsmodi⁴² MPI und OpenMP sowie die hierbei genutzten Rechnerstrukturen. Im Anschluss gibt Tabelle 7.3 eine Übersicht über die Simulationsvarianten.

Für die Berechnung der Simulation mit dem parallelen Distributed-Memory-System (MPI) kommt das Simulationscluster des Fachgebietes »Brand- und Explosionsschutz« der Bergischen Universität Wuppertal zum Einsatz. Die Simulation wird

³⁹ vgl. Abschnitt 7.1.4.3

⁴⁰ vgl. Abschnitte 7.2.4 und 7.2.5

⁴¹ vgl. Anhang A.4

⁴² vgl. Abschnitt 7.1.5

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

auf einem »AMD Phenom II X4 925«-Prozessor⁴³ sowie zwei »AMD Phenom 9850«-Prozessoren⁴⁴ durchgeführt.

Die Simulationsvarianten, bei denen der parallele Modus des Shared-Memory-System (OpenMP) verwendet wird, erfolgen auf dem »High Performance Computing (HPC) Cluster« der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen, das größtenteils mit »Intel Xeon«-Prozessoren⁴⁵ ausgerüstet ist [9]. Testsimulationen indizieren, dass eine Anzahl von 12 Prozessorkernen effizient und ein Arbeitsspeicher von 16 GB ausreichend ist.

Tabelle 7.3: Übersicht über die Simulationsvarianten

Bezeichnung	Modus	Diskretisierung
MPI25	MPI	2,5 cm (5 cm im Randbereich ⁴⁶)
OMP25	OpenMP	2,5 cm
OMP50	OpenMP	5 cm
OMP100	OpenMP	10 cm

43 4 CPUs; 2,81 GHz Taktgeschwindigkeit; 8 GB Arbeitsspeicher

44 4 CPUs; 2,56 GHz Taktfrequenz; 8 GB Arbeitsspeicher

45 1,86 GHz bis 3,6 GHz Taktgeschwindigkeit

46 vgl. Abschnitt 7.2.2

7.3 Simulationsergebnisse

7.3.1 Überblick

Mit der numerischen Simulation der Experimentalkonfiguration in Verbindung mit dem in Abschnitt 6.2 entwickelten Brandmodell, das die energetischen und stofflichen Emissionen eines typischen Gepäckstückes aufweist, soll anhand geeigneter Parameter geprüft werden, ob FDS in der Lage ist, das Brandverhalten realer Gepäckstücke verlässlich abzubilden⁴⁷. Die Beurteilung der gewählten Simulationsparameter »Strahlungsdichte«, »toxische Rauchgaskomponenten« und »Rauchgastransmission« erfolgt im Vergleich zu den im Kontext der Hauptversuche⁴⁸ generierten Daten. Darüber hinaus werden die Simulationsvarianten der parallelen Berechnungsmodi »MPI« und »OpenMP« sowie die verschiedenen Diskretisierungen⁴⁹ gegenübergestellt und bewertet.

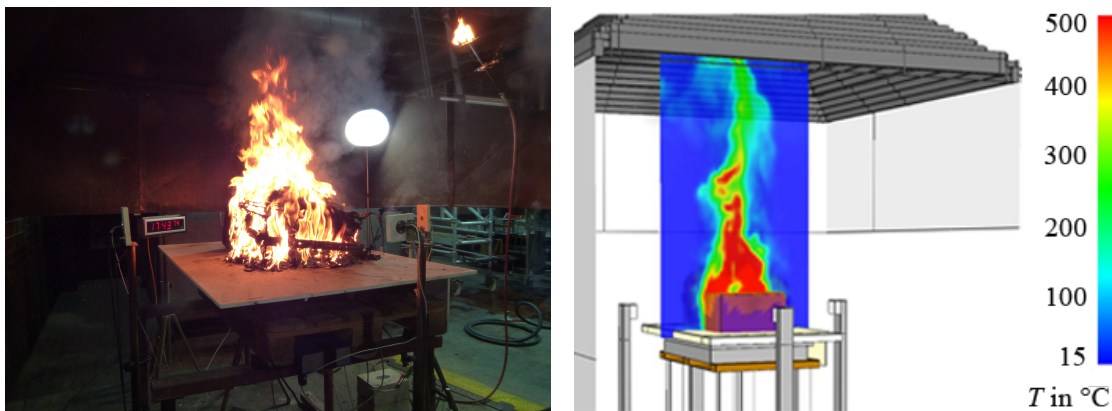


Abbildung 7.6: Hauptversuch 4 (links) und Simulation (rechts), $t = 18$ min

7.3.2 Wärmefreisetzungsrate

Das Profil der Wärmefreisetzungsrate des modellierten Gepäckstückes⁵⁰ wurde über die Definition des Pyrolyse-Quellterms⁵¹ in der Simulation vorgegeben. Da die numerische Nachbildung der Experimentalkonfiguration keine weiteren brennbaren Komponenten enthält, entspricht die Gesamtwärmefreisetzungsrate in der Simulation der Wärmefreisetzungsrate des Brandmodells. Die Ergebnisse der verschiede-

47 vgl. Abschnitt 7.2.1

48 vgl. Kapitel 5 und 6

49 vgl. Abschnitt 7.2.9

50 vgl. Abschnitt 6.2.3

51 vgl. Abschnitt 7.1.4.1

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

nen Simulationsvarianten belegen, dass die unterschiedlich feinen Diskretisierungen⁵² und die verschiedenen parallelen Berechnungsmodi⁵³ die Wärmefreisetzung nicht beeinflussen, sondern sämtliche Ergebnisse eine direkte Übereinstimmung aufweisen (vgl. Abbildung B.1 in Anhang B.1).

7.3.3 Strahlungsdichte

In Analogie zu Abbildung 6.6 in Abschnitt 6.2.5 zeigt Abbildung 7.7 jeweils die Maximalwerte der vier Strahlungsdichtesonden der Hauptversuche, hier ergänzt um die Maximalwerte der auftreffenden Strahlungsdichten an den korrespondierenden Messpunkten⁵⁴ der verschiedenen Simulationsvarianten.

Die zeitlichen Verläufe der Strahlungsdichten in den Simulationen entsprechen der grundsätzlichen Form des implementierten Wärmefreisetzungsprofils des Brandmodells⁵⁵. Dabei verhalten sich die Ergebnisse der beiden verwendeten parallelen Berechnungsmodi MPI und OpenMP in den Simulationsvarianten »MPI25« und »OMP25« mit vergleichbarer Diskretisierung nicht identisch, sondern weisen geringe Differenzen zueinander auf. Das begründet sich in den spezifischen Charakteristika des jeweils gewählten Berechnungsmodus, da der Distributed-Memory-Ansatz (MPI25) im Gegensatz zum Shared-Memory-Ansatz (OMP25) auf der Verwendung mehrerer Raumgitternetze basiert und der Datentransfer zwischen den Einzelnetzen mit gewissen Fehlern behaftet ist⁵⁶.

Größeren Einfluss als der genutzte Berechnungsmodus nimmt allerdings die gewählte Zellgröße des Berechnungsgitters auf die Simulationsergebnisse, wie die Varianten »OMP25«, »OMP50« und »OMP100« belegen: Während sich die Maximalwerte der Strahlungsdichten für eine Diskretisierung von 2,5 cm in der Größenordnung von 7,5 kW/m² bewegen, liegt das Maximum in der Simulation mit einer Zellkantenlänge von 5 cm bei ca. 8,5 kW/m² und in der Variante mit der 10-cm-Diskretisierung erreichen die Strahlungsdichten sogar Maximalwerte von 11 kW/m². Diese Unterschiede sind auf die Berechnungsmethode des Strahlungstransportes zurückzuführen, der ein Finite-Volumen-Verfahren zugrunde liegt. Dieses stützt sich auf dasselbe Raumgitter, das für die Berechnung des Strömungsfeldes verwendet wird und der Strahlungsaustausch zwischen den geometrischen Oberflächen steht infolgedessen in direkter Abhängigkeit zur gewählten Zellgröße.

⁵² vgl. Abschnitt 7.2.2

⁵³ vgl. Abschnitt 7.2.9

⁵⁴ vgl. Abschnitt 7.2.7

⁵⁵ vgl. Abschnitt 6.2.3

⁵⁶ vgl. Abschnitt 7.1.5

ße⁵⁷. Absolut betrachtet ist der Strahlungsanteil an der Gesamtwärmefreisetzung jedoch nicht höher bzw. von der Diskretisierung abhängig, da dieser als Eingabeparameter vorzugeben ist⁵⁸.

Stellt man die numerisch ermittelten Kurvenverläufe der auftreffenden Strahlungsdichte den experimentell generierten Daten gegenüber, lässt sich erkennen, dass die Simulationen mit den Diskretisierungen von 2,5 cm und 5 cm mit beiden parallelen Berechnungsmodi die Ergebnisse der Hauptversuche in geeigneter Form wiedergeben. Lediglich die Simulation mit der Zellkantenlänge von 10 cm liefert Resultate, die die Experimentaldaten übersteigen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das in FDS numerisch umgesetzte Brandmodell die Ergebnisse der Hauptversuche für die auftreffende Strahlungsdichte in den drei Brandstadien Entwicklungs-, Vollbrand- und Abklingphase repräsentativ darstellt, insofern es sich um eine entsprechend feine geometrische Diskretisierung handelt. Somit kann, stellvertretend durch den Simulationsparameter »Strahlungsdichte«, bestätigt werden, dass FDS in der Lage ist, die energetischen Emissionen eines typischen Gepäckstückbrandes über das in Abschnitt 6.2 entwickelte Brandmodell angemessen abzubilden.

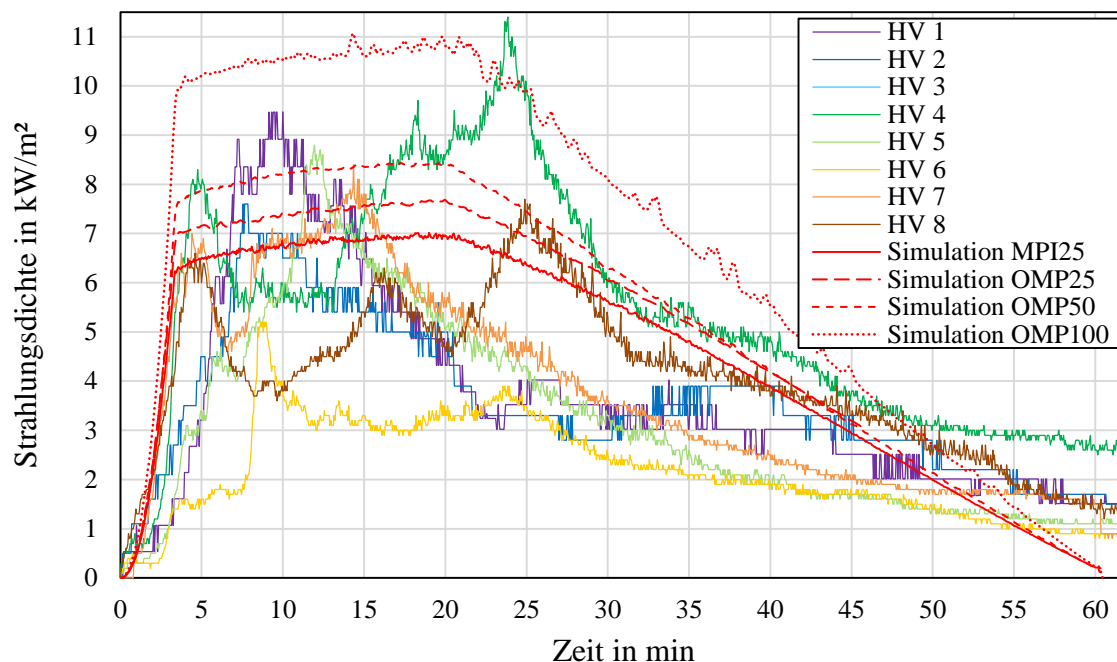


Abbildung 7.7: Strahlungsdichten der Hauptversuche und der Simulationen

⁵⁷ vgl. Abschnitt 7.1.3

⁵⁸ vgl. Abschnitt 7.2.8

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

7.3.4 Toxische Rauchgaskomponenten

Im Vorfeld der Gegenüberstellung von experimentell ermittelten und numerisch generierten Gaskonzentrationen illustriert das folgende Schema, in welcher Form die Experimentaldaten erfasst, verarbeitet, in der Simulation umgesetzt und anschließend miteinander verglichen werden. Konkret visualisiert Abbildung 7.8 die Aufnahme der Experimentaldaten als Absorptionsspektren sowie deren Transfer in Volumenanteile im Brandrauch⁵⁹ und die sich anschließende Ermittlung korrespondierender Freisetzungsraten⁶⁰. Daraufhin erfolgt die Implementierung der Gasfreisetzung in die Simulationsumgebung, basierend auf dem vorhandenen Verbrennungsmodell⁶¹. Während des Simulationslaufes wird das Strömungsfeld numerisch gelöst⁶² und die resultierenden Volumenanteile der Gaskomponente am Messpunkt berechnet⁶³.

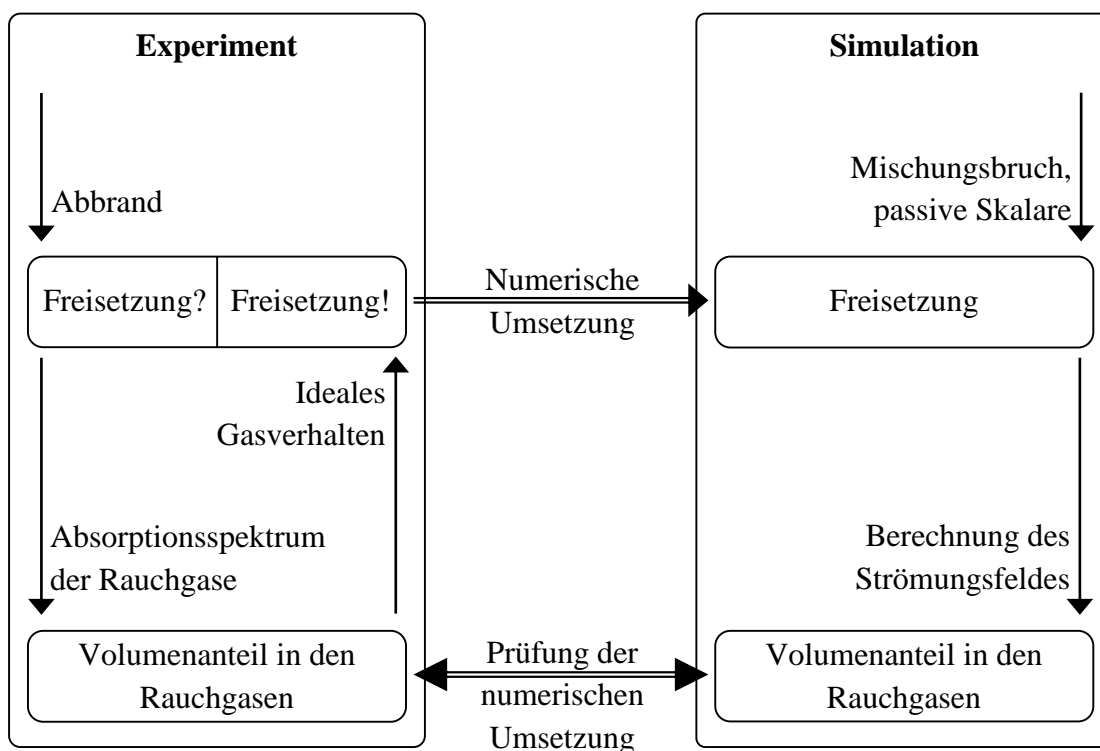


Abbildung 7.8: Ermittlung von Experimentaldaten und numerische Umsetzung

⁵⁹ vgl. Abschnitt 5.2.6

⁶⁰ vgl. Abschnitt 6.2.6

⁶¹ vgl. Abschnitt 7.2.5

⁶² vgl. Abschnitt 7.1.2

⁶³ vgl. Abschnitt 7.2.7

Die Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Daten zu den numerisch berechneten Werten erfolgt stellvertretend für alle gasförmigen Emissionen anhand der Rauchgaskomponente Kohlendioxid. In Abbildung 6.7 sind die Verläufe der CO_2 -Konzentrationen dargestellt, wie sie in den Hauptversuchen gemessen wurden und wie sie FDS für die einzelnen Simulationsvarianten berechnet hat. Unabhängig von dem verwendeten Simulationsmodus und der geometrischen Diskretisierung geben alle Simulationsergebnisse das Profil der implementierten CO_2 -Freisetzung wieder. Dabei liegen die numerisch generierten Werte der einzelnen Simulationsvarianten in der Form eines engen Bandes. Lediglich die CO_2 -Gehalte der Simulation mit 10 cm-Diskretisierung verlaufen geringfügig unterhalb der übrigen Simulationskurven, die sich nahezu deckungsgleich verhalten.

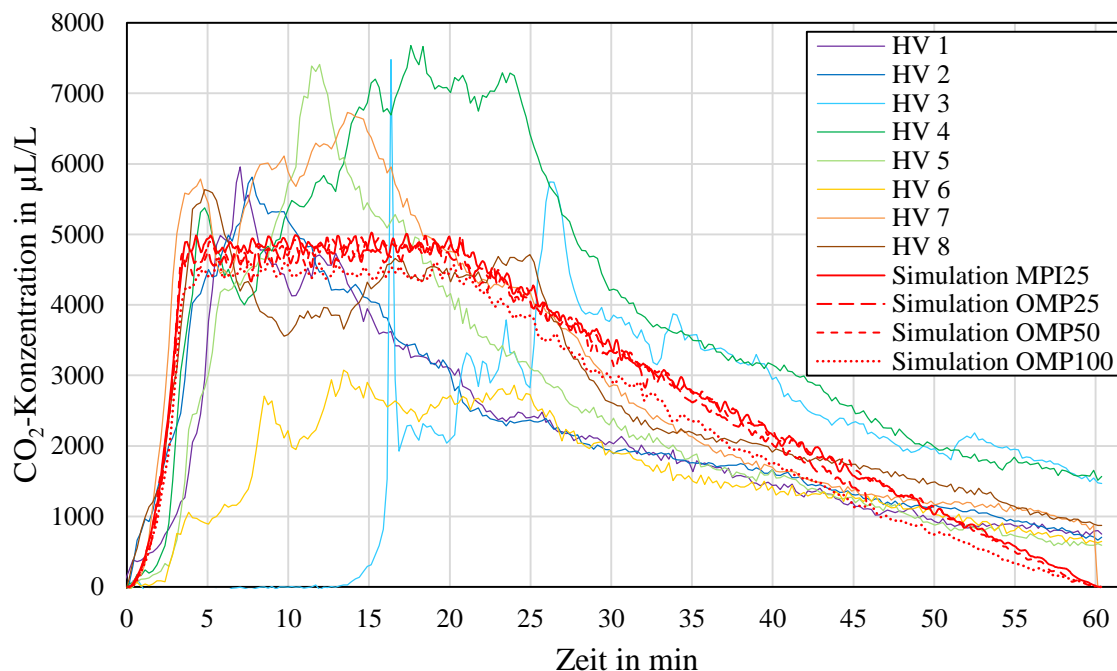


Abbildung 7.9: CO_2 -Konzentrationen der Hauptversuche und der Simulationen

Im Vergleich der Simulationsergebnisse zu den Experimentaldaten fällt auf, dass die Simulationsergebnisse während der Vollbrand- und Abklingphase teilweise geringfügig unterhalb der experimentell ermittelten Werte rangieren. Dieser Aspekt erscheint interessant, wenn man diesen vor dem Hintergrund betrachtet, dass das numerisch implementierte Profil der CO_2 -Freisetzung die abgeleiteten Freisetzungsraten der Hauptversuche nahezu vollständig abdeckt (vgl. Abbildung 6.7). Führt man sich allerdings den bereits anhand Abbildung 7.8 erläuterten Prozess von der experimentellen Erfassung der zu untersuchenden Brandkenngröße über die numerische Umsetzung bis hin zu den Simulationsergebnissen vor Augen, wird

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

deutlich, dass jedem einzelnen Schritt auch Annahmen bzw. vereinfachte Rechenmodelle zugrunde liegen und daher gewisse Abweichungen erwartungsgemäß sind. Dementsprechend liegt der Fokus der Untersuchungen in diesem Kapitel insbesondere darauf, die Eignung der Simulationsumgebung zur Abbildung des entwickelten Brandmodells für ein Gepäckstück zu beurteilen.

Die Auswertung der einzelnen Simulationsvarianten sowie deren Gegenüberstellung zu den Ergebnissen der Experimente ergibt, dass weder der gewählte parallele Berechnungsmodus noch die geometrische Diskretisierung im untersuchten Bereich zwischen den Zellkantenlängen von 2,5 cm und 10 cm die Simulationsergebnisse nennenswert beeinflussen. Obwohl sich die in den Simulationen berechneten Werte in der Vollbrand- und Abklingphase teilweise leicht unterhalb der experimentell ermittelten Daten befinden, gibt die Simulation die gasförmigen Emissionen des modellierten Gepäckstückbrandes angemessen wieder.

7.3.5 Rauchgastransmission

Um die Eignung des Brandmodells hinsichtlich der Wiedergabe der optischen Braundraucheigenschaften zu prüfen, wurde der Parameter Transmission gewählt, der sich sowohl in den Versuchen als auch im Simulationsmodell quantifizieren lässt. FDS sieht im verwendeten Verbrennungsmodell vor, die freizusetzenden Rauchpartikel über einen konstanten Entstehungsanteil relativ zur Massenverlustrate des Brennstoffes vorzugeben⁶⁴. Dieser wurde zu 0,03 gewählt, um einen weiten Bereich der in den Experimenten ermittelten Rauchpartikel-Entstehungsanteile abzudecken⁶⁵.

Die in der Simulation berechneten Transmissionswerte, die in direkter Abhängigkeit zur Rauchpartikelkonzentration stehen⁶⁶, spiegeln den Verlauf der Wärmefreisetzung wider. Aufgrund des konstanten Rauchpartikel-Entstehungsanteils und der vorgegebenen Funktion der Wärmefreisetzung bei konstantem Heizwert ist dieser Kurvenverlauf erwartungsgemäß. Allerdings umhüllen die simulierten Werte die experimentell ermittelten Werte nur zu einem gewissen Teil. Dieser Zustand ist auf den Zwang der Vorgabe eines konstanten Rauchpartikel-Entstehungsanteils in FDS zurückzuführen. Somit lässt sich beispielsweise die Brandentwicklungsphase, in der teilweise höhere Rauchpartikel-Entstehungsanteile in den Experimenten ermittelt wurden, nicht ohne Weiteres im Simulationsmodell abbilden. Grundsätzlich

64 vgl. Abschnitt 7.1.4.3

65 vgl. Abschnitt 6.2.7

66 vgl. Abschnitt 5.2.7

lässt sich jedoch festhalten, dass das Simulationsmodell die experimentell ermittelten Transmissionswerte für die folgenden Untersuchungen in geeigneter Weise widerspiegelt.

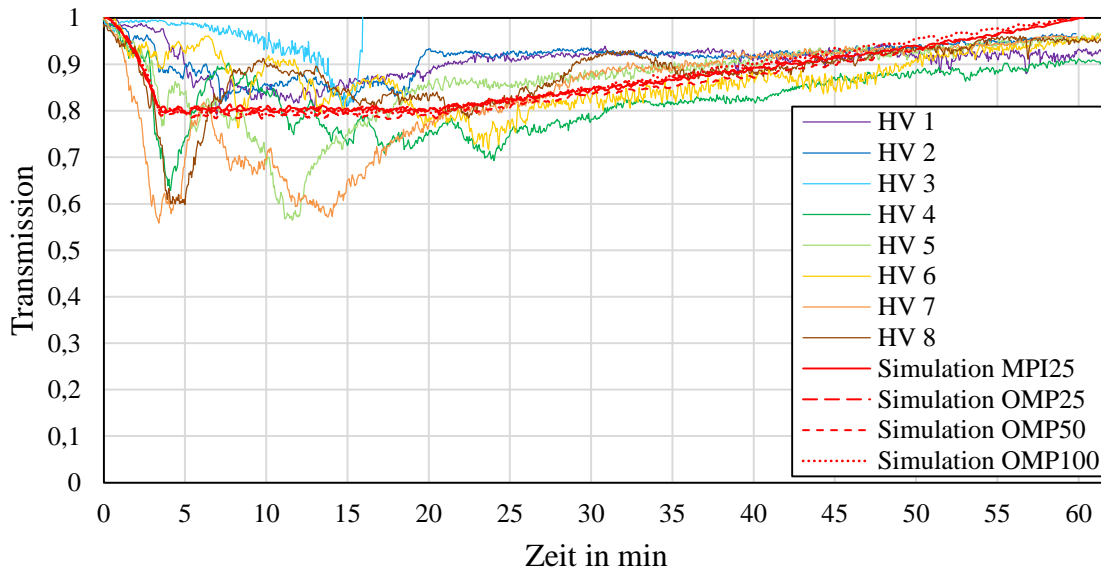


Abbildung 7.10: Transmissionen der Hauptversuche und der Simulationen

7.3.6 Zusammenfassende Beurteilung

Das in den Abschnitten 6.2.3 bis 6.2.7 entwickelte Brandmodell zur Wiedergabe der energetischen und materiellen Brandemissionen eines typischen Gepäckstückes lässt sich in der Simulationsumgebung FDS umsetzen. Anhand ausgewählter energetischer und stofflicher Mess- bzw. Ausgabegrößen kann gezeigt werden, dass die untersuchten parallelen Berechnungsmodi, wenn überhaupt, lediglich untergeordnete Auswirkungen auf die erzeugten Simulationsergebnisse haben. Dem gegenüber ist die zugrunde liegende geometrische Diskretisierung des zu berechnenden Simulationsraumes ein Aspekt, den es entsprechend zu berücksichtigen gilt, da sich das abzubildende Strömungsfeld bei größeren gewählten Zellkantenlängen aus zunehmend weniger Subvolumina zusammensetzt und die Simulationsergebnisse demzufolge mit entsprechenden Ungenauigkeiten behaftet sein können. Das gilt auch für die Berechnung des Strahlungstransportes, die auf demselben geometrischen Gitter basiert wie der hydrodynamische Raum.

Grundsätzlich lässt sich also feststellen, dass sich das experimentell abgeleitete Modell der energetischen und materiellen Brandemissionen eines Gepäckstückes angemessen mit dem Fire Dynamics Simulator umsetzen lässt. Ferner kann bestätigt werden, dass FDS die relevanten Ausgabeparameter des implementierten

Kapitel 7 – Numerische Untersuchungen – Experimentalkonfiguration

Gepäckstück-Brandmodells bei ausreichend feiner Diskretisierung in geeigneter Weise abbildet und daher das in FDS numerisch umgesetzte Brandmodell im folgenden Kapitel als Zündinitial für ein generisches Schienenfahrzeug verwendet werden kann.

Kapitel 8

Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Aufbauend auf den Grundlagenanalysen in den Kapiteln 2 bis 4 wurde anhand der experimentellen Untersuchungen der Kapitel 5 und 6 ein Modell hergeleitet, das die energetischen und stofflichen Emissionen eines typischen Gepäckstückbrandes wiedergibt. In Kapitel 7 konnte mit der numerischen Umsetzung des entwickelten Gepäckstück-Brandmodells gezeigt werden, dass das Simulationsprogramm Fire Dynamics Simulator (FDS) in der Lage ist, einen Gepäckstückbrand in geeigneter Weise abzubilden.

Um nun die Frage nach dem Effekt eines Gepäckbrandes auf die Personensicherheit und die Brandausbreitung zu beantworten¹, wird das numerisch umgesetzte Gepäckstück-Brandmodell als Initialbrand in ein virtuelles Schienenfahrzeug implementiert. Daraufhin erfolgen in Simulationsläufen² Variationen des Standorts des Initialbrandes, der Ventilationsbedingungen, des verwendeten Pyrolysemodells nebst der entsprechenden brandtechnologischen Materialkennwerte, der geometrischen Diskretisierung sowie des Berechnungsmodus. Die erzeugten Simulationsergebnisse werden anhand weiterer Szenariovarianten hinsichtlich der Sensitivität charakteristischer Parameter detailliert untersucht.

8.1 Modellierung des Schienenfahrzeuges

8.1.1 Besonderheiten von Schienenfahrzeugen bei Brandsimulationen

FDS³ wurde ursprünglich zur Modellierung von Bränden in baulichen Anlagen entwickelt [114] und wird auch heutzutage in der Mehrzahl der Fälle für Brandsimulationen in Wohn-, Geschäfts- und Veranstaltungsräumen sowie in Industrieanlagen eingesetzt. Ausgehend davon sind einige Besonderheiten zu berücksichtigen, wenn FDS zur Untersuchung von Brandereignissen in Verkehrsmitteln und im Speziellen in Schienenfahrzeugen zur Anwendung kommt. Die nachfolgend aufgeführten

1 vgl. Abschnitt 1.3

2 vgl. Abschnitt 8.1.13

3 vgl. Abschnitt 7.1

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Aspekte thematisieren charakteristische Merkmale, in denen sich Schienenfahrzeuge von baulichen Anlagen maßgeblich unterscheiden [31, 34].

Interaktionen mit der Umgebung

Der grundlegende Unterschied zwischen einem Gebäude und einem Schienenfahrzeug ist, dass das Letztgenannte ortsveränderlich ist. Aus dem Fahrbetrieb resultieren Druckprofile, wie sie allerdings in zumindest ähnlicher Form auch bei der Um- und Überströmung von baulichen Anlagen auftreten. Wird angestrebt, diese Umstände in Form von Randbedingungen bei der numerischen Untersuchung eines fahrenden Fahrzeuges zu berücksichtigen, sind aufgrund der vergleichsweise hohen Strömungsgeschwindigkeiten signifikant längere Rechenzeiten zu erwarten⁴. Infolgedessen stellt sich die grundsätzliche Frage, inwiefern das Profil der Luftgeschwindigkeit außerhalb des Fahrzeuges einen Brand innerhalb des Fahrzeuges beeinflusst. Speziell vor dem Hintergrund, dass der Innenraum moderner Schienenfahrzeuge als ein vollständig in sich abgeschlossenes Luftvolumen anzunehmen ist und oftmals keine zu öffnenden Fenster⁵ vorhanden sind [51], ist zu erwägen, ob die numerische Umsetzung externer (Fahrt-) Windprofile oder unterschiedlicher Außentemperaturen zielführend im Sinne der Aufgabenstellung ist.

Geometrie

Im Vergleich zu Gebäuden weisen Schienenfahrzeuge weniger rechtwinklige Formen, dafür oftmals eine höhere Anzahl von Einbauten in einem begrenzten Rauminvolumen auf. Beides führt zu höherem Aufwand hinsichtlich der geometrischen Umsetzung und zu Ungenauigkeiten des verfügbaren Luftvolumens bei Simulationsanwendungen, die das hydrodynamische Feld anhand eines orthogonal strukturierten Gitternetzes abbilden⁶.

Brandverhalten der Materialien

Ein weiterer Aspekt, der Schienenfahrzeuge und bauliche Anlagen unterscheidet, besteht darin, dass Bauteile und Komponenten in Schienenfahrzeugen oft als »thermisch dünn« anzusehen sind, diese sich also bei äußerer Temperatureinwirkung verhältnismäßig schnell aufheizen und daher eine raschere Brandausbreitung zu erwarten ist [49]. Des Weiteren finden sich in Schienenfahrzeugen häufig brennbare Deckenverkleidungen, die maßgeblichen Einfluss auf das Brandverhalten im Inneren eines Schienenfahrzeuges nehmen können⁷.

⁴ Die Zeitschrittlänge zur Berechnung des hydrodynamischen Feldes (vgl. Abschnitt 7.1.2) steht in direkter Abhängigkeit zur Stömungsgeschwindigkeit [114].

⁵ vgl. Abschnitt 8.1.6 zur thermischen Integrität von Fenstern

⁶ vgl. Abschnitt 7.1.2

⁷ vgl. Abschnitt 8.4.4

8.1.2 Wahl des Brandszenarios

Ein brennendes Gepäckstück innerhalb des Fahrgastbereiches repräsentiert ein typisches Szenario zur Beurteilung der Brandsicherheit von Schienenfahrzeugen⁸. Hinsichtlich der zu wählenden Bauart des Fahrzeuges lässt sich auf die Ergebnisse des Forschungsprojektes TRANSFEU⁹ zurückgreifen: Im Projektverlauf erfolgten experimentelle sowie numerische Brandanalysen in verschiedenen Skalen, darunter auch im Originalmaßstab an realen Fahrzeugen unterschiedlicher Bauart. Dabei zeigten sowohl die Realbrandversuche als auch die Brandsimulationen, dass sich die Verteilung des Brandrauches innerhalb eines Doppelstockwagens im Vergleich zu einem einstöckigen Standardwagen kritischer darstellt [35, 204]. Demzufolge wird für diese Untersuchung die Geometrie des bereits in TRANSFEU genutzten Doppelstockwagens verwendet, dessen Kenndaten in Tabelle 8.1 zusammengefasst sind.

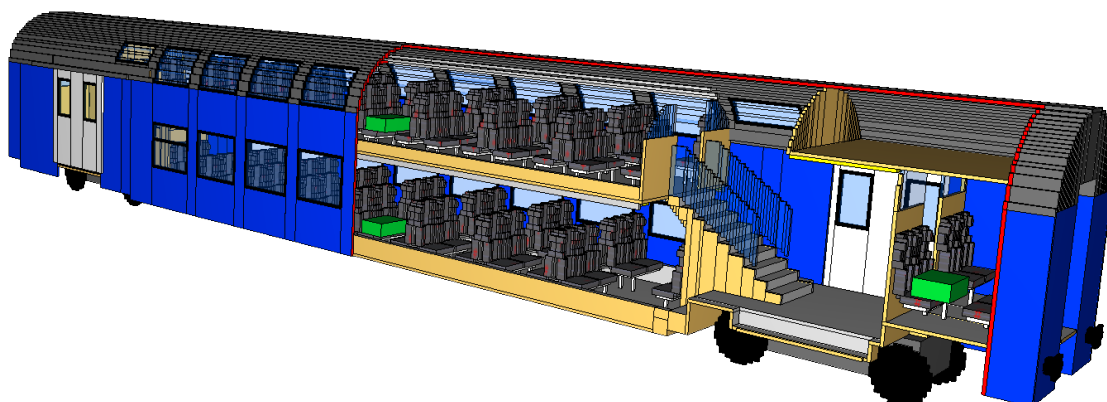


Abbildung 8.1: Geometrie des verwendeten Doppelstockwagens¹⁰

⁸ vgl. Abschnitte 2.2.2 und 3.2.3

⁹ vgl. Abschnitt 2.1.5

¹⁰ Die Abbildung zeigt bereits die drei untersuchten Positionen des Zündinitials

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Tabelle 8.1: Kenndaten des verwendeten Doppelstockwagens [35]

Länge über Puffer	24,30 m
Breite	2,85 m
Höhe	4,30 m
Durchgangshöhe oberes Deck	1,90 m
Durchgangshöhe unteres Deck	1,90 m
Zugang	Doppeltüren beidseitig an den Wagenenden
Sitzplätze	132
Stehplätze ¹¹	128
Gesamtkapazität	260 Personen

Gemäß Tabelle 2.2 werden für das Fahrzeug operative Bedingungen der Betriebsklasse 3 nach EN 45545 angenommen¹², da dieser Klasse die maximale Fahrzeit im Brandfall von 15 min zugeordnet ist. Die korrespondierende Aufenthaltsdauer der Passagiere innerhalb des Wagens ergibt sich dementsprechend ebenfalls zu 15 min.

Grundsätzlich wird bei Schienenfahrzeugen mit den genannten Operationsbedingungen, zumindest theoretisch¹³, der Ansatz verfolgt, anwesende Personen zunächst aus dem vom Brand betroffenen Wagen in die benachbarten Wagen zu evakuieren [8, 49, 53, 54, 122]. Diese befänden sich damit zeitweise an einem Ort relativer Sicherheit, insofern das Personal die in dieser Betriebsklasse vorhandenen Brandabschlüsse¹⁴ zum betroffenen Wagen manuell schließt [83].

Berücksichtigt man allerdings einerseits die Auslastung von Personenzügen zu Stoßzeiten und andererseits die kurzfristig erforderliche Verfügbarkeit sowie zielorientierte Handlungsweise des Personals, kann dieser Ansatz unter Umständen keine umfassende und jederzeit praktikable Evakuierungsstrategie darstellen. Insbesondere wenn eine Endwagen-Konfiguration betroffen ist, es brennt also im ersten bzw. letzten Wagen eines Triebzuges, erweist sich die temporäre Verbringung

¹¹ basierend auf einer nutzbaren Standfläche von ca. 35 m² und einer angenommenen Dichte von vier Personen pro m²

¹² vgl. Abschnitt 2.2.2

¹³ Im Vereinigten Königreich ist für Neufahrzeuge durch Versuche nachzuweisen, dass die Evakuierung eines voll besetzten Wagens in die benachbarten Wagen innerhalb von 90 s durchführbar ist. Für eine Endwagenkonfiguration muss als Mindestanforderung eine Rate von 40 Personen pro Minute erreicht werden. [119]

¹⁴ vgl. Abschnitt 2.2.2

anwesender Personen an einen Ort relativer Sicherheit als problematisch, da die Evakuierung in benachbarte Wagen nur zu einem Wagenende hin möglich ist [161]. Demzufolge ist anzunehmen, dass die Passagiere sich bei einem Brand zumindest teilweise während der Weiterfahrt zu einem geeigneten Haltepunkt bis zur anschließenden Evakuierung durch die Seitentüren im betroffenen Wagen verbleiben und daher den Brandauswirkungen gegenüber exponiert sind.

8.1.3 Geometrische Diskretisierung

Die Umsetzung der Schienenfahrzeuggeometrie in FDS erfolgt aus praktischen Gründen¹⁵ mit nur einem Berechnungsgitter. Eine ausführliche Darstellung der grundsätzlichen Überlegungen zur Wahl einer Netzaufteilung für die numerische Berechnung eines Strömungsfeldes findet sich bereits in Abschnitt 7.2.2. Bei den in Kapitel 7 durchgeführten Brandsimulationen wird auch die Sensitivität der geometrischen Diskretisierung für Zellkantenlängen zwischen 2,5 cm und 10 cm untersucht.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Gitterfeinheit im gewählten Spektrum die stofflichen Freisetzungen des Gepäckstückbrandes nicht signifikant beeinflusst. Das kann für die Rauchpartikel anhand der Messgröße Transmission und für die toxischen Leitgase anhand der Mengenteile im Rauchabzug nachgewiesen werden¹⁶. Bei den energetischen Emissionen tendiert eine gröbere Diskretisierung zu lokalen Ungenauigkeiten für den Strahlungstransport, wie die Auswertungen zum Parameter Strahlungsdichte veranschaulichen¹⁷, jedoch nicht zu Unterschieden in der globalen Energiebilanz.

Für die vorliegende Geometrie des doppelstöckigen Schienenfahrzeuges werden Zellkantenlängen von 10 cm in den horizontalen Raumrichtungen und 5 cm für die Höhenkoordinate gewählt. Die feinere Diskretisierung der Vertikale begründet sich durch das begrenzte Raumvolumen des Fahrzeuges und die Intention, die Schichtung der Rauchgase in geeigneter Form abbilden zu können. Somit ergibt sich eine Gesamtzellenanzahl von 720.000 Zellen. Für Sensitivitätsanalysen werden zusätzlich einzelne Szenarien¹⁸ mit einer uniformen Diskretisierung von 5 cm erstellt, was bei diesen Varianten zu einer Zellenanzahl von 2.880.000 Zellen führt. Vor dem Hintergrund einer Erhöhung des Berechnungsaufwandes proportional zum Faktor

¹⁵ vgl. Abschnitt 8.1.13

¹⁶ vgl. Abschnitte 7.3.4 und 7.3.5

¹⁷ vgl. Abschnitt 7.3.3

¹⁸ vgl. Abschnitt 8.1.13

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

16 bei einer Halbierung der Zellkantenlänge¹⁹, lassen sich feinere Diskretisierungen mit den verfügbaren Rechenkapazitäten²⁰ nicht realisieren.

8.1.4 Brennbare Komponenten

Aufgrund der in Abschnitt 8.1.2 risikoorientiert definierten Bauart- und Betriebsklasse des betrachteten Fahrzeugs, ergibt sich aus Tabelle 2.3²¹ die Gefährdungsstufe HL2 nach EN 45545. Das Brandverhalten der zu verwendenden Fahrzeugkomponenten bzw. -materialien muss demzufolge den prüftechnischen Anforderungen entsprechen, die dieser Gefährdungsstufe zugeordnet sind. Hinsichtlich einer Ausbreitung des Gepäckstück-Initialbrandes²² ist, abhängig von dessen Aufstellort, die Entzündung eines oder mehrerer Fahrgastsitze bzw. der Wand- und Deckenverkleidung als realistisch anzunehmen [35]. Zur Modellierung der pyrolytischen Mechanismen dieser Komponenten in FDS lassen sich bevorzugt brandtechnologische Parameter verwenden, die im Rahmen des TRANSFEU-Projekts²³ generiert wurden. Der Vorteil besteht darin, dass die dort experimentell ermittelten Daten anhand eines mehrskaligen Ansatzes bereits numerisch validiert werden konnten [204].

Im TRANSFEU-Projekt wurden drei verschiedene Ansätze beschrieben, um die pyrolytischen Reaktionen eines Materials darzustellen [35]:

- Methode »1«: Vorgabe des Quellterms²⁴,
- Methode »2«: Vorgabe des Quellterms bei Erreichen der Zündtemperatur²⁵,
- Methode »3«: Berechnung der Pyrolyse anhand kinetischer Parameter, basierend auf thermogravimetrischer Analyse und der Anwendung eines generischen Algorithmus²⁶[49].

Für die vorliegende Untersuchung werden in verschiedenen Simulationsvarianten die Pyrolyseansätze der Methoden »2« und »3« genutzt, um die Ergebnisse der beiden Pyrolysemodelle miteinander vergleichen zu können. Die Methode »1« wird nicht weiter betrachtet, da diese als Vorstufe zur Methode »2« zu sehen ist. Zusätzlich kommt eine Methode 0 hinzu, die kein hinterlegtes Pyrolysemodell beinhaltet

¹⁹ vgl. Abschnitt 7.2.2

²⁰ vgl. Abschnitt 7.2.8

²¹ vgl. Abschnitt 2.2.2

²² vgl. Abschnitt 8.1.10

²³ vgl. Abschnitt 2.1.5

²⁴ vgl. Abschnitt 7.1.4.1

²⁵ vgl. Abschnitt 7.1.4.1

²⁶ vgl. Abschnitt 7.1.4.2

und dementsprechend in den betreffenden Simulationsvarianten keine Brandausbreitung vom Initialbrand auf die vorhandenen Fahrzeugkomponenten möglich ist. Die Verwendung der Methode 0 verfolgt das Ziel, die Auswirkungen eines brennenden Gepäckstückes, unabhängig von weiteren mitbrennenden Gegenständen, zu analysieren.

8.1.4.1 Fahrgastsitze

Zur Modellierung des Brandverhaltens erweist sich der Sitz F1A-1-2 aus dem TRANSFEU-Projekt als geeignet. Dieser entspricht einerseits den Prüfanforderungen der Gefährdungsstufe HL2 und andererseits sind die Pyrolyseparameter für die Methoden »2« und »3« vorhanden und wurden im Rahmen von TRANSFEU sowie in der Forschungsarbeit von Camillo [49] numerisch validiert.

Struktureller Aufbau

Die gepolsterten Teile des Sitzes bestehen aus einem Bezug²⁷, einem Schnittschutz²⁸, einem Interliner²⁹ und dem Schaumpolster aus Polyurethan- und Melamin-Weichschaum. Die Sitzschale ist aus Polycarbonat hergestellt. Die folgenden Komponenten werden in der entsprechenden Materialschichtung modelliert [49]:

- Kopfstütze: Bezug (4 mm), auf Polycarbonat (35 mm) geklebt;
- Rückenlehne: Bezug (4 mm), Schnittschutz (1,5 mm), fiktive Schicht (3 mm), Polsterung (38 mm);
- Sitzpolster: Bezug (4 mm), Schnittschutz (1,5 mm), Interliner (3 mm), fiktive Schicht (3 mm), Polsterung (38 mm);
- Sitzschale: Polycarbonat (3,5 mm).

Dabei dient die fiktive Schicht, die bei dem Sitzpolster und der Rückenlehne der Polsterung vorgelagert ist, der Reproduktion der Zersetzungsreaktionen des Schaumes für die Pyrolysemethode »3«. Sie symbolisiert eine nicht am Verbrennungsprozess beteiligte Gasansammlung, die als thermische Barriere zwischen der exponierten, verkohlenden Schaumschicht und dem verbleibenden, noch unverbranntem Schaum, wirkt. Des Weiteren ist für diesen fiktiven Schaum eine Pyrolyse-Reaktion hinterlegt, die den Zersetzungsprozess vom festen zum gasförmigen Aggregatzustand abbildet³⁰. [49]

²⁷ 70 % Wolle, 10 % Viskose, 20 % Aramidpolymere

²⁸ Widerstandsfähiges Gewebe gegen Vandalismus

²⁹ Zwischenschicht aus Aramidpolymeren

³⁰ Hier definiert über eine Referenztemperatur von 400 °C, eine nominelle Aufheizrate von 5 K/min und einen pyrolytisch reaktiven Temperaturbereich von 80 °C, vgl. Abschnitt 7.1.4.2.

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Pyrolytische Parameter für die Methode »2«

Materialproben des betrachteten Sitzes wurden im Cone Kalorimeter [149] untersucht. Abbildung 8.2 zeigt die bei einer Bestrahlungsstärke von 25 kW/m^2 resultierende spezifische Wärmefreisetzung einer Probe des Sitzpolsters. Das vorliegende Profil der spezifischen Wärmefreisetzungslrate lässt sich in approximierter Form für die Sitzfläche und die Rückenlehne in die Simulation integrieren [36]. Die Wärmefreisetzung beginnt für jedes diskrete Element, wenn die Oberfläche eine Zündtemperatur von 380 °C [52] erreicht. Dabei entfällt in der Simulation die Zeitspanne zwischen Versuchsbeginn und Zündung der Probe, da der Startpunkt der Wärmefreisetzung durch das Erreichen der Zündtemperatur definiert ist.

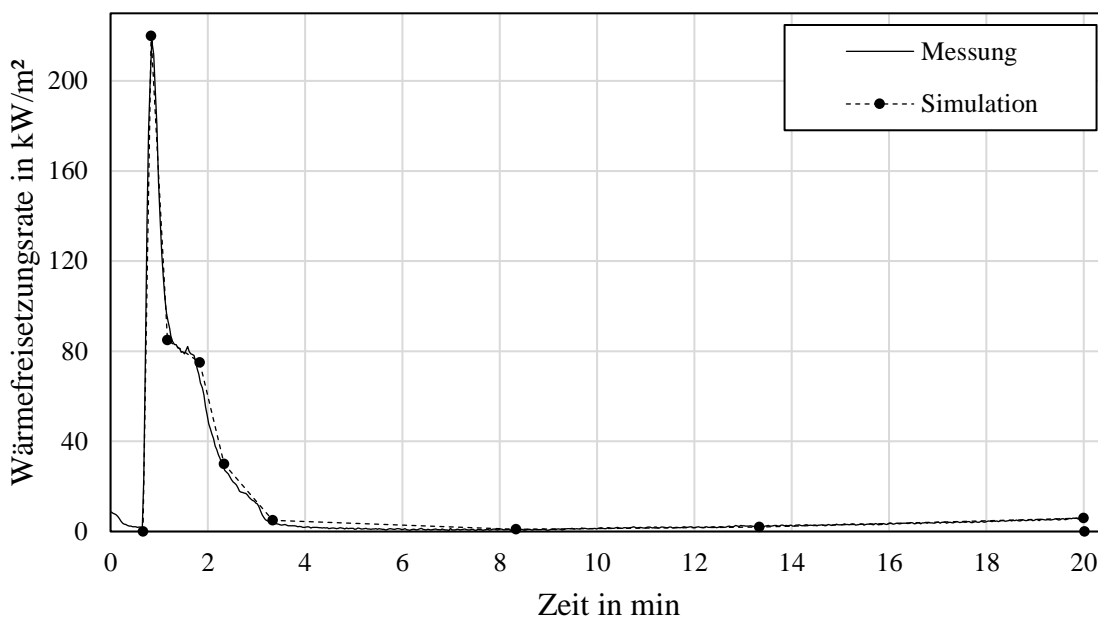


Abbildung 8.2: Sitz F1A-1-2: Wärmefreisetzung bei einer Bestrahlung von 25 kW/m^2 [36] und Nachbildung für Simulation

Reaktionspfade und pyrolytische Parameter für Methode »3«

Die folgende Tabelle visualisiert die in FDS implementierten Reaktionspfade der einzelnen Sitzmaterialien und deren Zwischenformen sowie die jeweils reagierenden Masseanteile:

Tabelle 8.2: Reaktionspfade der Sitzmaterialien [49]

Produkt	Material	→ Zwischenform	→ Verkohlungs- zustand	→ Rest
Bezug	Textil (0,30)		→ Kohle _{Textil} (0,65)	→ Rest _{Textil}
Interliner	α -Polymer (0,13)	→ β -Polymer (0,31)	→ Kohle _{Polymer} (0,10)	→ Rest _{Polymer}
Polsterung	Schaum (0,77)		→ Kohle _{Schaum} (0,72)	→ Rest _{Schaum}

Die Reaktionsparameter der jeweiligen Materialien und Zwischenformen sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8.3: Reaktionsparameter der Sitzmaterialien [49]

Material	Heizwert ³¹	Arrheniusparameter			Reakt.-wärme ³²
	$\Delta h_{c,eff}$ in kJ · kg ⁻¹	A in s ⁻¹	E in kJ · kmol ⁻¹	n –	h_r in kJ · kg ⁻¹
Textil	1,22E4	1,59E12	1,91261E5	1,51	250
Kohle _{Textil}	2,20E4	2,76E10	2,01605E5	1,82	250
α -Polymer	2,00E4	1,301E12	1,981E5	0,597	500
β -Polymer	2,00E4	366,0	7,758E4	1,94	500
Kohle _{Polymer}	2,00E4	4,26E16	3,03249E5	1,0	500
Fikt. Schicht	0,01 (pro forma)			-	750
Schaum	3,00E4	2,53E9	1,27912E5	1,47	150
Kohle _{Schaum}	2,80E4	9,28E14	2,54378E5	2,4	150

³¹ Der Heizwert ist in FDS als freigesetzte Energie pro Masseneinheit Brenngas, die sich mit Sauerstoff vermischt und verbrennt, definiert. Formal wäre somit der Ausdruck »effektive Verbrennungswärme« korrekt (vgl. Abschnitte 6.2.4 und 7.1.4) [117].

³² Bei der Pyrolyse handelt es sich zunächst um eine endotherme Zersetzung, die Reaktionswärme ist also in den Prozess einzubringen [117].

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Thermophysikalische Materialdaten

Die zur Modellierung der Wärmeübertragung erforderlichen thermophysikalischen Materialdaten listet die folgende Tabelle auf:

Tabelle 8.4: Thermophysikalische Daten der Sitzmaterialien [49]

Stoff	Massen- dichte	Spez. Wärme- kapazität	Wärmeleit- fähigkeit	Emissivität
	ρ	c	λ	ϵ
	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	–
Textil	239	0,9	0,15	0,9
Kohle _{Textil}	400	1,2	0,1	0,9
Rest _{Textil}	200	1,2	0,1	0,95
Schnittschutz	4788	1,25-0,44 $f(T)$	0,53-17,0 $f(T)$	0,9
α -Polymer	67	1,2	0,3	0,9
β -Polymer	400	1,4	0,2	0,9
Kohle _{Polymer}	400	1,5	0,2	0,9
Rest _{Polymer}	400	1,6	0,2	0,9
Fiktive Schicht	76	1,2	0,03	0,9
Schaum	76	1,4	0,4	0,9
Kohle _{Schaum}	400	1,3	0,4	0,9
Rest _{Schaum}	100	1,7	0,23	0,9
Polycarbonat	1200	1,23	0,23	0,9

8.1.4.2 Wandverkleidung

Für die Nachbildung der Wandverkleidung in FDS kann ebenfalls auf Eingabedaten aus dem TRANSFEU-Projekt zurückgegriffen werden. Die Wandverkleidung IN1-5 entspricht der Gefährdungsstufe HL2 und wurde zudem durch Camillo [49] numerisch validiert.

Struktureller Aufbau

Die Wandverkleidung ist ein handlaminiertes Kompositprodukt, bestehend aus Glasfasern und Polyester, auch als glasfaserverstärktes Polyester (GFP)³³ bezeichnet. Die darüberliegende Gelcoat-Schutzschicht ist aus Polyester und verschiedenen mineralischen Zusätzen hergestellt. Teilweise sind diese in der Simulation mit Reaktionen hinterlegt, wie die des Flammschutzmittels Aluminiumtrihydrat (ATH). Thermisch inerte Additive, wie Titanoxid als Farbpigment, finden nur hinsichtlich ihrer Wärmetransporteigenschaften Eingang in FDS.

Die folgenden Materialschichten sowie deren prozentuale Zusammensetzungen, begonnen mit der Oberfläche, werden modelliert:

- Gelcoat (0,5 mm): Polyester (30 %), ATH (16 %), Additive (54 %)
- Komposit (4,8 mm): Polyester (46 %), ATH (29 %), Glasfasern (25 %)
- Luftspalt (10 mm): Luft
- Mineralwolle (25 mm): Mineralwolle

Pyrolytische Parameter für die Methode »2«

Auch für diese Komponente wurden Materialproben im Cone Kalorimeter untersucht und die resultierende Wärmefreisetzung der Materialprobe ermittelt. Abbildung 8.3 visualisiert das Profil der spezifischen Wärmefreisetzungsrates bei einer Bestrahlungsstärke von 35 kW/m² sowie dessen Approximation zur Implementierung in FDS³⁴. Im Vergleich zum Kurvenverlauf der Wärmefreisetzung des Sitzes weist die entsprechende Funktion der Wandverkleidung einen Unterschied auf: Das Profil der spezifischen Wärmefreisetzungsrates zeichnet zwei Maxima, das erste zum Zeitpunkt $t = 3$ min und das zweite bei $t = 9$ min, was auf zwei sequentielle Reaktionen hindeutet. Allerdings handelt es sich bei dem zweiten Maximum um die Energiefreisetzung einer brennbaren Isolationsschicht, die auf der Probenrückseite bei diesem Versuch verwendet wurde, hervorgerufen durch eine thermische Rückkoppelung. Somit ist lediglich die erste Reaktion für die Nachbildung in der Brand-

³³ engl. glass reinforced polyester, GRP

³⁴ Daten bei einer Bestrahlungsstärke von 25 kW/m² sind für diese Komponente nicht vorhanden (vgl. Abschnitt 8.1.4.1)

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

simulation relevant und wird, ergänzt durch eine Zündtemperatur von 370 °C, in die Simulation implementiert. [52]

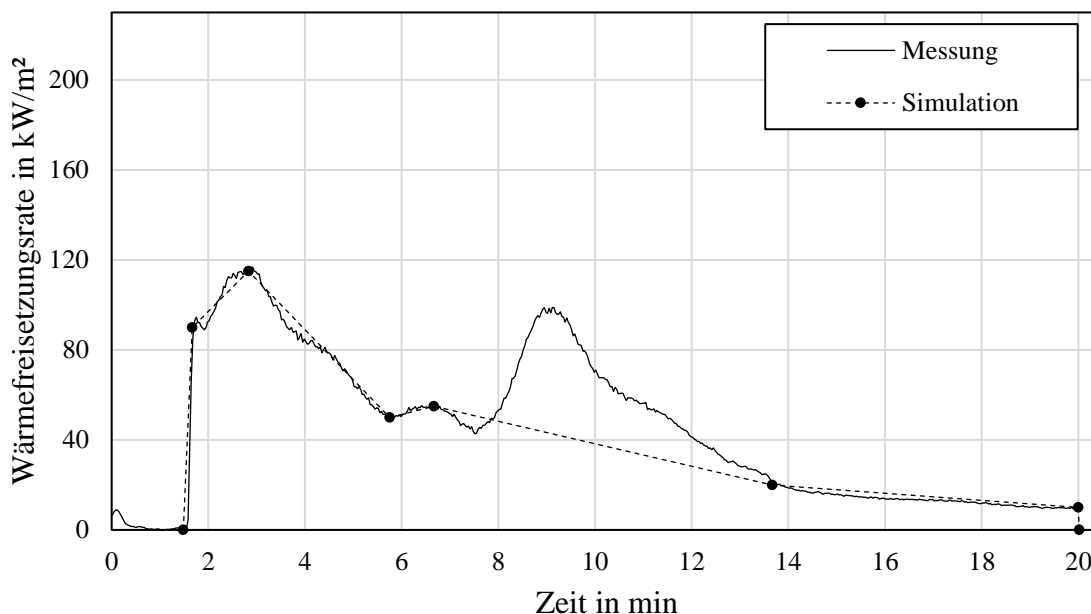


Abbildung 8.3: Wandverkleidung: Wärmefreisetzung bei einer Bestrahlung von 35 kW/m² [36] und Nachbildung für Simulation

Reaktionspfade und pyrolytische Parameter für die Methode »3«

Die folgende Tabelle zeigt die in FDS implementierten Reaktionspfade der einzelnen Materialien und deren Zwischenformen sowie die jeweiligen reagierenden Masseanteile:

Tabelle 8.5: Reaktionspfade der Wandverkleidungsmaterialien [49]

Material	→ Verkohlungszustand	→ Rest
Polyester (0,60)	→ Kohle _{Polyester} (0,35)	→ Rest _{Polyester}
Aluminiumtrihydrat (0,24)		→ Rest _{ATH}

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Die Reaktionsparameter der jeweiligen Materialien und Zwischenformen sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8.6: Reaktionsparameter der Wandverkleidungsmaterialien [49]

Material	Heizwert	Arrheniusparameter			Reaktionswärme
	$\Delta h_{c,eff}$ in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	A in s^{-1}	E in $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$	n –	h_r in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Polyester	9850	6,6E11	1,565E5	2,83	1500
Kohle _{Polyester}	1,9E4	6,36E9	1,765E5	1,06	2500
ATH	0,01	2,046E7	4,88E5	2,88	1000

Thermophysikalische Materialdaten

Die zur Modellierung der Wärmeübertragung erforderlichen thermophysikalischen Materialdaten listet die folgende Tabelle auf:

Tabelle 8.7: Thermophysikalische Daten der Wandverkleidungsmaterialien [49]

Stoff	Massen- dichte	Spez. Wärme- kapazität	Wärmeleit- fähigkeit	Emissivität
	ρ in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	c in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	λ in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	ϵ –
Polyester	1189	1,3	0,16	0,9
Kohle _{Polyester}	800	1,4	0,1	0,9
Rest _{Polyester}	100	1,4	0,1	0,9
ATH	2460	1,9	1,6	0,9
Rest _{ATH}	3970	1,1	10,9	0,9
Additive	1000	1,0	0,01	0,9
Glasfasern	2600	0,9	1,0	0,9
Luft	1,20	1,0	0,026	0,9
Mineralwolle	140	1,03	0,037	0,9

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

8.1.4.3 Deckenverkleidung

Im TRANSFEU-Projekt bestand die Deckenverkleidung des untersuchten Doppelstockwagens aus Hochdruckschichtstoffplatten³⁵. Allerdings sind dafür keine Pyrolyseparameter generiert worden. Somit wird in dieser Untersuchung auf Pyrolyse- daten einer HPL-Deckenverkleidung mit äquivalenter Brandcharakteristik zurück- gegriffen [21] und der in Abschnitt 7.1.4.2 beschriebene Pyrolyseansatz verwendet.

Pyrolytische Reaktionsparameter

Die Reaktionsparameter des verwendeten Deckenmaterials sind in der nachstehen- den Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8.8: Reaktionsparameter der Deckenverkleidung [21]

Material	Dicke	Heizwert	Ref.-temperatur	Reaktionswärme
	d	$\Delta h_{c,\text{eff}}$	T_R	h_r
	in mm	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	in $^{\circ}\text{C}$	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
HPL	4,2	15500	350	3000

Thermophysikalische Materialdaten

Die zur Modellierung der Wärmeübertragung erforderlichen thermophysikalischen Materialdaten listet die folgende Tabelle auf:

Tabelle 8.9: Thermophysikalische Daten der Deckenverkleidung [21]

Material	Massen- dichte	Spez. Wärme- kapazität	Wärmeleit- fähigkeit	Emissivität
	ρ	c	λ	ϵ
	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	–
HPL	550	1,8	0,3	0,9

³⁵ engl. high pressure laminate, HPL

8.1.4.4 Bodenbelag

Der Bodenbelag des im TRANSFEU-Projekt untersuchten Doppelstockwagens besteht aus synthetischem Kautschuk, der auf Sperrholz geklebt ist.

Auch in diesem Fall werden brandtechnologische Kenndaten einer vergleichbaren Bodenkonstruktion herangezogen [21], da im Rahmen von TRANSFEU die erforderlichen Parameter nicht generiert wurden. Auch für dieses Produkt wird auf Pyrolysedaten aus der Datenbank des Lehrstuhls zurückgegriffen, da im Rahmen von TRANSFEU hierfür keine Pyrolysedaten generiert wurden.

Pyrolytische Reaktionsparameter

Die Reaktionsparameter der jeweiligen Materialien und Zwischenformen sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8.10: Reaktionsparameter des Bodenbelags [21]

Material	Dicke d in mm	Heizwert $\Delta h_{c,\text{eff}}$ in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Ref.-temperatur T_R in $^{\circ}\text{C}$	Reaktionswärme h_r in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Kautschuk	2	27000	350	2500
Sperrholz	16	11500	350	3000

Thermophysikalische Materialdaten

Die zur Modellierung der Wärmeübertragung erforderlichen thermophysikalischen Materialdaten listet die folgende Tabelle auf:

Tabelle 8.11: Thermophysikalische Materialdaten des Bodenbelags [21]

Material	Massen- dichte ρ in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Spez. Wärme- kapazität c in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Wärmeleit- fähigkeit λ in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Emissivität ϵ –
Kautschuk	1500	1,2	0,3	0,9
Sperrholz	460	2,5	0,2	0,9

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

8.1.5 Nicht brennbare Komponenten

Die nachfolgende Tabelle enthält die themophysikalischen Daten der nicht brennbaren Komponenten:

Tabelle 8.12: Thermophysikalische Daten nicht brennbarer Komponenten [103]

Material	Massen- dichte	Spez. Wärme- kapazität	Wärmeleit- fähigkeit	Emissivität
	ρ	c	λ	ϵ
	in $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	in $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	in $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	–
Stahl (Wagenkasten)	7850	0,46	45,8	0,95
Glas (Fenster)	2700	0,83	1,0	0,6

8.1.6 Thermisch induzierter Integritätsverlust von Verglasungen

Bei einem Brandereignis innerhalb eines Schienenfahrzeuges ist aufgrund der thermischen Einwirkungen ein Integritätsverlust vorhandener Außenfenster zu erwarten, wie vergangene Brandereignisse und realmaßstäbliche Versuche belegen [125, 173, 210, 228]. Für den Brandverlauf innerhalb des Fahrzeuges kann es entscheidend sein, wann einzelne Glasscheiben versagen, da sich zu diesem Zeitpunkt die Ventilationsbedingungen der stattfindenden Verbrennungsmechanismen und damit auch die vorherrschende Branddynamik signifikant verändern können [18].

Gebäudeverglasungen unter Brandbedingungen

Aus Untersuchungen zur Integrität von Außenfenstern bei Raumbränden geht hervor, dass doppelt bzw. dreifach verglaste Fenster im Allgemeinen eine höhere thermische Widerstandsfähigkeit aufweisen als Einfachverglasungen [18]. Jedoch sind auch bei mehrfach verglasten Fenstern thermisch induzierte Rissbildungen innerhalb weniger Minuten nach Beginn der Exposition zu erwarten [172]. Dementsprechend ist grundsätzlich davon auszugehen, dass Fensterglas bei einer Temperatur von 300 °C nach ca. 5 min bis 10 min versagt [134].

Schienenfahrzeugfenster unter Brandbedingungen

Außenverglasungen von Schienenfahrzeugen unterscheiden sich gemeinhin von Gebäudefenstern in ihren inhärenten Eigenschaften sowie in der Form der Anbindung

an die tragende Struktur. In der Regel verwendet man für Schienenfahrzeuge Fenster aus Einscheiben- oder Verbundsicherheitsglas [125, 206]. Diese werden entweder in einem Gummiprofil eingesetzt oder mit dem Wagenkasten verklebt [30, 203]. Mit elastischen Glas-Karosserieverklebungen, die ab einer Klebschichtdicke von ca. 3 mm auch als Dickschichtverklebung bezeichnet werden, lässt sich im Regelbetrieb ein Ausgleich thermisch induzierter Spannungen zwischen den beteiligten Werkstoffen realisieren [170]. Gebräuchlich sind hier thermoplastische Polymerklebstoffe auf Basis von Polyurethan oder modifizierten Silanen [170]. Demzufolge stellen bei Schienenfahrzeugen sowohl die Scheibenfixierungen mittels Gummiprofil aus brennbaren Elastomeren als auch die Befestigungsform der elastischen Verklebung Systemelemente dar, die gegenüber den thermischen Einwirkungen eines Brandes sensibel reagieren. Im Gegensatz zu Gebäudeverglasungen bestehen also auch in der jeweiligen Fixierung der Fensterscheiben Aspekte, die das Brandverhalten von Schienenfahrzeugen hinsichtlich der Ventilationsbedingungen beeinflussen und die es in der numerischen Nachbildung zu berücksichtigen gilt.

Brandversuche an Schienenfahrzeugen belegen, dass sich der Zeitpunkt des thermischen Integritätsverlustes von Außenverglasungen nur schwer prognostizieren lässt und maßgeblich durch die Art der Verglasung, das thermische Verhalten der fixierenden Elemente sowie die szenariobedingten Mechanismen des Wärmetransfers bestimmt wird. Es ergeben sich Zeitpunkte für ein Fensterversagen, die in einem Bereich zwischen 5 min und 20 min nach Zündung des Initialbrandes rangieren [210, 228]. Grundsätzlich ist jedoch zu erwarten, dass die für einen Integritätsverlust von Schienenfahrzeugfenstern erforderlichen thermischen Konditionen sich erst mit dem Auftreten eines Flashovers bzw. dem Erreichen einer fortentwickelten Brandphase einstellen [62]. Infolgedessen rücken die Überlegungen zum thermisch induzierten Fensterversagen in den Hintergrund, wenn es um die Beurteilung der Erträglichkeit für Personen in Schienenfahrzeugen geht, da diese spätestens mit dem Einsetzen eines Flashover nicht mehr gegeben ist. Dementsprechend ist diese Thematik lediglich für die Untersuchungen hinsichtlich der Brandausbreitung innerhalb des Schienenfahrzeuges von Bedeutung.

Numerische Umsetzung

Eine probate Methode, den thermisch induzierten Integritätsverlust von Außenverglasungen bei Schienenfahrzeugen in Brandsimulationen zu modellieren, besteht in der Kopplung eines Thermosensors mit dem Bauteil »Fenster«, das mit dem Erreichen einer vordefinierten Grenztemperatur die Öffnungsfläche freigibt. Jedoch findet sich in der Literatur ein breites Spektrum dieser Versagenstemperaturen,

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

das von 200 °C bis 675 °C reicht [21, 58, 181, 217]. Wie eingangs erläutert, ist den Ventilationsbedingungen ein nennenswerter Einfluss auf die Wärmefreisetzung in einer fortentwickelten Brandphase zuzuschreiben. Unter der Annahme geschlossener Wagentüren stehen die Ventilationsbedingungen des Brandes in der Simulation in direkter Abhängigkeit zur Versagenstemperatur der Außenfenster. Daher sind in Relation zu der Wahl dieses Parameters signifikante Unterschiede im zeitlichen Verlauf der zu berechnenden Wärmefreisetzung des Fahrzeuges zu erwarten.

Die Referenzen, in denen für das Fensterversagen bei einem Schienenfahrzeug vergleichsweise hohe Temperaturen angenommen werden, orientieren sich an Untersuchungen, die an Gebäuden durchgeführt wurden. Milford nimmt beispielsweise einen Wert von 500 °C an und beruft sich auf eine Versuchsreihe zum Schutz von Gebäudeverglasungen mit Sprinklersystemen [181]. Chiam verwendet für seine Simulationen eine Versagenstemperatur von 675 °C und verweist auf eine Studie von Shields zum Brandverhalten von Doppelverglasungen an einem Gebäude [58]. In der referenzierten Untersuchung ist es allerdings die maximale Gastemperatur im Raum, die mit 675 °C quantifiziert wird, während die Fenster ihre Integrität bereits bei Temperaturen zwischen 320 °C und 385 °C verlieren [207]. Veenker und Bansemer hingegen verwenden Versagenstemperaturen für Fahrzeugaußenfenster von 200 °C respektive 225 °C [21, 217]. Diese Annahmen entsprechen in erster Näherung dem Temperaturbereich, in dem zu erwarten ist, dass die thermoplastische Fensterfixierung ihre Festigkeit verliert [170].

In dieser Untersuchung wird angenommen, dass die Fahrzeugfenster von außen mit einem thermoplastischen Klebstoff auf Polyurethanbasis in den Wagenkasten eingeklebt sind. Der Klebstoff ist mit Additiven ausgerüstet, sodass sich die ursprüngliche Zersetzungstemperatur von Polyurethan von 220 °C auf 250 °C erhöht. Der entsprechende Temperaturnehmender befindet sich in 6 mm Tiefe mittig in der Fensterscheibe. Bei einem angenommenen Brandszenario innerhalb des Fahrzeuges und einer thermisch induzierten Luftschichtung bedeutet das Erreichen der Versagenstemperatur in der Mitte der Scheibe, dass die Fixierung oberhalb des Messpunktes bereits die kritische Temperatur von 250 °C überschritten hat. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass aufgrund des Integritätsverlustes der Scheibenfixierung die vorhandene Druckdifferenz zwischen Fahrzeuginnenraum und Umgebung zu einem Herausfallen der Scheibe führt [21]. Im numerischen Modell wird also nicht der Integritätsverlust der Fensterscheibe selbst, sondern das thermische Versagen der äußeren Fixierung modelliert.

8.1.7 Ventilationskonditionen

Die Ventilationsbedingungen können die Dynamik eines Brandes signifikant beeinflussen³⁶. Generell umfasst die Ventilation zwei Aspekte: zum einen die fahrzeugseitige raumluftechnische Anlage und zum anderen die Öffnungen zur Umgebung, wie Außentüren und geöffnete bzw. durch Brandeinwirkungen beschädigte Fenster³⁷, die einen stofflichen sowie energetischen Austausch zwischen dem Innenraum und der Außenumgebung ermöglichen.

Raumluftechnische Anlage

Die raumluftechnische Anlage des untersuchten Doppelstockwagens besteht aus zwei in Dachaufbauten angeordneten Klimaanlage mit einem Luftdurchsatz von jeweils 3000 m³/h, deren Luftauslässe sich in beiden Decks sowie in den Einstiegsbereichen befinden [197]. In Anlehnung an den ebenfalls in TRANSFEU verwendeten, einstöckigen Standardwagen³⁸ erfolgt die Einbringung des Zuluftvolumenstroms mit einer Temperatur von 20 °C in der Simulation für jedes Deck sowie das vordere und hintere Foyer über zwei parallel angeordnete, langgezogene Luftauslässe im Deckenbereich. Bei einer gewählten Ausströmgeschwindigkeit von 0,15 m/s und einer lichten Öffnungsfläche von insgesamt 11,12 m² ergibt sich für die Simulation der angestrebte Volumenstrom³⁹ von 6004,8 m³/h.

Die nach DIN EN 45545-6 [86] geforderte, automatisierte Abschaltung von Klima- und Lüftungsgeräten für Fahrgast- und Personalbereiche in Fahrzeugen der Betriebsklasse 3 im Falle einer Branddetektion lässt sich in der Simulation wie folgt realisieren: Sobald einer der im Fahrzeug angeordneten Rauchmelder⁴⁰ das Brandereignis detektiert, erfolgt die Abschaltung des Zuluftvolumenstroms mit einer zeitlichen Verzögerung von 10 s, welche den Ansteuerungs- und Abschaltungsprozess abbildet.

Außentüren und -fenster

Aufgrund der Randbedingungen des zu modellierenden Brandszenarios, das die maximale Fahrzeit von 15 min im Brandfall nachempfinden soll⁴¹, bleiben die Außentüren des Doppelstockwagens geschlossen. Zudem wird angenommen, dass keine manuell zu öffnenden Außenfenster vorhanden sind. Um dennoch eine Mög-

36 vgl. Abschnitt 8.1.6

37 vgl. Abschnitt 8.1.6

38 vgl. Abschnitt 8.1.2

39 vgl. Anhang B.2

40 vgl. Abschnitt 8.1.8

41 vgl. Abschnitt 8.1.2

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

lichkeit des Druckausgleiches zwischen dem Fahrzeuginnenraum und der Außenumgebung zu gewährleisten und damit numerischen Instabilitäten vorzubeugen, werden im Bodenbereich der vier Fahrzeugaußentüren schmale Luftauslässe mit einer Öffnungsfläche von jeweils $5 \text{ cm} \cdot 180 \text{ cm} = 900 \text{ cm}^2$ vorgesehen [112].

Öffnung der Verbindungstür zum Vorderwagen

In einigen Simulationen⁴² öffnet sich 60 s nach Brandbeginn die Tür an der Stirnseite des Doppelstockwagens, die in der Realität die Anbindung zum vorausfahrenden Wagen darstellt. Auf diese Weise soll zusätzlich der Einfluss veränderter Ventilationsbedingungen, wie sie beispielsweise bei einer beginnenden Evakuierung in den benachbarten Wagen zu erwarten sind, auf das Brandereignis analysiert werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass sich im Gegensatz zur realen Konfiguration nicht der Vorderwagen an die geöffnete Verbindungstür anschließt, sondern im Simulationsmodell mit der Türöffnung eine Verbindung zur Außenumgebung hergestellt wird. Die so generierten Simulationsergebnisse sind dementsprechend hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die reale Anwendung kritisch zu prüfen.

8.1.8 Branderkennung

Bei dem zugrunde liegenden Brandszenario⁴³ in einem Fahrzeug der Bauartklasse D und der Betriebsklasse 3, das auf dem TEN-Streckennetz⁴⁴ verkehrt, sind die Fahrgast- und Personalbereiche mit einer automatischen Brandmeldeanlage auszurüsten [4, 86]. Detailanforderungen an die technische Ausführung des Branderkennungssystems finden sich in der ARGE-Richtlinie »Branderkennung in Schienenfahrzeugen« [12], welche als Ansprechzeit der Brandmeldeanlage für das Testfeuer »Reisetasche⁴⁵« einen Maximalwert von 60 s ausweist.

In der Simulation dient die Integration des Brandmeldesystems lediglich der automatischen Ansteuerung und Abschaltung der raumlufttechnischen Anlage⁴⁶. Hierzu erfolgt im geometrischen Fahrzeugmodell die Installation von jeweils fünf optischen Rauchmeldern unterhalb der Deckenverkleidung in beiden Decks entlang des Mittelganges sowie je eines Rauchmelders in den Einstiegsfoyers. Alle Rauchmelder erhalten die FDS-Standardereinstellungen des Typs »Cleary Photoelectric P1« [117].

⁴² vgl. Abschnitt 8.1.13

⁴³ vgl. Abschnitt 8.1.2

⁴⁴ vgl. Abschnitt 2.2.1

⁴⁵ vgl. Abschnitt 3.2.3

⁴⁶ vgl. Abschnitt 8.1.7

Als Kriterium zur Prüfung der zweckmäßigen Positionierung der einzelnen Detektoren dient die maximale Ansprechzeit von 60 s nach ARGE-Richtlinie [12]. Allerdings besteht das hierbei verwendete Brandereignis nicht aus dem Testfeuer »Reisetasche«, sondern aus dem in dieser Untersuchung entwickelten Gepäckstück-Bemessungsbrand⁴⁷, das jedoch hinsichtlich des Profils der zeitlichen Wärmefreisetzung als vergleichbar anzunehmen ist⁴⁸. Testsimulationen mit unterschiedlichen Positionierungen⁴⁹ des Initialbrandes zeigen, dass die Ansprechzeiten des Branderkennungssystems in allen Konfigurationen weniger als 30 s betragen. Infolgedessen lässt sich in weiteren Simulationen zugunsten vergleichbarer Randbedingungen auf die Kopplung von automatischer Branderkennung und Lüftungsabschaltung verzichten und stattdessen ein pauschaler Zeitpunkt zur Abschaltung der raumlufttechnischen Anlagen von 40 s nach Brandbeginn, bestehend aus 30 s für die Branderkennung und 10 s für den Abschaltungsprozess, in die Simulation implementieren.

8.1.9 Brandbekämpfungsmaßnahmen

Eine fest installierte Brandbekämpfungseinrichtung⁵⁰ ist nach DIN EN 45545 für Fahrgastbereiche von Schienenfahrzeugen nicht erforderlich [86]. Dementsprechend wird in den Simulationen keine stationäre Löschanlage vorgesehen. Zwar besteht die Anforderung, Schienenfahrzeuge mit tragbaren Feuerlöschern auszustatten [86], jedoch wird für die Simulationen angenommen, dass keine manuellen Löschversuche vorgenommen werden.

8.1.10 Initialbrand

Als Initialbrand fungiert das in den Kapiteln 5 und 6 entwickelte Brandmodell eines Gepäckstückes, dessen numerische Umsetzung in Kapitel 7 bereits geprüft wurde. Die energetischen und stofflichen Emissionen des Brandmodells entsprechen den Ausführungen in den Abschnitten 7.2.4 und 7.2.5.

Dieses Zündinitial wird in verschiedenen Simulationsläufen an drei repräsentativen Stellen innerhalb des Doppelstockwagens angeordnet, da ein Einfluss der Position des Initialbrandes auf die Rauch- und Brandausbreitungscharakteristik innerhalb des Wagens anzunehmen ist [35]. Die Platzierung des Zündinitials erfolgt zunächst im unteren Deck des Doppelstockwagens. Aufgrund der Thermik ist bei diesem

⁴⁷ vgl. Abschnitt 8.1.10

⁴⁸ vgl. Abschnitt 6.3

⁴⁹ vgl. Abschnitt 8.1.13

⁵⁰ vgl. Abschnitt 9.2.3

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Standort eine vollständige Verrauchung des Wagens zu erwarten. Bei der Aufstellung des Zündinitials im oberen Deck ist davon auszugehen, dass sich eine thermische Schichtung einstellt und sich der Brandrauch im oberen Deck stabilisiert. Die dritte Position, im eingeschossigen Bereich des Wagens, wird aufgrund der dort vergleichsweise höheren Brandlastdichte in Form exponierter, brennbarer Oberflächen gewählt. Nennenswert sind hier in erster Linie die flächenmäßig größere Seitenwandverkleidung, da in diesem Bereich ein schmaleres Fenster verbaut ist, die Trennwände zum Foyer sowie die direkte Anbindung der brennbaren Deckenverkleidung an die Seitenwände, die in den zweigeschossigen Bereichen nicht gegeben sind.

Das brennende Gepäckstück befindet sich an allen untersuchten Aufstellorten auf der Sitzfläche eines Fahrgastsitzes innerhalb einer Vierer-Sitzgruppe (vgl. Abbildung 8.4). Weitere mögliche Positionen des Initialbrandes, wie neben einem Sitz, zwischen zwei Sitzlehnen oder in der Gepäckablage werden nicht betrachtet, da die gewählte Platzierung auf einem Sitz sowohl hinsichtlich des Wirksamwerdens einer externen Zündquelle als auch hinsichtlich der Brandausbreitungscharakteristik als konservativ zu bewerten ist [57, 161]. Ferner entspricht die gewählte Konfiguration dem Szenario, das bereits in Deutschland in den letzten Jahren zur Erarbeitung von Bemessungsbränden für Schienenfahrzeuge angesetzt wird [226].

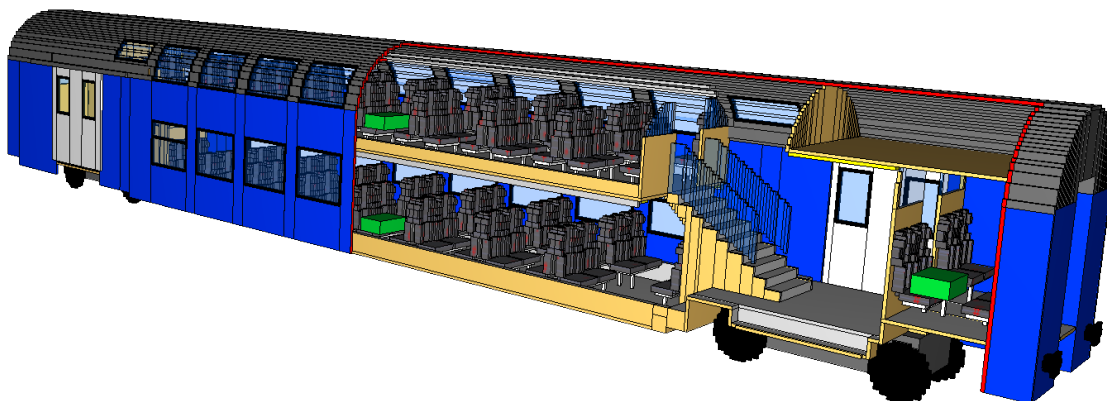


Abbildung 8.4: Schnittansicht der modellierten Fahrzeuggeometrie mit den drei untersuchten Positionen des Zündinitials

8.1.11 Instrumentierung

Die Beurteilung der Personensicherheit erfolgt im Allgemeinen anhand der Kriterien »Sichtverhältnisse«, »Rauchgastoxizität« und »Wärmeeinwirkungen⁵¹. Für den Anwendungsfall eines Schienenfahrzeuges ist dem Aspekt der Sichtverhältnisse jedoch keine besondere Signifikanz zuzuschreiben: Aufgrund der geometrischen Gegebenheiten des Innenraumes und der vergleichsweise geringen Entfernungen zu Notausstiegen, ist, auch bei einer gewissen Verrauchung des Fahrzeuges, kein vollständiger Orientierungsverlust zu erwarten⁵². Des Weiteren ist grundsätzlich eine Korrelation zwischen der Sichttrübung durch Rauchpartikel und der toxischen Wirkung von Rauchgasen anzunehmen⁵³, sodass in den vorliegenden Brandsimulationen eine explizite Untersuchung die Sichtverhältnisse nicht erfolgt.

Die Ermittlung der toxischen Dosen und Konzentrationen basiert auf den volumetrischen Gehalten der jeweils freigesetzten Rauchgaskomponenten⁵⁴ CO₂, CO und HCl. Die genannten Stoffkonzentrationen, ergänzt durch O₂, werden über punktförmige Sensoren aufgenommen, welche sich mittig in beiden Foyers sowie entlang des Mittelganges beider Decks befinden. Die Sensoren sind jeweils im Abstand von 1,6 m vom Boden, der angenommenen Höhe der Atemwege anwesender Personen [64], angeordnet.

Zur Untersuchung der Wärmeeinwirkungen auf Personen sowie zur Beurteilung des Zünd- und Brandverhaltens der Fahrzeugkomponenten werden neben den Temperaturen die auftreffenden Strahlungsdichten an den entsprechend exponierten Oberflächen aufgezeichnet. Zusätzliche diskrete Strahlungsdichte- und Temperatursonden sind koinzident zu den Gassensoren angeordnet.

8.1.12 Randbedingungen

Die in der Simulation vorzugebende globale Brennstoffkomposition in Form von Polyester mit einer Summenformel von CH_{1,4}O_{0,22} und einer effektiven Verbrennungswärme $\Delta h_{c,eff}$ von 13.000 kJ/kg zur Berechnung der CO- und CO₂-Entstehungsanteile der am Brand beteiligten Fahrzeugkomponenten wird beibehalten⁵⁵ [49, 213]. Diese globale Brennstoffkomposition nimmt jedoch keinen Einfluss auf die energetischen bzw. materiellen Emissionen des Initialbrandes, da diese bei dem ver-

51 vgl. Abschnitt 4.3

52 vgl. Abschnitt 4.3.1

53 vgl. Abschnitt 4.3.1

54 vgl. Abschnitt 6.2.6

55 vgl. Abschnitte 7.1.4.3 und 7.2.8

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

wendeten Gepäckstück-Bemessungsbrand bereits vordefiniert sind⁵⁶. Der in den bisherigen Simulationen⁵⁷ verwendete Kohlenmonoxid-Entstehungsanteil Ψ_{CO} von 0,039 g_{CO}/g_{BS} wird ebenfalls beibehalten, da der gewählte Wert gut mit den in Tabelle 6.7 referenzierten Literaturangaben⁵⁸ korrespondiert.

Die folgende Tabelle listet weitere globale Parameter auf, die in der Simulation berücksichtigt werden:

Tabelle 8.13: Randbedingungen der Simulation

Parameter	Wert	Kommentar
Umgebungstemperatur	$T_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Standardwert [117]
Umgebungsdruck	$p_{\infty} = 101325 \text{ Pa}$	Standardwert [117]
Relative Luftfeuchte	$RH = 40 \text{ } \%$	Standardwert [117]
Spezifischer Extinktionskoeffizient	$K_m = 8,7 \frac{\text{m}^2}{\text{g}}$	Vgl. Abschnitt 5.2.7
Rauchpartikel-Entstehungsanteil	$\Psi_s = 0,03 \frac{\text{g}}{\text{g}}$	Vgl. Abschnitt 6.2.7
Strahlungsanteil	$\dot{Q}_{\text{rad}} = 0,35 \cdot \dot{Q}$	Standardwert [117]

8.1.13 Simulationsvarianten

Um die Auswirkungen gezielter Variationen verschiedener Eingabe- bzw. Berechnungsparameter auf die Ergebnisse zu untersuchen, wird eine Serie von Simulationen durchgeführt⁵⁹. Die folgenden Absätze greifen die zu variierenden Parameter noch einmal auf und führen in das Benennungssystem der jeweiligen Simulationsvarianten ein, dessen Zeichenreihenfolge sich aus dem individuell gewählten Parametersatz zusammensetzt. Tabelle 8.14 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Simulationen. Darüber hinaus enthält Abschnitt 8.4.4 weitere Simulationsvarianten, in denen, aufbauend auf den Resultaten der hier vorgestellten Simulationen, eine Sensitivitätsbetrachtung weiterer Simulationsparameter erfolgt.

Abschnitt 8.1.4 thematisiert die als brennbar modellierten Fahrzeugkomponenten und erörtert die in der Simulation hinterlegten Pyrolyseansätze. Hierbei kennzeichnet die »0« Simulationen, in denen die brennbaren Komponenten als inert angenommen werden, die »2« steht für die Vorgabe des Quellterms bei Erreichen

⁵⁶ vgl. Abschnitt 8.1.10

⁵⁷ vgl. Abschnitt 7.2.5.3

⁵⁸ Tabelle in Abschnitt 6.2.6.2

⁵⁹ vgl. vorstehende Abschnitte dieses Kapitels

der Zündtemperatur und die »3« repräsentiert die Berechnung der pyrolytischen Reaktion anhand kinetischer Parameter. Die Benennung der in den Simulationen implementierten Pyrolysemodelle entspricht somit der Darstellung in Abschnitt 8.1.4, die wiederum mit der im Projekt TRANSFEU verwendeten Systematik korrespondiert.

Die Position des Zündinitials variiert zwischen dem unteren Deck »L«, dem oberen Deck »U« und dem eingeschossigen Bereich an der Stirnseite des Wagens »F«⁶⁰. Die Endtür an der vorderen Stirnseite des Doppelstockwagens befindet sich entweder im geschlossen Zustand »C« oder öffnet 60 s nach Brandbeginn »O«⁶¹. Die Netzeinteilung basiert entweder auf Zellen mit den Maßen Länge · Breite · Höhe = 10 cm · 10 cm · 5 cm oder würfelförmigen Zellen der Kantenlänge 5 cm⁶². Den beiden Diskretisierungen sind die Kennbuchstaben »C« und »F« zugeordnet.

Ergänzend zu den bereits gelisteten Parameteroptionen sollen die Simulationsergebnisse des parallelen Berechnungsmodus »OpenMP« und des seriellen Berechnungsmodus miteinander verglichen werden⁶³. Die verwendeten Rechenressourcen sind dabei dieselben, wie sie auch in Kapitel 7 zur Simulation der Experimental-konfiguration zur Verfügung standen⁶⁴. Im System zur Bezeichnung der Simulationen sind dem seriellen Berechnungsmodus der Kennbuchstabe »S«, und dem Shared-Memory-System (OpenMP) der Kennbuchstabe »O« zugeordnet.

60 vgl. Abschnitt 8.1.10

61 vgl. Abschnitt 8.1.7

62 vgl. Abschnitt 8.1.3

63 vgl. Abschnitt 7.1.5;

Voruntersuchungen mit dem parallelen Distributed-Memory-Ansatz (MPI) und der damit verbundenen Aufteilung des Berechnungsraumes in zwölf Einzelnetze führten zu divergierenden Ergebnissen und wiederholten Simulationsabbrüchen. Demzufolge wird von einer weiteren Nutzung dieses Ansatzes in der vorliegenden Anwendung abgesehen.

64 vgl. Abschnitt 7.2.9

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Tabelle 8.14: Übersicht über die regulären⁶⁵ Simulationsvarianten

Name*	Pyrolyse	Zündinitial	Endtür	Netz	Modus
	0: Inert	L: Unten	C: Zu	C: Grob	S: Seriell
	2: Methode 2	U: Oben	O: Auf	F: Fein	O: OpenMP
	3: Methode 3	F: Vorne			
<hr/>					
0LCCO	0	L	C	C	O
0LCFS	0	L	C	F	S
0LCFO	0	L	C	F	S
0LOCO	0	L	O	C	O
0UCCO	0	U	C	C	O
0UOCO	0	U	O	C	O
0FCCO	0	F	C	C	O
0FOCO	0	F	O	C	O
<hr/>					
2LCCO	2	L	C	C	O
2LOCS	2	L	O	C	S
2LOCO	2	L	O	C	O
2UCCO	2	U	C	C	O
2UOCO	2	U	O	C	O
2FCCO	2	F	C	C	O
2FCFO	2	F	C	F	O
2FOCO	2	F	O	C	O
<hr/>					
3LCCO	3	L	C	C	O
3LCFS	3	L	C	F	S
3LOCS	3	L	O	C	S
3LOCO	3	L	O	C	O
3LOFO	3	L	O	F	O
3UCCO	3	U	C	C	O
3UOCO	3	U	O	C	O
3FCCO	3	F	C	C	O
3FOCO	3	F	O	C	O

* Die Kennung basiert auf den englischen Begriffen: Lower; Upper; Front; Closed; Open; Coarse; Fine

⁶⁵ weitere Simulationsvarianten finden sich in Abschnitt 8.4.4

8.2 Simulationsergebnisse

– Einfluss von Berechnungsmodus und Diskretisierung

Sowohl die Reduktion der Zellenanzahl um den Faktor vier⁶⁶ und die damit verbundene Verringerung der erforderlichen Rechenoperationen proportional zum Faktor acht⁶⁷ als auch die Option, die immense Anzahl der zu bewältigenden Rechenoperationen nicht seriell, sondern parallel⁶⁸ abzuarbeiten, repräsentieren sehr attraktive Möglichkeiten, die vorhandenen Rechenkapazitäten effizienter zu nutzen und die benötigten Rechenzeiten um ein Vielfaches zu verkürzen. Trotzdem ist im Vorfeld zu untersuchen, inwiefern sich die beiden variierten Parameter »Berechnungsmodus« und »Diskretisierung« auf die Simulationsergebnisse des modellierten Schienenfahrzeuges auswirken. Dieser Abschnitt beleuchtet exemplarisch anhand ausgewählter Simulationsvarianten und Ausgabewerten, ob und in welcher Dimension die genannten Größen die Rechenergebnisse beeinflussen.

8.2.1 Berechnungsmodus

Zur Analyse der Berechnungsmodi »seriell« und »OpenMP« werden jeweils zwei Simulationsvarianten mit identischen Eingabedaten gegenübergestellt, die sich ausschließlich in der verwendeten Berechnungsart unterscheiden. Die ausgewählten Simulationen repräsentieren jeweils einen der drei genutzten Pyrolysemethoden. Darüber hinaus werden auch beide Gitterfeinheiten sowie beide Ventilationskonditionen untersucht. Beispielhaft fungieren die Simulationen⁶⁹ »0LCFS« und »0LCFO«, »2LOCS« und »2LOCO« sowie »3LOCS« und »3LOCO«. Als Kriterien hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse sind einerseits die jeweiligen Wärmefreisetzungsraten und andererseits die berechneten Strömungsfelder von Interesse. Stellvertretend für die Betrachtung der Strömungsverhältnisse innerhalb des Wagens dient der zeitliche Verlauf des CO₂-Gehaltes im vorderen Foyer. Die Abbildungen 8.5 und 8.6 zeigen die entsprechenden Ausgabegrößen.

In Bezug auf die freigesetzte Wärme ist erkennbar, dass die Kurvenverläufe nicht identisch, sondern zeitweise minimale Differenzen erkennbar sind. Auch angesichts des sich einstellenden Strömungsfeldes sind vergleichbare Tendenzen feststellbar. Ferner offenbaren die in Abbildung 8.6 dargestellten CO₂-Gehalte der Simulation »0LCFS«, die nur bis zum Zeitpunkt $t = 550$ s vorhanden sind, eine nicht unerhebliche Schwäche der seriellen Berechnung: Aufgrund der feineren Diskretisierung

66 vgl. Abschnitt 8.1.3

67 vgl. Abschnitt 7.2.2

68 vgl. Abschnitt 7.1.5

69 vgl. Abschnitt 8.1.13

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

und dem daraus resultierenden vielfach höheren Berechnungsaufwand, ist es bei dieser Simulationsvariante und den vorhandenen Ressourcen⁷⁰ nicht realisierbar, Ergebnisse über den vollständigen Simulationszeitraum zu generieren.

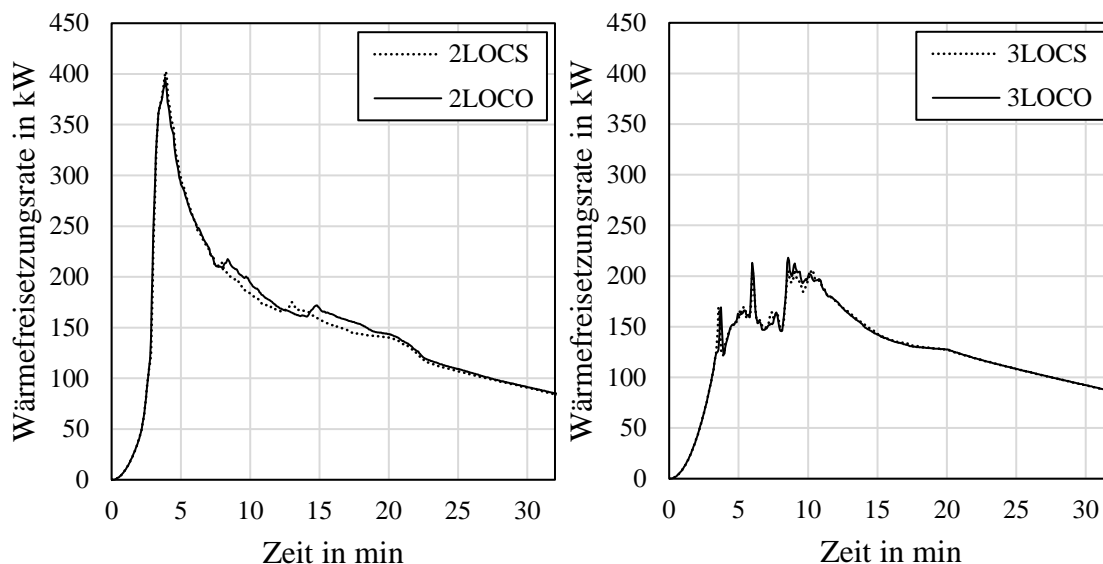


Abbildung 8.5: Wärmefreisetzungsraten der Simulationen »2LOCS« und »2LOCO« (links) sowie »3LOCS« und »3LOCO« (rechts)

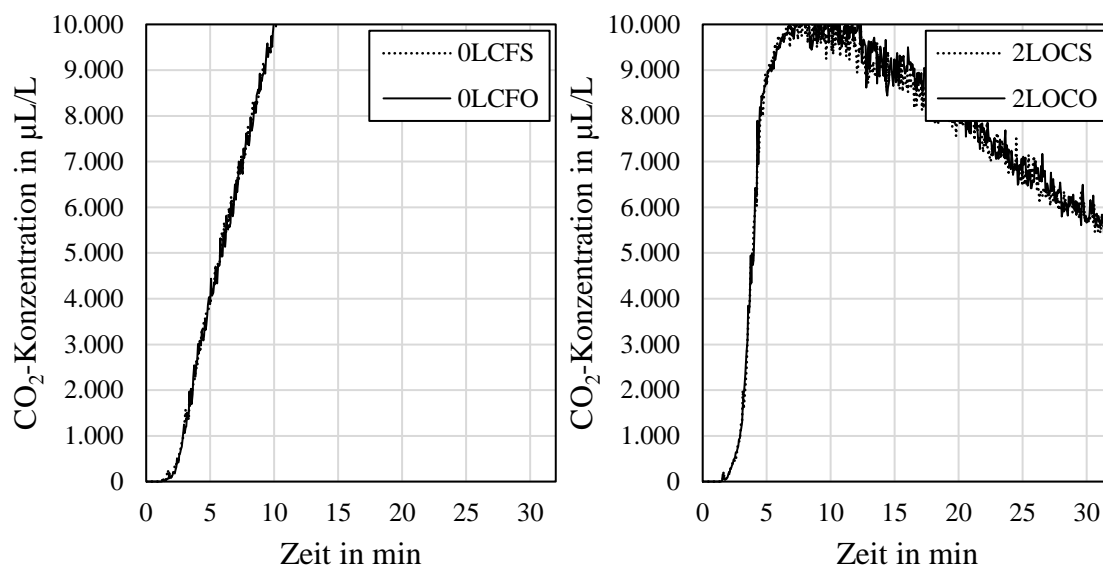


Abbildung 8.6: CO₂-Gehalte im vorderen Foyer der Simulationen »0LCFS« und »0LCFO« (links) sowie »2LOCS« und »2LOCO« (rechts)

⁷⁰ Die Nutzung des HPC Clusters der RWTH Aachen sieht reguläre Berechnungsintervalle von maximal 120 h vor, nach deren Ablauf eine Wiederaufnahme der Berechnung erfolgt, was an dieser Stelle zum Simulationsabbruch führt (vgl. auch Abschnitt 7.2.8).

Folglich generieren der serielle und der parallele untersuchte Berechnungsmodus »OpenMP« zwar keine identischen Ergebnisse, allerdings äußern sich die aufgezeigten Unterschiede der beider Berechnungsmodi als minimale Verschiebungen der betrachteten Ausgabegrößen, deren Dimension hinsichtlich der Aufgabenstellung vernachlässigbar ist. Dementsprechend erweist sich die parallele Shared-Memory Berechnungsmethode für die diese Untersuchung als geeignet und bietet hinsichtlich den Kriterien Rechengeschwindigkeit und der Handhabung größerer Datenmengen und Rechenoperationen Vorteile, wohingegen die Simulationen im seriellen Modus kaum darstellbar sind.

8.2.2 Diskretisierung

Die numerischen Untersuchungen der Experimentalkonfiguration in den Abschnitten 7.2 und 7.3 ergeben, dass eine Aufteilung des Simulationsraumes in kubische Zellen der Kantenlänge 5 cm geeignete Ergebnisse generiert. Bei einer weniger feinen Diskretisierung mit einer einheitlichen Zellkantenlänge von 10 cm lässt sich bezüglich der stofflichen Messgrößen kein nennenswerter Einfluss der betrachteten Gitterfeinheiten feststellen, allerdings nehmen die Ungenauigkeiten bei der Berechnung des Strahlungstransportes zu⁷¹. Die Intention dieses Abschnittes besteht darin, zu prüfen, ob auch mit weniger Zellen gleichwertige Simulationsergebnisse erzeugt werden können und sich damit im Hinblick auf die Anzahl der durchzuführenden Simulationen die erforderlichen Berechnungsressourcen vertretbar reduzieren lassen. Dazu werden die Auswirkungen einer Vergrößerung der Zellkantenlänge in den horizontalen Raumrichtungen von 5 cm auf 10 cm auf das modellierte Brandereignis innerhalb des Fahrzeuges untersucht. Gleichwohl erfolgt keine Modifizierung der Zellkantenlänge in vertikaler Richtung, da eine feine Diskretisierung hinsichtlich einer Stratifizierung der Rauchgase innerhalb des Fahrzeuges als adäquat erachtet wird⁷².

Analog zum vorhergehenden Abschnitt werden ausgewählte Simulationen paarweise gegenübergestellt. Diese unterscheiden sich in dieser Untersuchung lediglich in der Feinheit der zugrunde liegenden Gitterstruktur. Für den exemplarischen Vergleich werden die Simulationen »0LCCO« und »0LCFO«, »2FCCO« und »2FCFO« sowie »3LOCO« und »3LOFO« herangezogen, die folglich sowohl die drei verwendeten Pyrolyseansätze als auch unterschiedliche Ventilationsbedingungen und Positionen des Zündinitials repräsentieren. Besonderes Interesse gilt hierbei

71 vgl. Abschnitt 7.3.6

72 vgl. Abschnitt 8.1.3

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

der Simulation »2FCCO«, da sich diese durch eine kritischere Branddynamik, verglichen mit den meisten anderen Simulationen, charakterisiert⁷³. Zur Bewertung der Ergebnisse finden dieselben Kriterien Anwendung wie in Abschnitt 8.2.1.

Abbildung 8.7 visualisiert die zeitlichen Verläufe der Wärmefreisetzungsraten. Diese verhalten sich für die Simulationen »2FCCO« und »2FCFO« in den ersten Minuten nach Brandbeginn ähnlich. In der vierten Brandminute findet bereits eine Durchzündung innerhalb des Wagens statt und die Wärmefreisetzungsrates steigt rasant in Dimensionen, die sich außerhalb der Gültigkeit des modellierten Szenarios befinden⁷⁴. Dementsprechend sind die im weiteren Brandverlauf auftretenden Differenzen lediglich für diagnostische Zwecke interessant. Die Wärmefreisetzungsraten der Simulationen »3LOCO« und »3LOFO« zeigen innerhalb der ersten drei Brandminuten identische Verläufe. Danach ist, anhand der Werte größer als 120 kW, ebenfalls eine Brandbeteiligung von Fahrzeugkomponenten zu identifizieren. Hier sind zwischen den Kurvenverläufen kleinere Differenzen erkennbar, bevor in der zehnten Minute in beiden Simulationen die maximalen Wärmefreisetzungsraten erreicht werden. Ab diesem Zeitpunkt setzt in der Variante »3LOCO« ein Abklingen ein, während in »3LOFO« das Niveau gehalten wird und die Reduktion der Wärmefreisetzungsrates erst mit ca. dreiminütiger Verzögerung stattfindet.

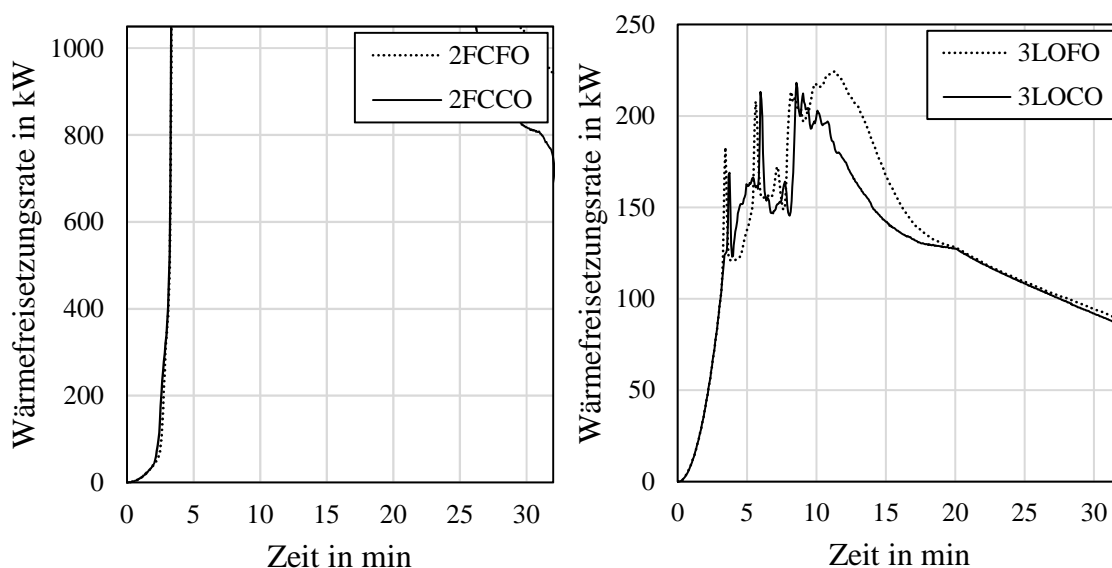


Abbildung 8.7: Wärmefreisetzungsraten der Simulationen »2FCFO« und »2FCCO« (links) sowie »3LOFO« und »3LOCO« (rechts)

⁷³ vgl. Abschnitt 8.4.3

⁷⁴ vgl. Abschnitt 8.4.3

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Hinsichtlich der CO_2 -Gehalte, visualisiert in Abbildung 8.8, stellt sich die Situation folgendermaßen dar: Der Anstieg der Konzentrationswerte der Simulation »2FCCO« verläuft gegenüber der Variante »2FCFO« in den ersten Brandminuten geringfügig zeitversetzt. Dieses Phänomen lässt sich bei dem Vergleich der Simulationen »0LCCO« und »0LCFO« nicht feststellen. Hier verlaufen beide Funktionskurven deckungsgleich.

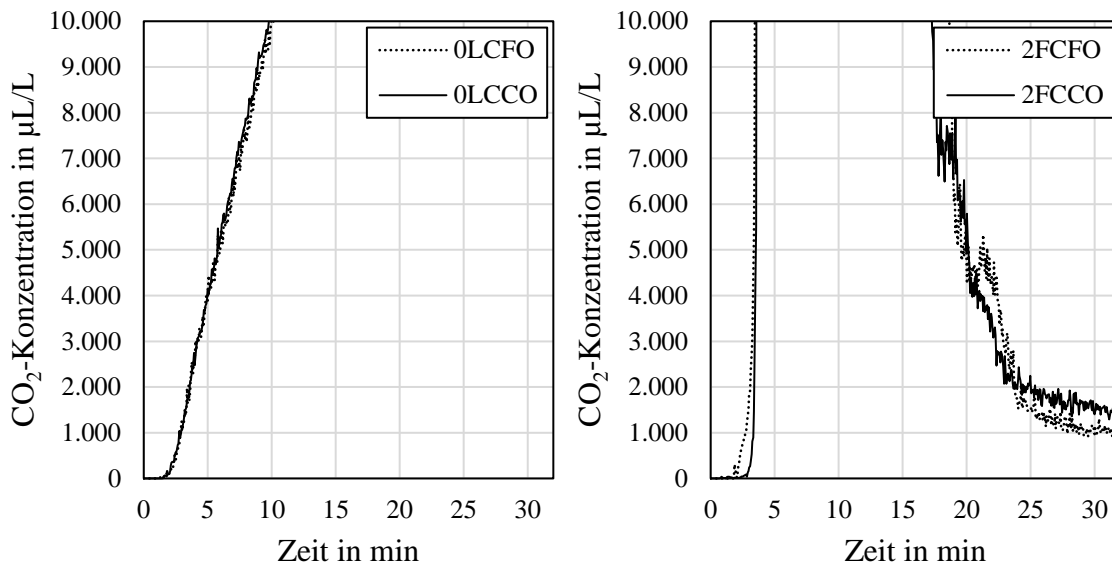


Abbildung 8.8: CO_2 -Gehalte im vorderen Foyer der Simulationen »0LCFO« und »0LCCO« (links) sowie »2FCFS« und »2FCCO« (rechts)

Es ist demnach festzustellen, dass die beiden untersuchten Gitterfeinheiten sich in einigen Fällen auf die Simulationsergebnisse auswirken und sich die beschriebenen Differenzen grundsätzlich ausgeprägter darstellen als im Hinblick auf den Berechnungsmodus in Abschnitt 8.2.1. Dabei scheint die Dimension der Abweichungen in Relation zum verwendeten Pyrolysemodell bzw. zu der Höhe der Wärmefreisetzungsrate zu stehen: Bei verhältnismäßig geringer Wärmefreisetzungsrate und ohne hinterlegtes Pyrolysemodell, wie in den Simulationen »0«, führen beiden betrachteten Diskretisierungen zu deckungsgleichen Resultaten. In Verbindung mit implementierten Pyrolyseansätzen und besonders bei höheren Wärmefreisetzungs-raten mit folglich auch höheren Strömungsgradienten, wie sie in den Simulationen »2F« auftreten, erzeugen unterschiedliche Gitterfeinheiten keine identischen Ergebnisse.

Ein bisher nicht genannter Aspekt ist die Umsetzung des geometrischen Modells in die gewählte Diskretisierung, bei der Oberflächen und Volumen an das jeweilige

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Gitternetz angepasst werden. Hierbei ist nicht gänzlich auszuschließen, dass die resultierenden Größen der exponierten brennbaren Oberflächen leicht variieren, was sich nicht zuletzt auch in der freigesetzten Wärme und der Menge der gasförmigen Emissionen äußern kann.

Grundsätzlich bewegen sich jedoch die diskutierten Differenzen in Größenordnungen, die im Sinne der Aufgabenstellung nicht als signifikant einzustufen sind, da weder ein nennenswerter Einfluss auf die vorherrschende Branddynamik noch auf das sich einstellende Strömungsfeld auszumachen ist. Ferner ließe sich die Verwendung der kubischen 5 cm-Zellaufteilung in Anbetracht des dafür erforderlichen Rechenaufwandes, der den benötigten Rechenaufwand der Diskretisierung mit Zellen der Form 10 cm · 10 cm · 5 cm aufgrund der vierfachen Zellenanzahl und des halbierten Zeitschrittes um ca. den Faktor acht übersteigt⁷⁵, nur schwer rechtfertigen. Infolgedessen wird für die nachfolgenden Simulationen regulär die quaderförmige Zellform mit den Maßen 10 cm · 10 cm · 5 cm genutzt.

⁷⁵ vgl. Abschnitt 7.2.2

8.3 Simulationsergebnisse

– Pyrolysemethode »0« (inerte Materialien)

Dieser Abschnitt behandelt die Ergebnisse der Simulationen, bei denen für die theoretisch brennbaren Fahrzeugkomponenten kein Pyrolysemodell hinterlegt und infolgedessen auch keine Brandausbreitung von dem Gepäckstück-Initialbrand innerhalb des Doppelstockwagens möglich ist. Die Auswertung der Simulationen dieser Serie⁷⁶ orientiert sich an dem jeweiligen Positionierungsort des Gepäckstückes im Fahrzeug, begonnen mit dem unteren Deck, gefolgt vom oberen Deck und anschließend im eingeschossigen Bereich.

Zur Beurteilung der Personensicherheit an Bord wird das bereits in Abschnitt 4.3 vorgestellte Konzept nach ISO 13571 herangezogen, das sich auf die drei Aspekte »toxisch wirksame Rauchgaskomponenten«, »thermische Einwirkungen« und »Sichtverhältnisse« stützt. Letztere sind jedoch nicht expliziter Bestandteil dieser Analyse, da primär kein Orientierungsverlust zu erwarten ist⁷⁷.

Die Effekte toxischer Rauchgaskomponenten untergliedern sich in reizend und erstickend wirkende, die wiederum konzentrations- oder dosisbasiert zu bewerten sind und sich dementsprechend in der fraktionellen effektiven Konzentration (FEC) oder der fraktionellen effektiven Dosis (FED) wiederfinden⁷⁸. Wie schon in Abschnitt 4.3.2 angeführt, gelten hier Werte von 0,3 bzw. 0,1 für sensible Personengruppen, wie Kinder und ältere Personen, als maximal tolerierbare Expositionskonzentrationen und -dosen.

Die Erträglichkeit von Wärmeeinwirkungen steht in zeitlicher Abhängigkeit zu den Kenngrößen Lufttemperatur und auftreffender Strahlungsdichte, mit denen sich die Effekte des konvektiven Wärmeüberganges und der übertragenen Wärmestrahlung charakterisieren lassen. Das allgemeine Verfahren nach ISO 13571 sieht für beide genannten Parameter konstante Werte vor, zu denen eine maximale Zeitdauer für die Erträglichkeit einer Exposition korreliert. Es besteht grundsätzlich auch die Möglichkeit, eine fraktionelle effektive Dosis für Wärmeeinwirkungen zu ermitteln [140]. Allerdings wird in dieser Untersuchung bevorzugt, beide Aspekte separat zu bewerten, da bezüglich des FED-Konzeptes für Wärmeeinwirkungen die Datenbasis⁷⁹ eher dürftig ist und kaum Validierungsuntersuchungen verfügbar sind [60, 224]. Als Erträglichkeitsgrenzen für eine Expositionsdauer von ca.

76 vgl. Abschnitt 8.1.13

77 vgl. Abschnitt 4.3.1

78 vgl. Abschnitt 4.3.2

79 vgl. Abschnitt 4.3.3

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

15 min ohne Schutzausrüstung werden für die Strahlungsdichte ein Maximalwert von $2,5 \text{ kW/m}^2$ und für die Lufttemperatur ein Maximalwert von 80 °C angenommen, die jeweils den Darstellungen in Abschnitt 4.3.3 entsprechen.

Eine Zusammenfassung der Simulationsergebnisse findet sich in Abschnitt 9.1.1. Dort werden auch für alle Simulationsvarianten entsprechende Werte für ASET ermittelt.

8.3.1 Initialbrand im unteren Deck »0L«

Die Abbildungen 8.9 und 8.10 zeigen die Rauchverteilung innerhalb des Doppelstockwagens bei geschlossener Wagenendtür zu den Zeitpunkten 4 min und 8 min nach Brandbeginn: Zunächst formt sich im unteren Deck eine schmale Rauchschicht oberhalb des Sitzbereiches aus, von dieser aus der thermisch angetriebene Brandrauch durch das vordere und das hintere Foyer in das obere Deck strömt und sich hierbei mit der umgebenden Luft vermischt. Bereits nach kurzer Zeit stellt sich eine vollständige Verrauchung des Innenraumes ein.

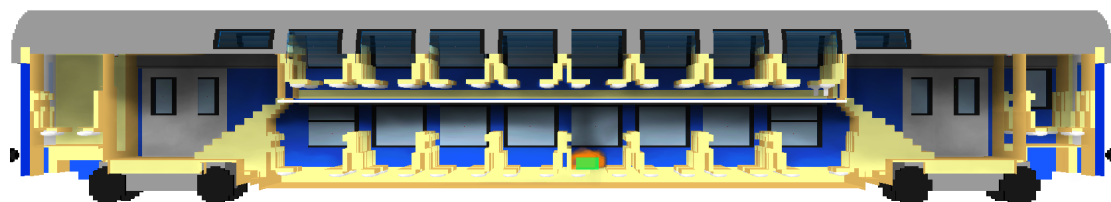


Abbildung 8.9: Rauchverteilung der Simulation »0LC«, $t = 4 \text{ min}$

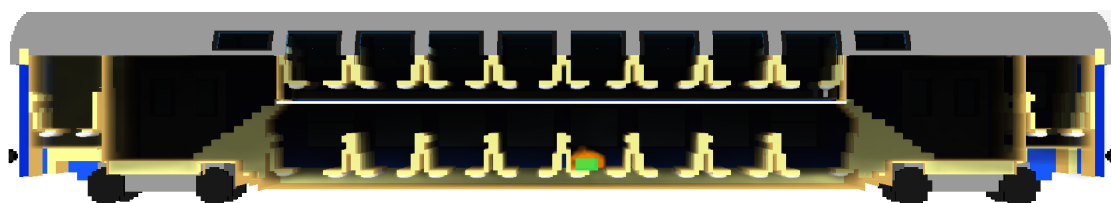


Abbildung 8.10: Rauchverteilung der Simulation »0LC«, $t = 8 \text{ min}$

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Anhand des Kriteriums »Rauchgastoxizität«, visualisiert in Abbildung 8.11 durch die FED und die FEC für die Sensoren⁸⁰ im vorderen und hinteren Foyer sowie mittig im unteren und oberen Deck, lässt sich die nahezu homogene Verteilung der Brandgase innerhalb des Wagens belegen: Die betrachteten Messpunkte, sowohl in der Simulation mit geschlossener Wagenendtür als auch in der Variante mit geöffneter Wagenendtür, reagieren annähernd synchron. Das heißt, dass es hinsichtlich der toxisch wirksamen Rauchgaskonzentrationen und -dosen irrelevant ist, an welcher Position im Fahrzeug sich eine exponierte Person aufhält.

Gleichwohl sich die vorherrschenden Ventilationsbedingungen auf die absoluten FED/FEC-Werte auswirken: Während in der Simulation mit geschlossener Wagenendtür der Grenzwert von 0,1 für die FED in der 15ten Minute und für die FEC bereits nach zehn Minuten erreicht wird, findet in der Variante mit der geöffneten Wagenendtür eine Überschreitung des genannten Kriteriums für die FED erst zwischen der 20sten und 23sten Minute und für die FEC zu keiner Zeit statt. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die geöffnete Wagenendtür in der Simulation das freie Ausströmen der Rauchgase in die Atmosphäre ermöglicht und demzufolge eine direkte Übertragbarkeit der, auf Basis dieser Randbedingungen generierten, Ergebnisse auf die Realanwendung zu prüfen ist⁸¹.

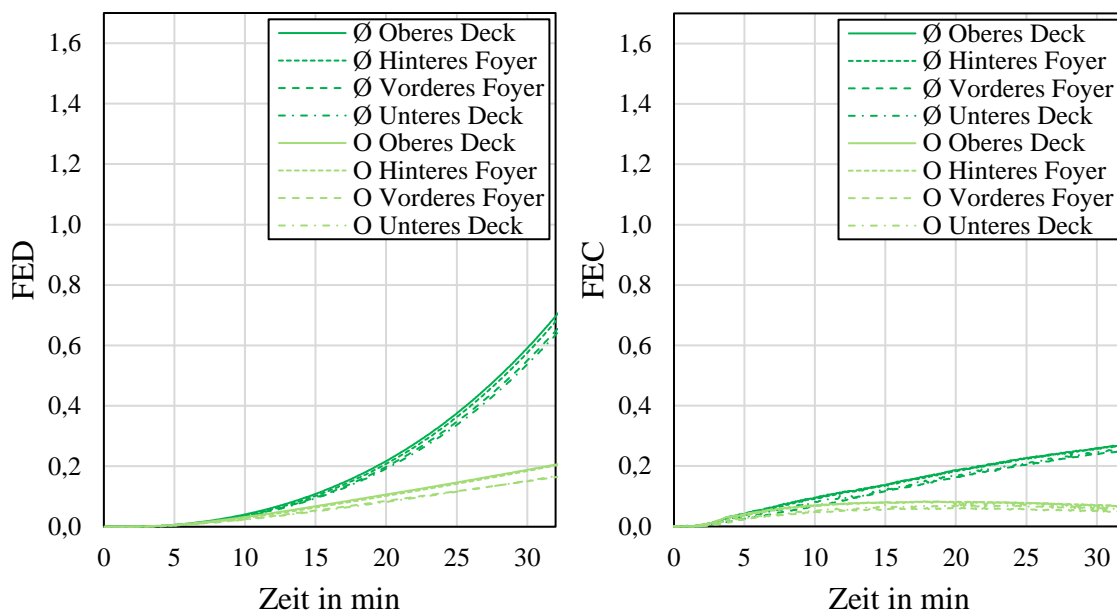


Abbildung 8.11: Rauchgastoxizität der Simulationen »0L« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

⁸⁰ Die vollständigen Simulationsergebnisse (sämtliche Sensoren) sind in Anhang B.3.1 enthalten.

⁸¹ vgl. Abschnitt 8.1.7

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Abbildung 8.12 stellt die zeitlichen Profile der Lufttemperaturen und der auftretenden Strahlungsdichten dar. Auch anhand der vergleichsweise eng zueinander verlaufenden Temperaturlinien lässt sich die gleichmäßige Rauchverteilung erkennen. Bezüglich der Strahlungsdichten ist nur eine nennenswerte Erhöhung dieses Parameters im unteren Deck, in dem sich der Brand befindet, festzustellen. Weder die Temperaturen, noch die Strahlungsdichten erreichen die genannten Grenzwerte.

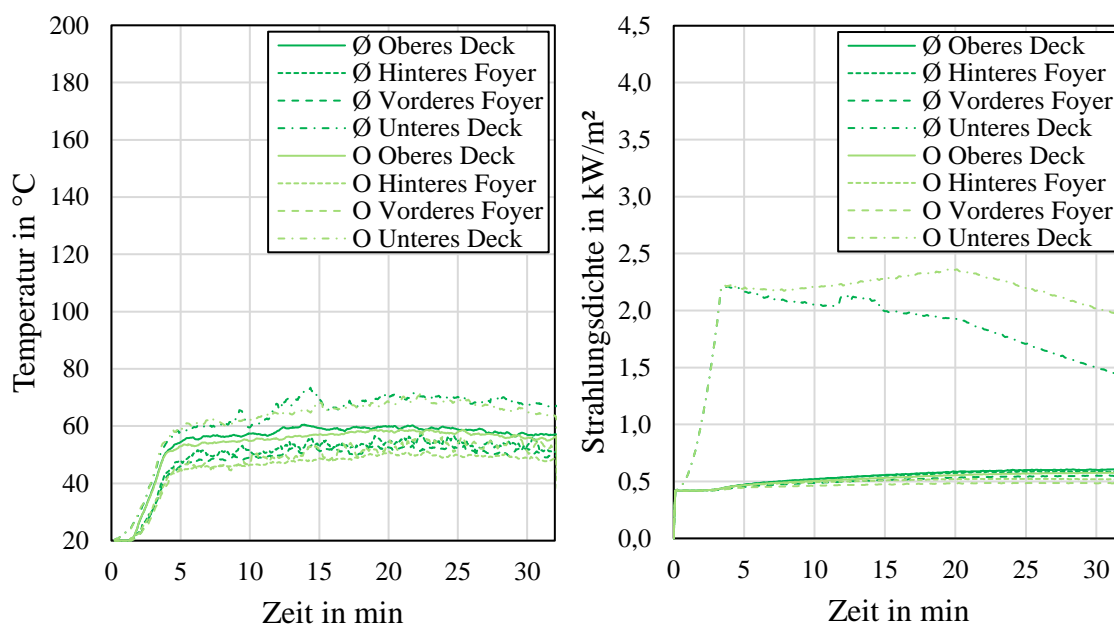


Abbildung 8.12: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulationen »0L« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

8.3.2 Initialbrand im oberen Deck »0U«

Für das Szenario mit dem brennenden Gepäckstück im oberen Wagendeck stellt sich ein andersartiges Erscheinungsbild der emittierten Rauchgase ein, wie die Abbildungen 8.13 und 8.14 für die Variante mit geschlossener Wagenendtür zeigen: Im Gegensatz zu den Simulationen mit dem Brandort im unteren Deck strömen die thermisch angetriebenen Rauchgase in dieser Konfiguration nicht durch den gesamten Innenraum in die höher gelegenen Bereiche und insofern finden auch kaum Vermischungsprozesse des Brandrauchs mit der umgebenden Luft statt. In- des breiten sich die Brandgase, aufgrund ihrer geringeren Dichte gegenüber der Umgebungsluft, unmittelbar oberhalb des Sitzbereiches im oberen Deck aus. Als Folge formieren sich zwei stabile und deutlich voneinander abgrenzbare Schichten: Eine obere, hochkonzentrierte Rauchgasschicht und eine untere, nahezu rauchfreie Schicht.

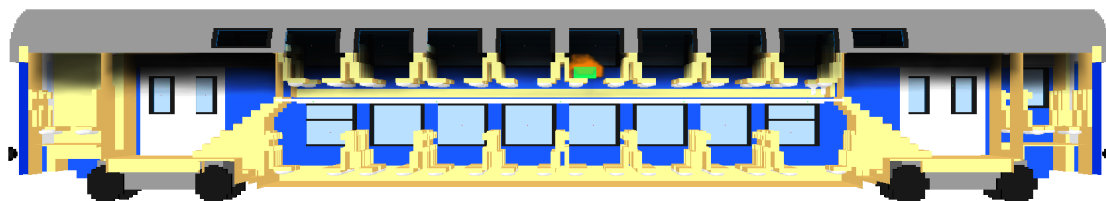


Abbildung 8.13: Rauchverteilung der Simulation »0UC«, $t = 4$ min

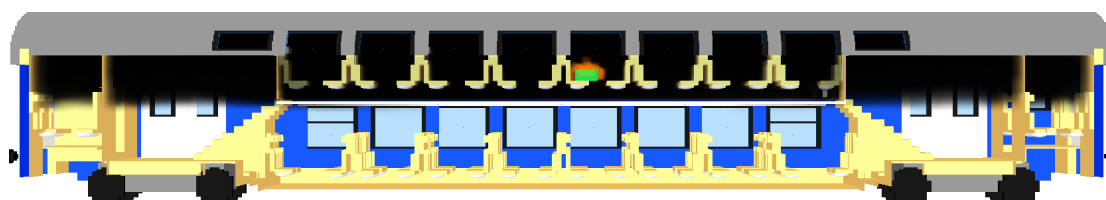


Abbildung 8.14: Rauchverteilung der Simulation »0UC«, $t = 8$ min

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung (Abbildung 8.15) folgt, sowohl in den Simulationen mit dem Brandort im unteren Deck als auch im eingeschossigen Bereich des Wagens, erwartungsgemäß dem vorgegebenen Profil des Gepäckstück-Bemessungsbrandes. Lediglich bei der Simulationsvariante mit dem Brand im oberen Deck und geschlossener Wagenendtür sind ab der 22sten Minute Abweichungen von der hinterlegten Funktion feststellbar. Die auftretenden Ausschläge in beide Richtungen entlang der angestrebten Kontur begründen sich durch das temporäre Absinken des Sauerstoffgehaltes im Brandbereich unter den Wert von 15 %, der

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

standardmäßig als minimale Konzentration für eine stattfindende Verbrennungsreaktion in FDS definiert ist [117]. Die energetische Umsetzung des während dieser Phase freiwerdenden Brenngases erfolgt erst mit dem Wiedererreichen des erforderlichen Sauerstoffgehaltes durch nachströmende Luft.

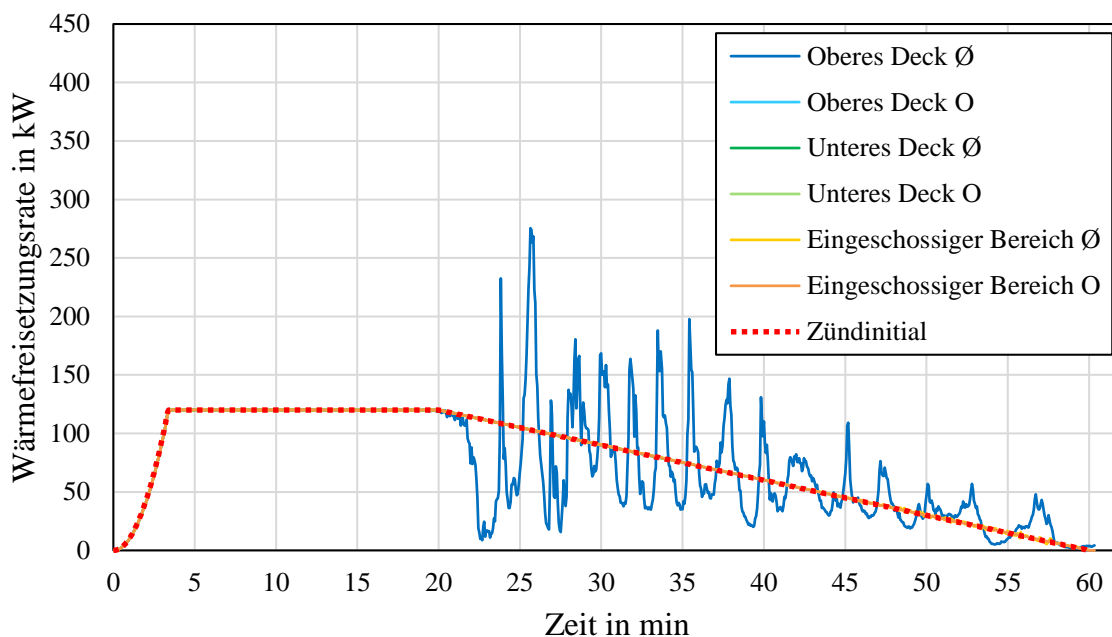


Abbildung 8.15: Wärmefreisetzungen der Simulationen »0«

Die oben beschriebene Stratifizierung der Rauchgase ist auch als Ursache für das Erscheinungsbild der Toxizitätsindikatoren FED und FEC in Abbildung 8.16 zu sehen. Während im oberen Deck der Grenzwert von 0,1 für die FEC bereits nach vier Minuten und für die FED nach neun Minuten überschritten wird, erreichen die Sensoren im vorderen und hinteren Foyer, in Abhängigkeit der Ventilationsbedingungen, diesen Wert frühestens im Zeitraum zwischen neun und 15 Minuten nach Brandbeginn, teilweise auch gar nicht. Im unteren Deck lässt sich für den Betrachtungszeitraum keine Beeinträchtigung der Erträglichkeit durch toxische Einwirkungen feststellen.

Bezüglich der thermischen Einwirkungen stellt sich die Situation im oberen Deck ebenfalls als kritisch dar: Unabhängig von den zugrunde liegenden Ventilationsbedingungen übersteigen die im oberen Deck berechneten Lufttemperaturen die 80 °C-Marke bereits nach drei Minuten und erreichen in der fünften Minute nach Brandbeginn sogar Werte von 140 °C. Die für die Strahlungsdichte ausgegebenen Ergebnisse bewegen sich für den Messpunkt im oberen Deck geringfügig unterhalb des Grenzwertes von 2,5 kW/m² und erfahren in den übrigen Bereichen keinen

nennenswerten Anstieg.

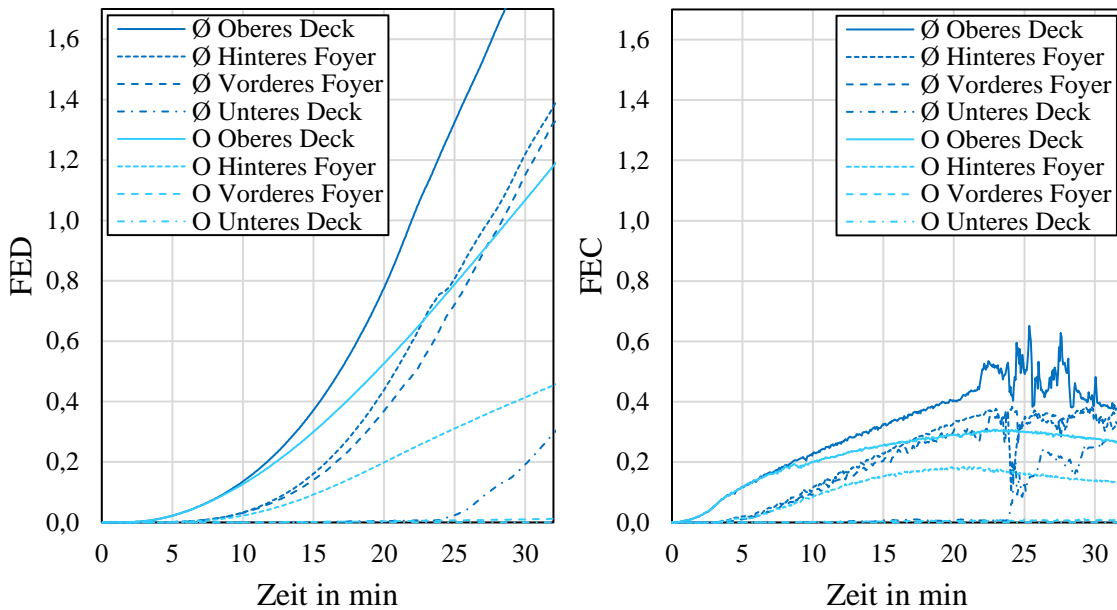


Abbildung 8.16: Rauchgastoxizität der Simulationen »0U« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

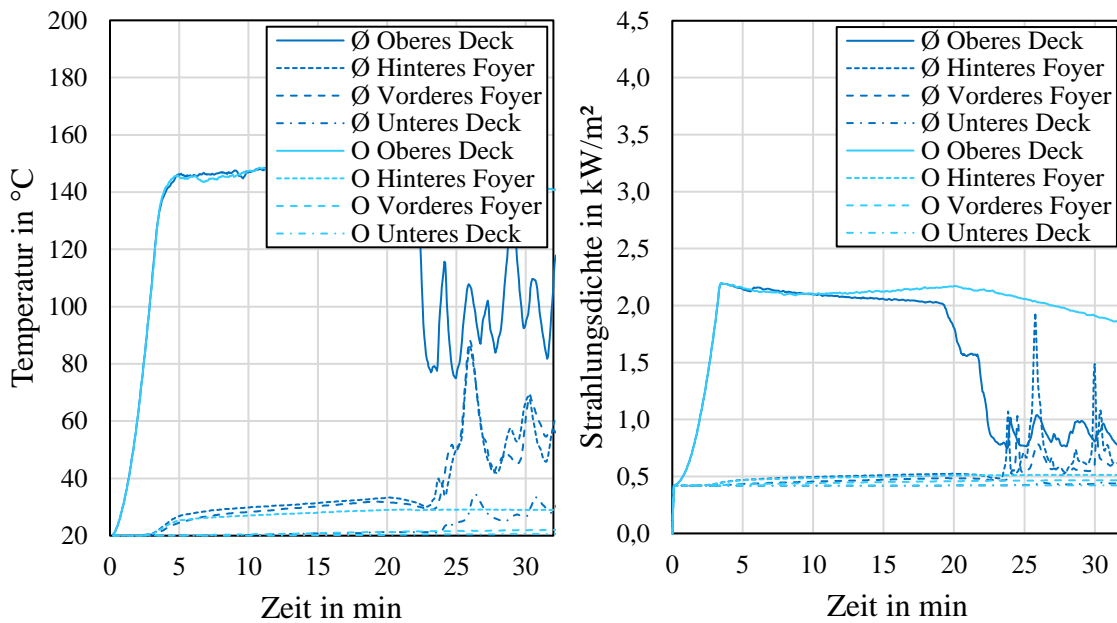


Abbildung 8.17: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulationen »0U« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

8.3.3 Initialbrand im eingeschossigen Bereich »0F«

Das Strömungsverhalten des Brandrauchs mit dem Zündinitial im eingeschossigen Bereich an der Frontseite des Wagens lässt sich als Mischung der in den Abschnitten 8.3.1 und 8.3.2 dargestellten Phänomene beschreiben: Grundsätzlich ist in Abbildung 8.18 eine Tendenz zur Ausbildung einer oberen, rauchhaltigen Schicht und einer unteren, rauchärmeren Schicht zu erkennen. Allerdings finden bei diesem Szenario ebenfalls signifikante Vermischungsprozesse zwischen dem Brandrauch und der umgebenden Luft statt, sodass die rauchärmere Schicht mit der Zeit drastisch schrumpft und sich die Rauchgase schließlich im gesamten Innenraum verteilen, wie Abbildung 8.19 zeigt.

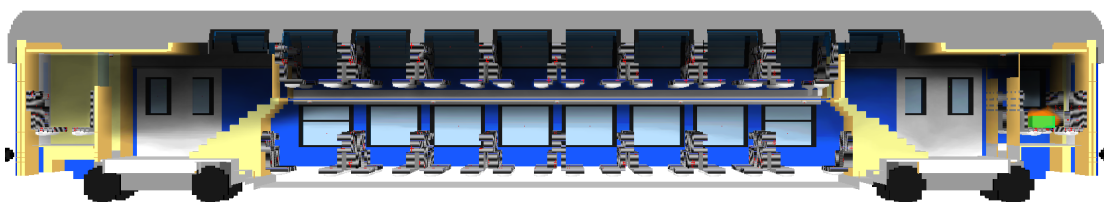


Abbildung 8.18: Rauchverteilung der Simulation »0FC«, $t = 4$ min

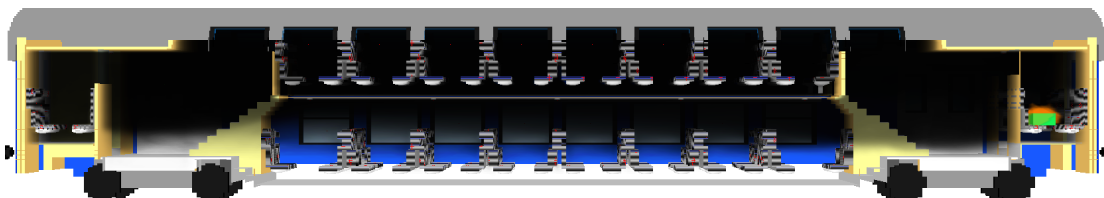


Abbildung 8.19: Rauchverteilung der Simulation »0FC«, $t = 8$ min

Die zeitlichen Profile der Toxizitätskriterien verlaufen vergleichsweise dicht beieinander, was eher die homogene Rauchverteilung als die Formierung zweier Schichten unterstreicht (vgl. Abbildung 8.20). Im oberen Deck der Konfiguration mit geschlossener Endtür wird der Grenzwert von 0,1 für die FEC bereits nach acht Minuten und in den anderen Bereichen nach spätestens elf Minuten erreicht. Die Überschreitung des genannten Grenzwertes für die FED schließt sich für alle Bereiche im Zeitraum zwischen der 13ten und 16ten Minute an. In der Variante mit geöffneter Wagenendtür tritt eine Grenzwertüberschreitung bei der FED erst ab der 20sten Brandminute, bei der FEC zu keiner Zeit ein.

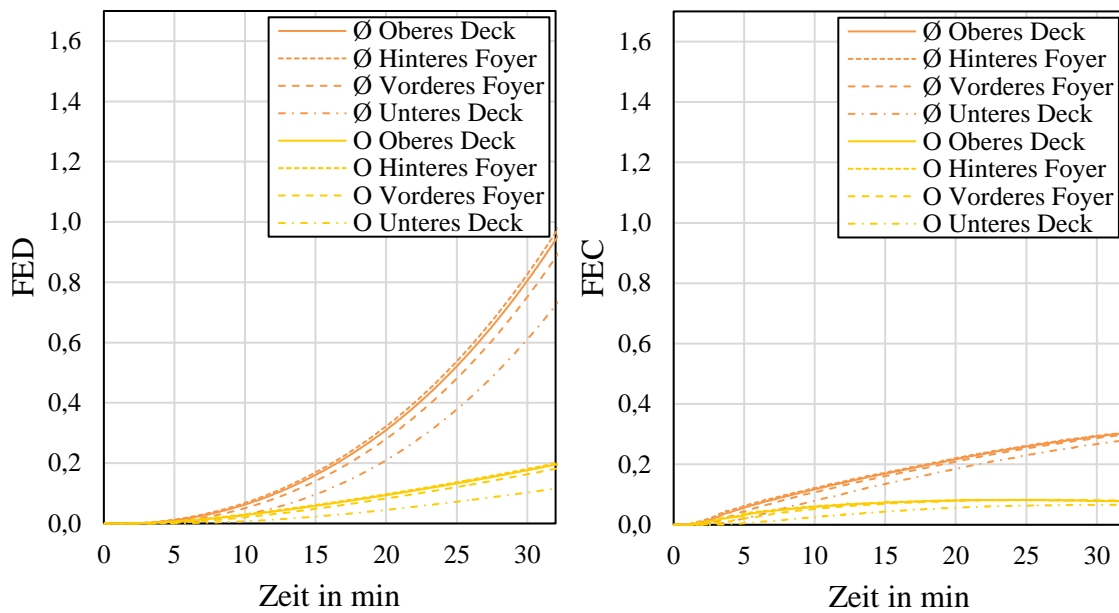


Abbildung 8.20: Rauchgastoxizität der Simulationen »0F« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Abbildung 8.21 visualisiert die berechneten Lufttemperaturen und die auftretenden Strahlungsdichten. Auch hier führen die unterschiedlichen betrachteten Ventilationsbedingungen zu stark variierenden Resultaten: Während sich die Lufttemperatur bei geschlossener Wagenendtür im oberen Deck schon nach drei Minuten jenseits der 80 °C-Marke befindet, wird dieser Grenzwert in der Simulation mit geöffneter Wagenendtür nicht erreicht. In den übrigen Wagenbereichen sind die Lufttemperaturen bei verbesserter Ventilation aufgrund des anteiligen Ausströmens von Rauchgasen ebenfalls entsprechend niedriger.

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

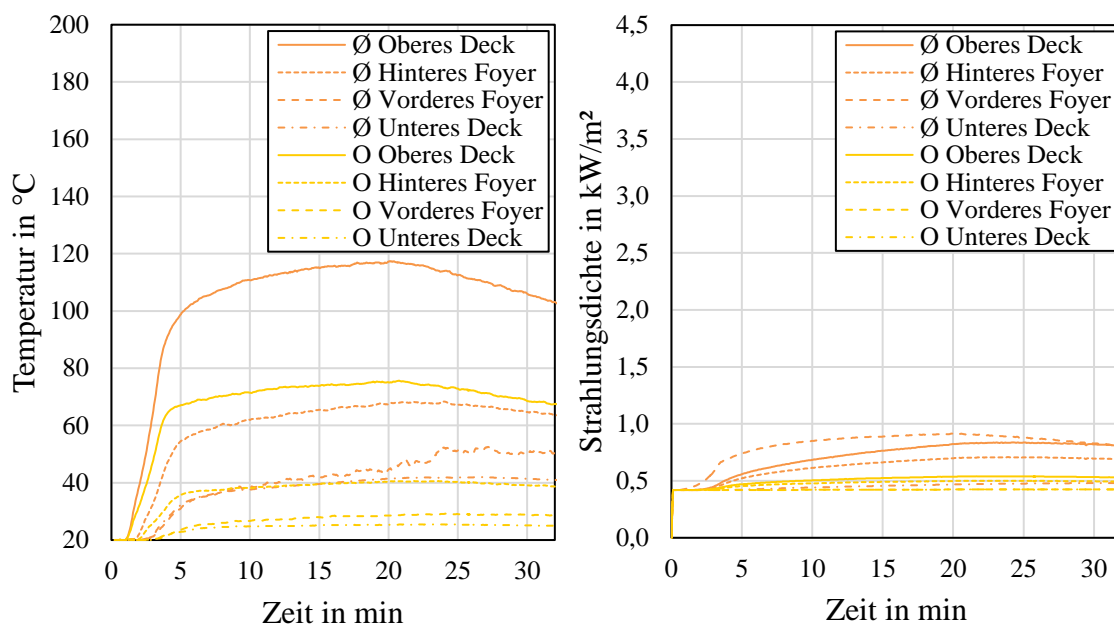


Abbildung 8.21: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulationen »0F« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

8.4 Simulationsergebnisse – Pyrolysemethode »2«

Dieser Abschnitt thematisiert die Simulationen, in denen den brennbaren Fahrzeugkomponenten das Pyrolysemodell zugeordnet ist, das bei Erreichen einer definierten Zündtemperatur am Element die Freisetzung des vorgegebenen, zeitabhängigen Quellterms vorsieht⁸². Im Gegensatz zu den Simulationen im vorhergehenden Abschnitt besteht also die Möglichkeit der Beteiligung von Fahrzeugkomponenten am Brandereignis.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Analogie zu der in Abschnitt 8.3 verwendeten Systematik. Zur Absicherung der in Abschnitt 8.4.3 dargestellten Resultate erfolgen zusätzliche Sensitivitätsuntersuchungen, die in Abschnitt 8.4.4 ausgewertet werden. Abschnitt 9.1.2 enthält abschließend eine komprimierte Form der Ergebnisse, die zugehörigen ASET-Werte und eine kritische Bewertung der Schlussfolgerungen.

8.4.1 Initialbrand im unteren Deck »2L«

Abbildung 8.23 zeigt die zeitlichen Verläufe der Wärmefreisetzungsraten für die Simulationen, bei denen sich das brennende Gepäckstück in einer Sitzgruppe im unteren Deck befindet. Die variierten Ventilationskonditionen nehmen an dieser Stelle keinen nennenswerten Einfluss. In der dritten Minute nach Brandbeginn entzünden sich Teile des Fahrgastsitzes, auf dem das Gepäckstück platziert ist und einzelne Bereiche der Seiten- sowie der Deckenverkleidung. Das Maximum der Wärmefreisetzungsrates dieses Szenarios liegt in der vierten Brandminute bei 404 kW und damit mehr als drei Mal so hoch wie die Wärmeleistung des Initialbrandes von 120 kW (vgl. rechte Seite in Abbildung 8.22). Allerdings klingt der Brand von diesem Zeitpunkt an wieder ab und nach der 22sten Minute leisten die brennbaren Fahrzeugkomponenten keinen weiteren Beitrag zum Brandgeschehen und die nachfolgende Wärmefreisetzung ist einzig dem Zündinitial zuzuordnen. Demgemäß findet keine weitere Brandausbreitung statt und die als brennbar modellierten Fahrzeugkomponenten zeigen sich eine selbstverlöschende Charakteristik.

Im Wesentlichen verhält sich die Verteilung der Rauchgase innerhalb des Doppelstockwagens vergleichbar zu den Simulationen mit inerten Fahrzeugmaterialien⁸³. Allerdings führt in diesem Fall die erhöhte Wärmefreisetzung dazu, dass die Rauch-

⁸² vgl. Abschnitte 8.1.4 und 8.1.13

⁸³ vgl. Abschnitt 8.3.1

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

gase in den ersten Brandminuten zunächst verstärkt ins obere Deck strömen und sich die nahezu homogene Rauchgasverteilung im Innenraum erst zeitlich verzögert einstellt (vgl. Abbildung 8.22 sowie nachfolgenden Absatz).

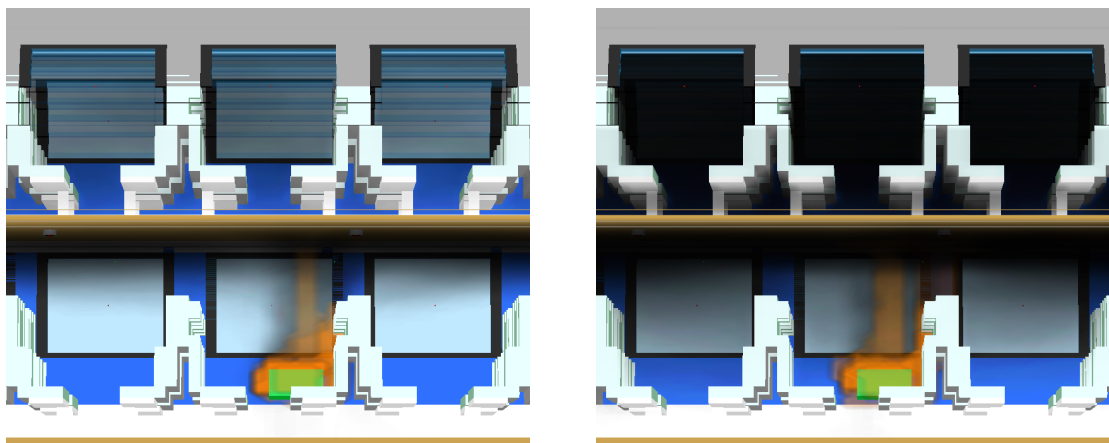


Abbildung 8.22: Simulation »2LC« bei $t = 180$ s (links) und $t = 235$ s (rechts)

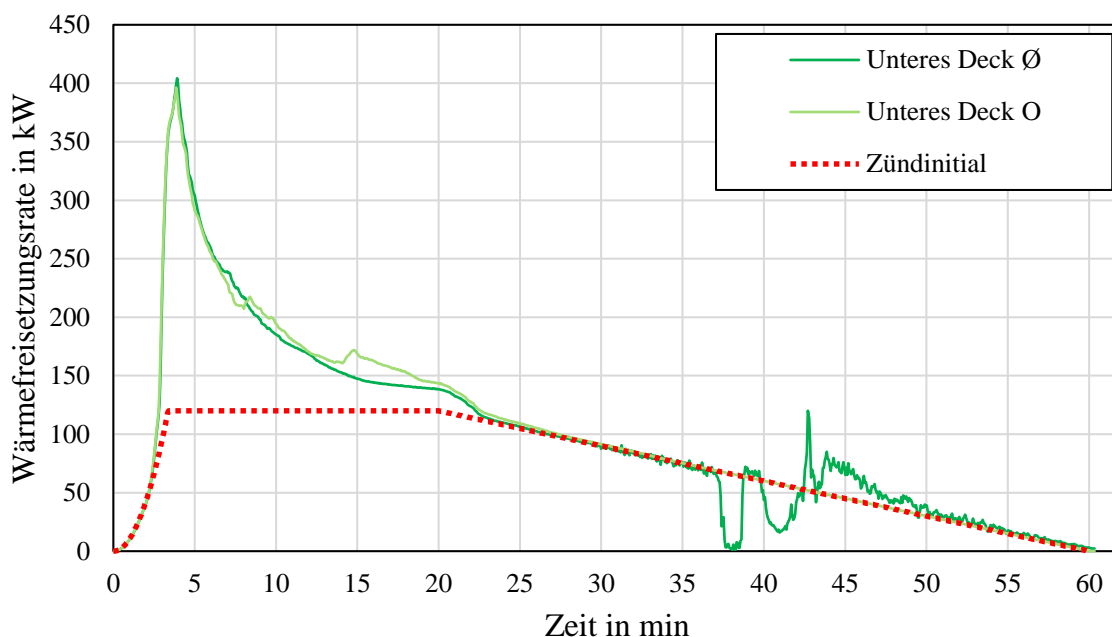


Abbildung 8.23: Wärmefreisetzungen der Simulationen »2L« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Aus Abbildung 8.24 geht hervor, dass sich die toxikologisch relevanten Brandemissionen im Wageninnenraum relativ gleichmäßig verteilen. Das ist anhand der sehr ähnlich verlaufenden Gehalte der Indikatoren FED und FEC für die einzelnen Wagenbereiche gut erkennbar. Im Vergleich zu den Simulationen ohne hinterlegten

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Pyrolyseansatz für die brennbaren Fahrzeugkomponenten wird in den vorliegenden Simulationen bei geschlossener Wagenendtür der Grenzwert von 0,1 für die FED in allen Bereichen zwischen der zehnten und elften Minute nach Brandbeginn, also bereits ca. fünf Minuten eher erreicht. Bezüglich der FEC lassen sich keine signifikanten Veränderungen feststellen, was darauf zurückzuführen ist, dass für die brennbaren Fahrzeugkomponenten keine HCl-Freisetzung als Verbrennungsprodukt vorgesehen ist⁸⁴. Auch bei geöffneter Wagenendtür tritt der Dosis basierte toxische Effekt zeitlich eher und zwar im Zeitraum zwischen zwölf und 15 Minuten und damit ca. acht Minuten früher als bei den entsprechenden Simulationen mit inerten Fahrzeugmaterialien ein, wohingegen auch hier hinsichtlich der FEC zu keiner Zeit eine Grenzwertüberschreitung stattfindet.

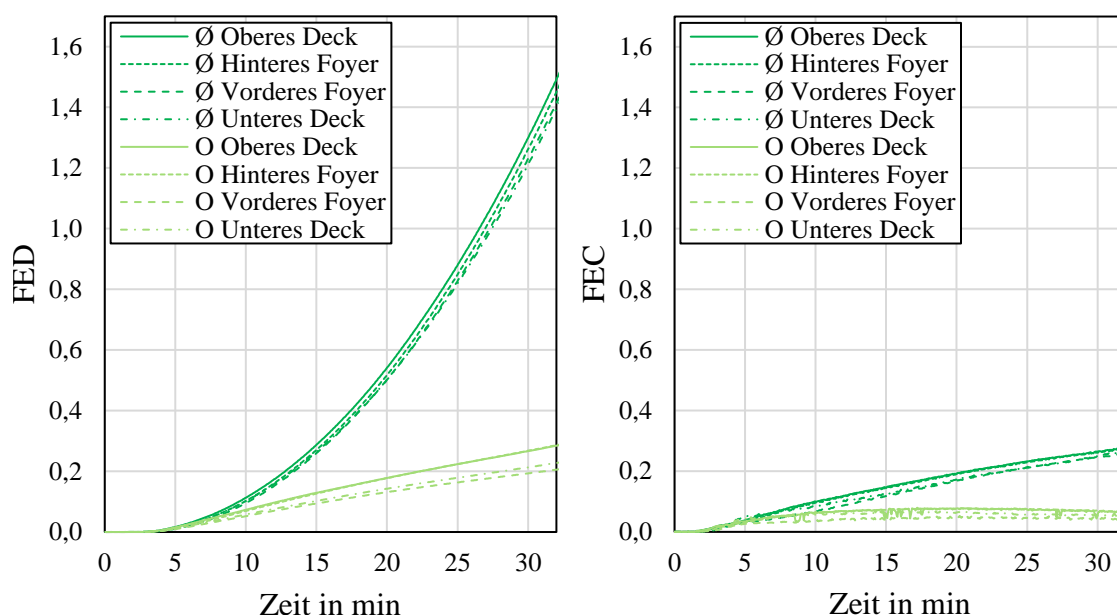


Abbildung 8.24: Rauchgastoxizität der Simulationen »2L«
mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Während sich die thermischen Erträglichkeitskriterien bei den Simulationen ohne hinterlegten Pyrolyseansatz für die brennbaren Fahrzeugkomponenten stets innerhalb der Grenzwerte bewegen⁸⁵, stellt sich die Situation für die vorliegenden Simulationen in Abbildung 8.25 anders dar: Der Grenzwert von 80 °C für die Lufttemperatur wird in beiden untersuchten Ventilationsvarianten in fast allen Fahrzeugbereichen im Zeitraum zwischen drei und vier Minuten nach Brandbeginn erreicht. Lediglich in der Simulation mit geöffneter Wagenendtür rangiert die

⁸⁴ vgl. Abschnitte 4.3.2 und 8.1.4

⁸⁵ vgl. Abschnitt 8.3.1

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Lufttemperatur im hinteren Foyer bis zur zehnten Minute geringfügig unterhalb der genannten Marke, die daraufhin ebenso überschritten wird. Auch die auftretende Strahlungsdichte übersteigt, zumindest am gewählten Messpunkt im unteren Deck, für beide Ventilationsbedingungen bereits in der vierten Brandminute den kritischen Wert von $2,5 \text{ kW/m}^2$ und wächst daraufhin rapide auf ein Vielfaches an. Im oberen Deck sowie im vorderen und hinteren Foyer verbleiben die Strahlungswerte unterhalb des Grenzwertes.

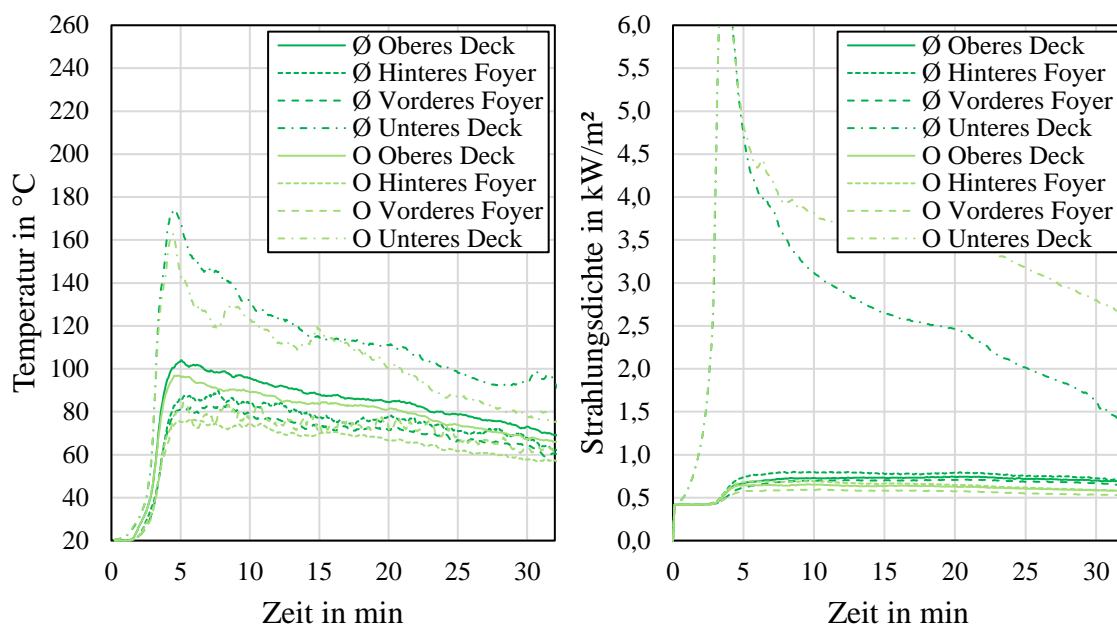


Abbildung 8.25: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulationen »2L« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

8.4.2 Initialbrand im oberen Deck »2U«

Auch bei der Platzierung des Zündinitials im oberen Deck lässt sich beobachten, dass sich Teile des Sitzes sowie der Wand- und Deckenverkleidung entzünden. Die maximale Wärmefreisetzungsrate stellt sich ebenfalls in der vierten Minute ein (vgl. Abbildungen 8.26, rechte Seite und 8.27). Dieses Maximum fällt mit 239 kW zwar immer noch doppelt so hoch aus wie die maximale Wärmefreisetzungsrate des brennenden Gepäckstückes, verglichen zur maximalen Wärmefreisetzungsrate von 404 kW im vorhergehenden Abschnitt ist dieser Wert jedoch deutlich geringer. Ein Grund dafür ist, dass das Seitenfenster im Oberdeck zehn Zentimeter tiefer als im Unterdeck angeordnet und dementsprechend eine kleinere Fläche der brennbaren Seitenverkleidung dem Initialbrand exponiert ist. Des Weiteren bestehen die oberen Bereiche der Seitenwandverkleidung im Oberdeck bereits aus

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

der Komponente »Deckenverkleidung«, welche gegenüber der »Wandverkleidung« ein besseres Brandverhalten besitzt⁸⁶. Demzufolge findet auch in den vorliegenden Simulationen keine signifikante Brandausbreitung statt und die mitbrennenden Fahrzeugkomponenten zeigen eine selbstverlöschende Wirkung.

Hinsichtlich des Strömungsverhaltens der Rauchgase bildet sich zunächst die bereits in Abschnitt 8.3.2 beschriebene Stratifizierung aus, bis es nach der elften bzw. zwölften Brandminute in den Simulationsvarianten mit beiden Ventilationskonditionen zum thermisch induzierten Versagen einer Fensterverglasung kommt⁸⁷. In beiden Fällen handelt es sich um ein mittleres Fenster auf der rechten Fahrzeugseite im oberen Deck, welches sich in unmittelbarer Nähe zum Initialbrand befindet. Diese neu geschaffene Ventilationsöffnung ermöglicht das Abströmen des Brandrauchs, was sich auch in den visuellen Darstellungen der Erträglichkeitsbedingungen bemerkbar macht (vgl. Abbildungen 8.28 und 8.29).

Allerdings ist bezüglich der Aussagekraft der Strömungsverhältnisse in den Simulationen zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuggeometrie nicht von einem außen anliegenden Geschwindigkeitsvektorfeld umgeben ist, das die relative Bewegung zwischen Fahrzeug und Umgebung respektive ein anliegendes Windprofil im Modell abbildet. Es ist anzunehmen, dass ein solches, aufgeprägtes Geschwindigkeitsfeld den Abströmprozess des Brandrauchs beeinflusst. Dieser Aspekt der numerischen Umsetzung wird auch bereits in Abschnitt 8.1.1 diskutiert.

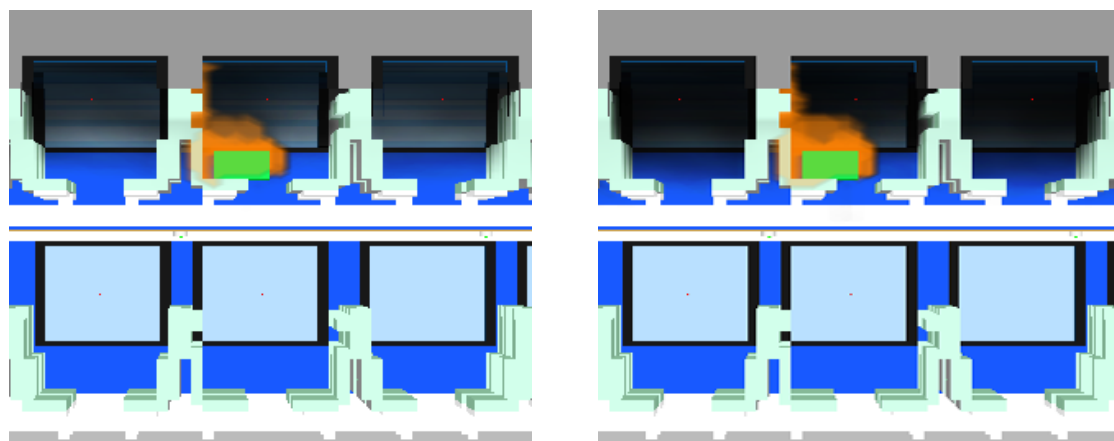


Abbildung 8.26: Simulation »2UC« bei $t = 180$ s (links) und $t = 200$ s (rechts)

⁸⁶ vgl. Abschnitte 8.1.4.2 und 8.1.4.3

⁸⁷ vgl. Abschnitt 8.1.6

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

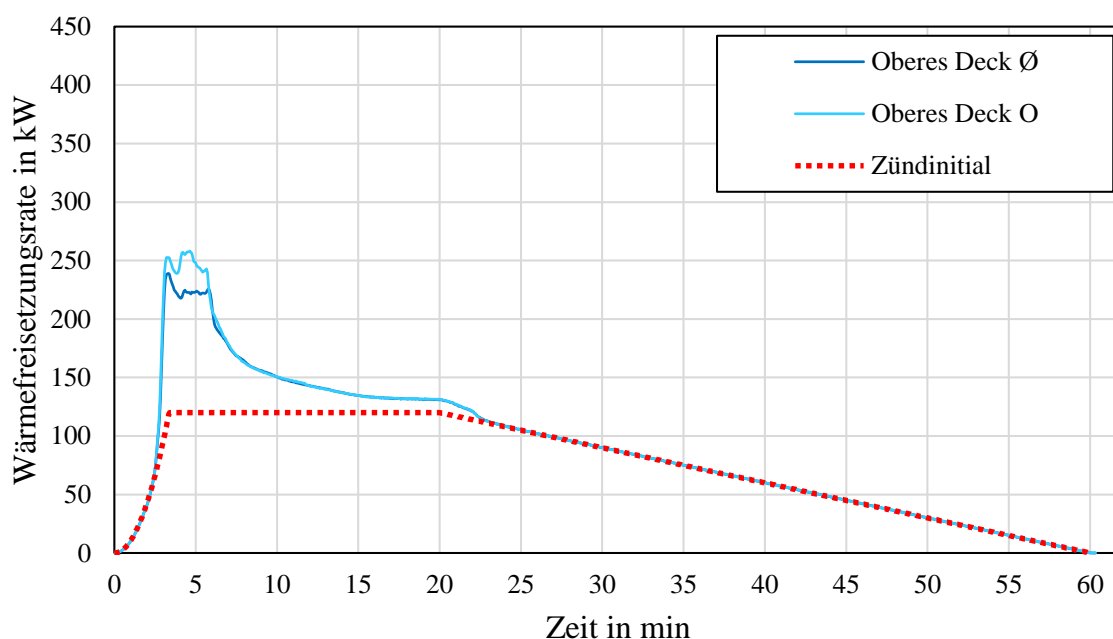


Abbildung 8.27: Wärmefreisetzungen der Simulationen »2U« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

In Bezug auf die toxischen Kriterien führen die nun als brennbar modellierten Fahrzeugkomponenten nur zu einer geringfügigen Verschärfung der Umstände: Während der Grenzwert von 0,1 von der FEC zu vergleichbaren Zeiten wie in Abschnitt 8.3.2 erreicht wird, treten die toxischen Effekte bei der FED zwischen zwei Minuten im oberen Deck und drei bis fünf Minuten in den Foyers eher ein. Auf die Erträglichkeitsbedingungen im unteren Deck ist nach wie vor kein Einfluss feststellbar. Ab ca. der zwölften Minute ist aufgrund des Fensterversagens und der resultierenden Rauchabströmung ein Abflachen der FED und ein Absinken der FEC zu erkennen.

Die zeitlichen Verläufe von Temperatur und auftreffender Strahlungsdichte in Abbildung 8.29 zeigen, dass auch hier die Kritizität der Umstände nur marginal zunimmt. Gegenüber den Simulationsvarianten mit nichtbrennbaren Fahrzeugkomponenten, werden bei den vorliegenden Simulationen die Erträglichkeiten im oberen Deck für die Temperatur bereits in der dritten und für die Strahlung in der vierten, also eine Minute früher erreicht. Währenddessen ist in den anderen Bereichen wiederholend keine Einschränkung der Erträglichkeit festzustellen. Aus den variierten Ventilationsbedingungen ergeben sich hinsichtlich der Beurteilung der Erträglichkeit gegenüber thermischen Einwirkungen keine Unterschiede.

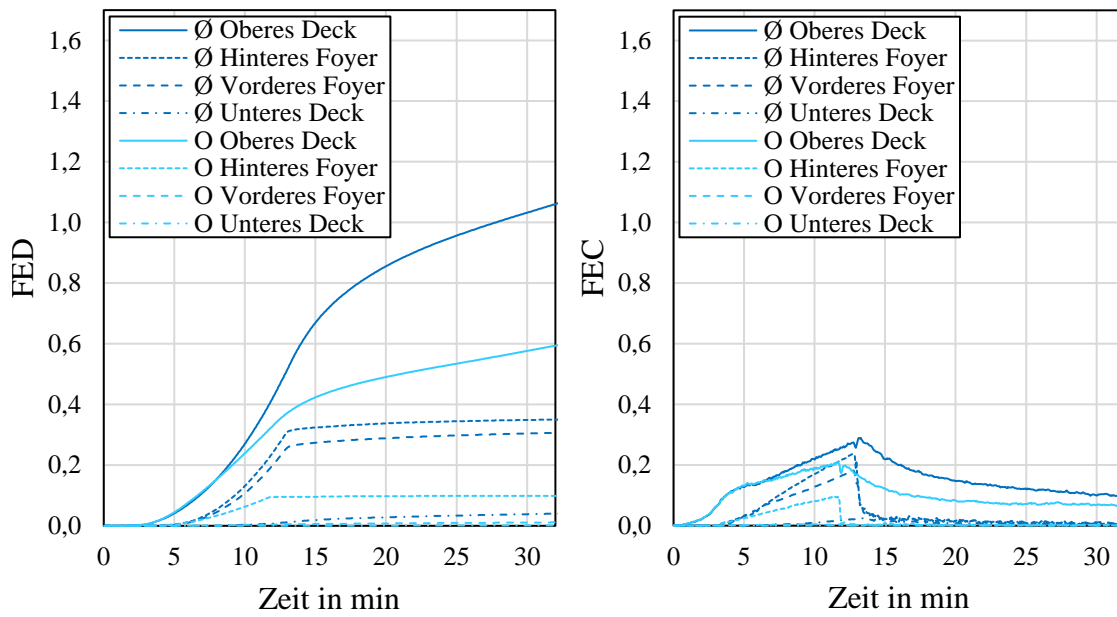


Abbildung 8.28: Rauchgastoxizität der Simulationen »2U« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

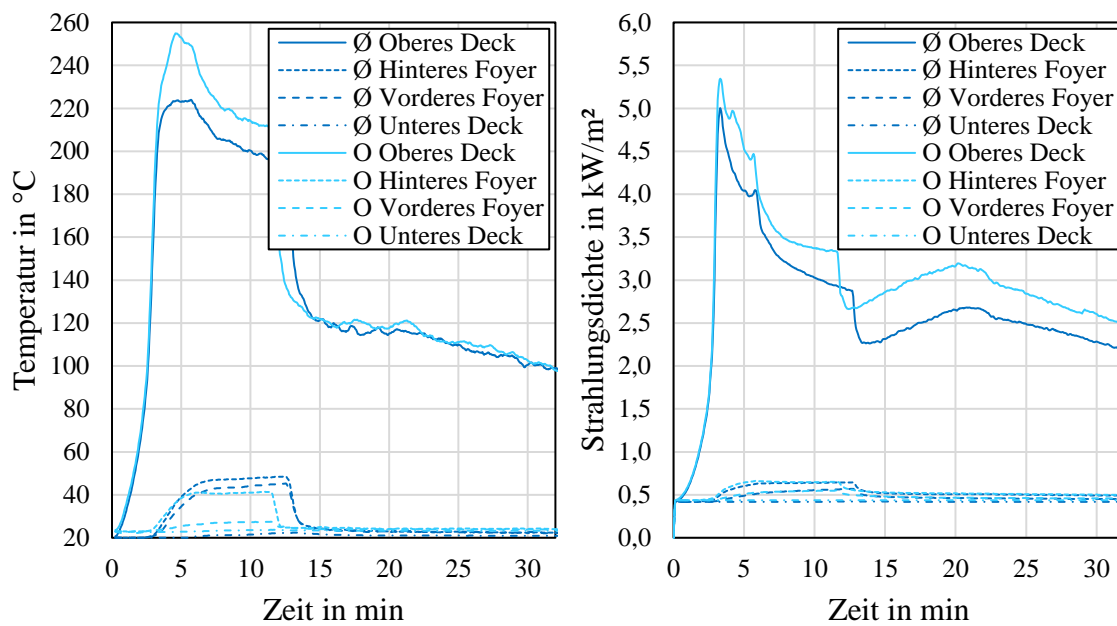


Abbildung 8.29: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulationen »2U« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür⁸⁸

⁸⁸ In diesen Simulationen beträgt die Start- und Umgebungstemperatur 23 °C anstatt 20 °C.

8.4.3 Initialbrand im eingeschossigen Bereich »2F«

Die Szenarien, in denen das Gepäckstück als Initialbrand im eingeschossigen Bereich an der Stirnseite des Wagens platziert und den brennbaren Fahrzeugkomponenten das Pyrolysemodell »2« zugeordnet ist, unterscheiden sich deutlich von allen bisher ausgewerteten Szenarien: In diesen Simulationen entzündeten sich ebenfalls Teile des Sitzes und der Seitenwandverkleidung, jedoch auch die brennbare Trennwand zum vorderen Foyer. Wenig später entzündet sich außerdem die Deckenverkleidung und bereits drei Minuten nach Brandbeginn kommt es zum *Flashover* im vorderen Wagenabschnitt. Noch vor Ablauf der vierten Minute erfolgt ebenfalls die Zündung der Rauchgase sowohl im unteren als auch im oberen Deck. Aus diesem Grunde findet sich in Abschnitt 8.4.4, im Anschluss an die Erträglichkeitsbetrachtungen der toxischen und thermischen Einwirkungen, eine ergänzende Studie, in der die Sensitivität verschiedener Eingangsparameter besonders im Hinblick auf die vorliegenden Simulationsergebnisse untersucht wird.

Abbildung 8.30 zeigt das Szenario zum Zeitpunkt des Flashovers bei einer Wärmefreisetzungsrate von 1.108 kW (links) und bei einer Wärmefreisetzungsrate von 5.899 kW (rechts). Die Verlaufskurven der Wärmefreisetzungsraten sind in Ausschnitten in Abbildung 8.31 dargestellt und zeigen, dass die Ventilationsbedingungen auf die Brandentwicklung keinen nennenswerten Einfluss nehmen. Der gewählte Datenbereich der Ordinatenachse beschränkt sich dabei bewusst auf die Brandentwicklungsphase. Das erklärt sich dadurch, dass das vorliegende Simulationsmodell nicht zur Abbildung eines voll entwickelten Fahrzeugbrandes vorgesehen ist: Die in Abschnitt 8.1.4 beschriebenen Materialparameter definieren lediglich das Brandverhalten der freiliegenden Oberflächen. Im weiterentwickelten Brandstadium müssten jedoch auch die Verbrennungsreaktionen dahinter liegender Schichten, wie beispielsweise von Dämmstoffen oder elektrischen Leitungen, betrachtet werden. Dementsprechend lässt sich das Simulationsmodell an dieser Stelle nicht valide für Prognosen von Brandverläufen nach einer Durchzündung des Fahrzeuges verwenden.

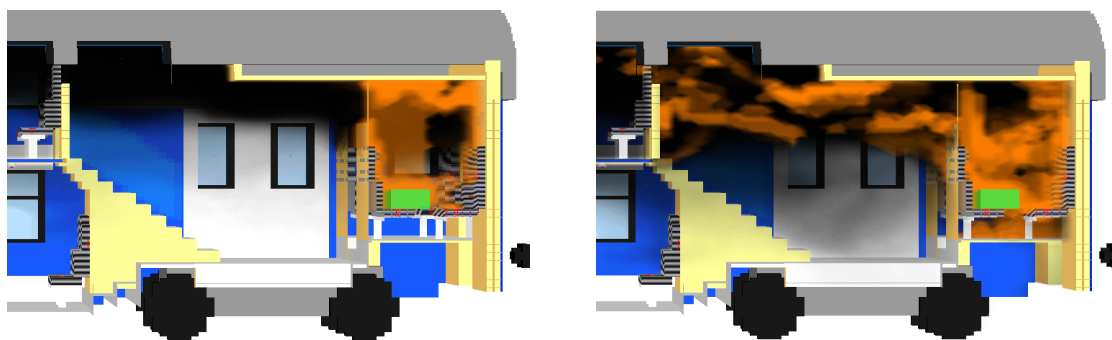


Abbildung 8.30: Simulation »2FC« bei $t = 200$ s (links) und $t = 215$ s (rechts)

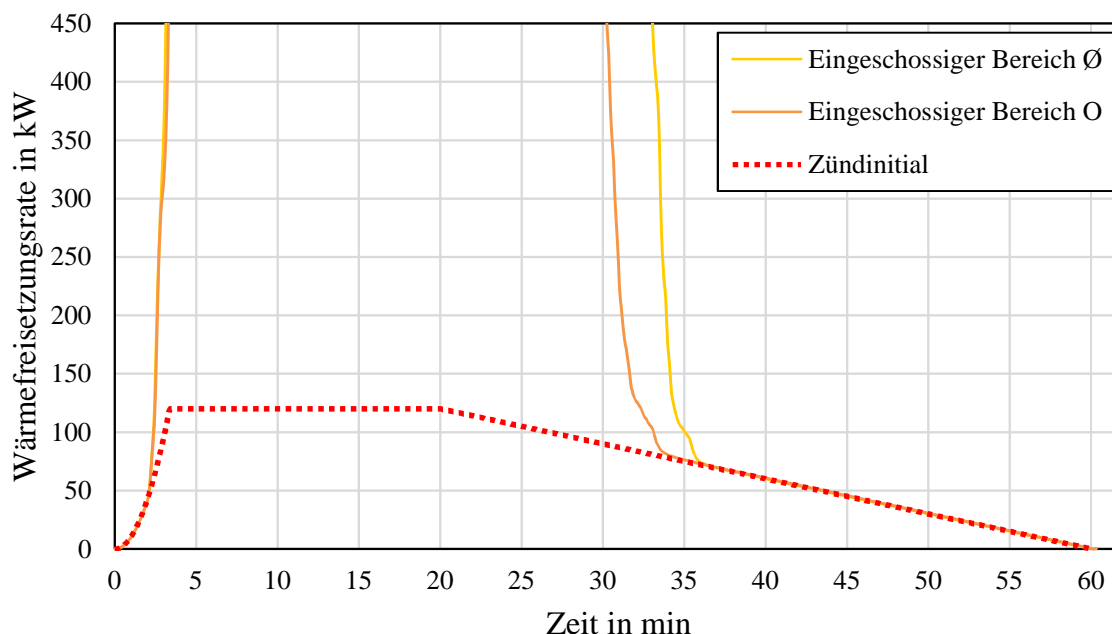


Abbildung 8.31: Wärmefreisetzungen der Simulationen »2F« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Aufgrund der rapiden Brandausbreitung findet die Betrachtung der Toxizitätskriterien für die vorliegenden Szenarien eher der Vollständigkeit halber statt. Die fraktionelle effektive Dosis befindet sich innerhalb der ersten vier Brandminuten unterhalb des Grenzwertes von 0,1. Infolge der dann auftretenden Durchzündung steigt die toxische Dosis in allen Bereichen annähernd simultan in Dimensionen, die sich außerhalb jeder Erträglichkeit befinden. Der FEC ist an dieser Stelle kein signifikanter Anteil zuzuordnen, da die HCl-Freisetzung ausschließlich durch den Initialbrand erfolgt⁸⁹ und sich dieser nach kurzer Zeit im Vergleich zu den brennenden Fahrzeugkomponenten als vernachlässigbar herausstellt.

⁸⁹ vgl. Abschnitte 4.3.2 und 8.1.4

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

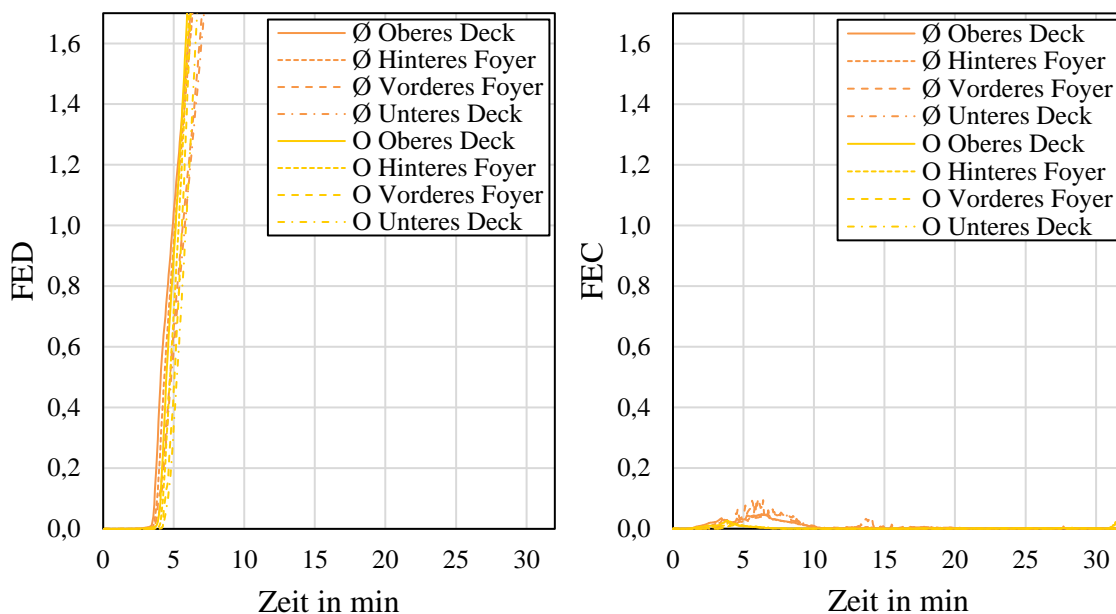


Abbildung 8.32: Rauchgastoxizität der Simulationen »2F« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Auch in Bezug auf die thermischen Einwirkungen ist an dieser Stelle keine detaillierte Ergebnisauswertung erforderlich. Sowohl die Temperaturen als auch die auftreffenden Strahlungsdichten überschreiten in allen Fahrzeugbereichen nach drei bzw. vier Minuten die Grenzen der Erträglichkeit (vgl. Abbildung 8.33).

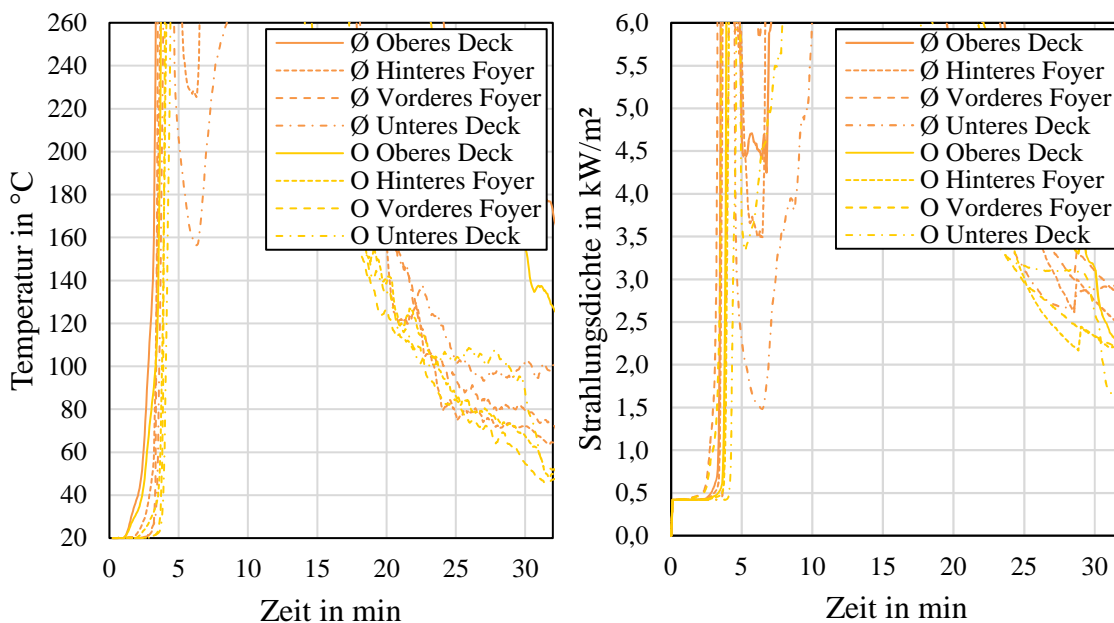


Abbildung 8.33: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulationen »0L« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

8.4.4 Sensitivitätsuntersuchungen

Die in Abschnitt 8.4.3 dargestellten Simulationen stellen sich als besonders brisant dar: Als Folge des frühen Auftretens eines Flashovers mit anschließender Rauchgasdurchzündung werden die Konditionen für potentiell anwesende Personen in allen Wagenbereichen schon innerhalb der ersten fünf Brandminuten unerträglich. Dieser Abschnitt verfolgt daher die Intention, die Einflussgrößen herauszuarbeiten, die diesen Brandverlauf entstehen lassen respektive begünstigen und zu untersuchen, worin der signifikante Unterschied zu den in den Abschnitten 8.4.1 und 8.4.2 betrachteten Szenarien besteht, bei denen das Brandereignis selbstverlöschend endet. Hierbei gilt es, zunächst zu differenzieren, worin sich die jeweiligen Szenarien unterscheiden und daraufhin die aufgedeckten Parameter in einer zusätzlichen Serie von Simulationen systematisch zu variieren.

In allen Simulationsvarianten befindet sich das brennende Gepäckstück, das als Zündinitial fungiert, auf der Sitzfläche eines Fahrgastsitzes, welcher wiederum in einer Vierergruppe angeordnet ist. Gegenüber dem unteren und dem oberen Deck zeichnet sich der eingeschossige Bereich zum einen durch geometrische Unterschiede und auch durch eine höhere Brandlastdichte aus:

- Neben dem Gepäckstück befindet sich auf der rechten Fahrzeugseite im eingeschossigen Bereich ein erheblich schmaleres Fenster und dementsprechend eine ca. 60 cm breitere Fläche mit brennbarer Seitenverkleidung als bei den Simulationen mit dem Gepäckstück im unteren bzw. oberen Deck, was eine größere vorhandene Brennstoffmenge in unmittelbarer Nähe zum Initialbrand darstellt (vgl. Abbildung 8.34).
- Des Weiteren sind in beiden Decks hinter der Sitzgruppe mit dem Gepäckstück in beide Richtungen weitere Sitze angeordnet. Im eingeschossigen Bereich befinden sich vor der betreffenden Sitzgruppe die brennbaren Trennwände zum Foyer und dahinter das vordere Wagenende, das ebenfalls anteilig als brennbar modelliert ist. Folglich liegt hier eine weitere Brandlasterhöhung vor.
- Zudem formen die quer zur Fahrtrichtung verlaufenden Abtrennungen eine Art Subvolumen innerhalb des Wagens, das zwar auf der einen Seite eine Durchgangsöffnung zum Foyer und auf der anderen Seite, entsprechend der modellierten Ventilationsbedingungen, die geöffnete Endwagentür enthält. Trotzdem stellen diese Abtrennungen gewisse Barrieren hinsichtlich der Rauchausbreitung dar, die in den beiden Decks nicht vorhanden sind.

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

Die aufgezeigten Unterschiede in der geometrischen Konfiguration führen dazu, dass im eingeschossigen Bereich zum einen die dem Initialbrand exponierte brennbare Gesamtoberfläche bedeutend größer ist als in den beiden Decks und eine vertikale Brandausbreitung leichter stattfinden kann. Zum anderen trägt der sich unter der Decke stauende Brandrauch durch die von ihm emittierte Wärmestrahlung zusätzlich zur thermischen Aufbereitung der brennbaren Oberflächen bei und beschleunigt deren Entzündung. Es treffen an dieser Stelle also mehrere brandtechnologische Faktoren zusammen, die eine Aufheizung dieses Bereiches begünstigen, was sich in einem Flashover äußert.

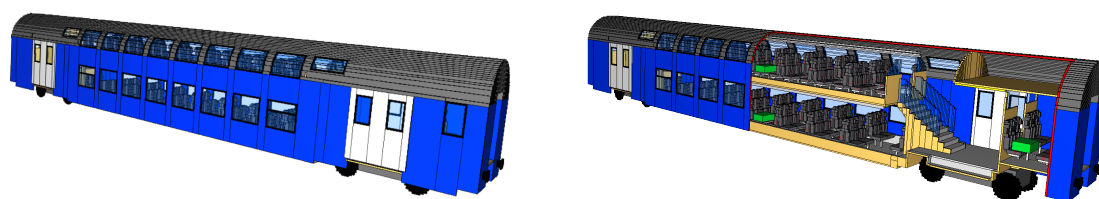


Abbildung 8.34: Fahrzeuggeometrie: Außenansicht (links) und Schnittansicht (rechts)

Bei den korrespondierenden Simulationen werden die zuvor erläuterten potentiellen Einflussgrößen sukzessive modifiziert und die Auswirkungen auf die Ergebnisse analysiert. Eine Übersicht über die untersuchten Simulationsvarianten findet sich in Tabelle 8.15. Die Beurteilung der Brandausbreitungscharakteristik für die Szenarien erfolgt anhand der maximalen Wärmefreisetzungsrate. Hierbei werden Wärmefreisetzungsraten größer als 1.000 kW dem Übergang vom lokalen Brand zum Vollbrand gleichgesetzt.

Zunächst wird die Geometrie des eingeschossigen Bereiches dahingehend modifiziert, stärkere Ähnlichkeit zu den Bedingungen im unteren und oberen Deck herzustellen, indem in der Simulation »2FCCOu« die ursprünglich schmalere Seitenfenster in normaler Breite modelliert oder in Simulation »2FCCOy« die Trennwände zum Foyer als nichtbrennbar bzw. diese Trennwände in der Variante »2FCCOz« vollständig entfernt werden. Eine Begrenzung der Brandausbreitung lässt sich mit diesen Einzelmaßnahmen jedoch nicht erreichen. Erst in dem Zusammenwirken zweier Modifikationen, nämlich mit normal breitem Seitenfenster und nichtbrennbaren Trennwänden zum Foyer bzw. ohne Trennwände zum Foyer (»2FCCOt«, »2FCCOs«) lassen sich entsprechende Erfolge erzielen.

Daraufhin wird in den Simulationen »2FCCOx« und »2FOCOx«, also für beide

Ventilationskonditionen, die Deckenverkleidung als nicht brennbar dargestellt, um einen möglichen Zusammenhang zwischen dem Entzünden größerer Deckenbereiche und dem Auftreten eines Flashovers zu prüfen. Hierbei zeigt sich, dass in der Variante mit geschlossener Endwagentür trotzdem eine zeitnahe Durchzündung stattfindet. In der Simulation mit geöffneter Endwagentür jedoch der Brand nach dem Erreichen einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von 738 kW in der fünften Brandminute wieder abklingt. Die durch die geöffnete Endwagentür abströmenden Rauchgase sind demnach ein wichtiger Faktor, der hier zur thermischen Entlastung des Bereiches beiträgt. Bei geschlossener Endwagentür und nichtbrennbarer Deckenverkleidung lässt sich eine thermische Aufbereitung dieses Subvolumens und der Flashover erst vermeiden, wenn zusätzlich die Trennwände zum vorderen Foyer nichtbrennbar sind, wie Simulation »2FCCOw« belegt.

Des Weiteren wird untersucht, welche Parametervariationen erforderlich sind, um auch im oberen Deck einen Flashover herbeizuführen. In diesem Zusammenhang erfolgt sukzessive eine geometrische Annäherung der betreffenden Sitzgruppe im oberen Deck an die Gegebenheiten im eingeschossigen Bereich: Die Simulation »2UCCOu« demonstriert, dass der Austausch des normalbreiten Fensters nahe dem Initialbrand gegen ein schmaleres Fenster und eine entsprechend breitere Seitenwandverkleidung bereits vier Minuten nach Brandbeginn zum Flashover im oberen Deck führt. Auch brennbare Trennwände mit einer Öffnung in Breite des Mittelganges hinter dem Fahrgastsitz, auf dem der Initialbrand platziert ist, haben eine rasche Durchzündung im Oberdeck zur Folge (vgl. Simulation »2UCCOt«). Demgegenüber stehen die Varianten »2UCCOs« und »2UCCOv«, bei denen die bereits beschriebene Trennwand jeweils als nichtbrennbar ausgeführt und entweder mit Durchgangsöffnung oder ohne Durchgangsöffnung realisiert wird. Beide Simulationen erreichen maximale Wärmefreisetzungsraten von 249 kW bzw. 274 kW nach vier Minuten, bevor der Brand wieder abklingt.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen gibt es zwei Parameter, denen signifikante Einwirkungen auf das resultierende Brandverhalten nachzuweisen ist:

- Primär ist hier die Größe und Anzahl der exponierten Flächen, denen das Brandverhalten der Seitenwandverkleidung zugeordnet ist, anzuführen. So sind im unteren und oberen Deck ursprünglich vergleichsweise kleine Flächen mit brennbarer Seitenverkleidung nahe des Initialbrandes vorhanden, wohingegen sich im eingeschossigen Bereich mehr und größere Flächen mit der genannten Brandcharakteristik befinden, die dem dort platzierten Initialbrand exponiert sind. Durch

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

die Reduktion dieser brennbaren Flächen im eingeschossigen Bereich mit dem dort befindlichen Zündinitial lässt sich ein frühzeitiger Flashover verhindern. Demgemäß führt das Hinzufügen entsprechend brennbarer Flächen im oberen Deck mit dem dort positionierten Zündinitial nach kurzer Zeit auch in diesem Bereich zu einem Flashover innerhalb weniger Minuten.

- An zweiter Stelle steht die geometrische Konfiguration im Bereich des Initialbrandes, die entweder ein freies Abströmen des Brandrauches nach außen bzw. eine rasche Verteilung innerhalb des Wagens begünstigt, oder Gegenteiliges, nämlich Stauung der freigesetzten thermischen Energie und damit die Aufheizung exponierter Oberflächen und eine schnellere Brandentwicklung begünstigt.

Tabelle 8.15: Übersicht über die ergänzenden⁹⁰ Simulationsvarianten

Name*	Modifizierter Parameter	Brandverhalten
2FCCOu	Normalgroßes Seitenfenster	HRR > 1000 kW nach 4 min
2FCCOs	Normalgroßes Seitenfenster; keine Trennwände zum Foyer	HRR _{max} = 228 kW nach 3 min
2FCCOt	Normalgroßes Seitenfenster; nichtbrennbare Trennwände zum Foyer	HRR _{max} = 226 kW nach 3 min
2FCCOy	Nichtbrennbare Trennwände zum Foyer	HRR > 1000 kW nach 4 min
2FCCOz	Keine Trennwände zum Foyer	HRR > 1000 kW nach 5 min
2FCCOx	Nichtbrennbare Deckenverkleidung	HRR > 1000 kW nach 4 min
2FOCOx	Nichtbrennbare Deckenverkleidung	HRR _{max} = 738 kW nach 4 min
2FCCOw	Nichtbrennbare Deckenverkleidung; keine Trennwände zum Foyer	HRR _{max} = 290 kW nach 3 min
2UCCOu	Schmales Seitenfenster im Oberdeck	HRR > 1000 kW nach 4 min
2UCCOt	Brennbare Trennwand mit Durchgangsöffnung im Oberdeck	HRR > 1000 kW nach 4 min
2UCCOs	Nichtbrennbare Trennwand mit Durchgangsöffnung im Oberdeck	HRR _{max} = 249 kW nach 4 min
2UCCOv	Nichtbrennbare, Trennwand ohne Durchgangsöffnung im Oberdeck	HRR _{max} = 274 kW nach 4 min

* Die Kennung basiert auf der Systematik in Tabelle 8.14

⁹⁰ Die regulären Simulationsvarianten finden sich in Abschnitt 8.1.13

8.5 Simulationsergebnisse – Pyrolysemethode »3«

Dieser Abschnitt fokussiert die Ergebnisse der Simulationen, bei denen für die brennbaren Wagenkomponenten Fahrgastsitze und Wandverkleidung das Pyrolysemodell »3« zugrunde liegt⁹¹. Im Gegensatz zu den im vorhergehenden Abschnitt ausgewerteten Simulationen berechnet FDS in diesem Fall den Quellterm der Brenngasmassenströme dieser Komponenten anhand vorgegebener kinetischer Parameter, die auf thermogravimetrischen Analysen basieren⁹².

Abbildung 8.35 gibt eine Übersicht über die Wärmefreisetzungsprofile der einzelnen Simulationen, die sich im Aufstellort und den vorherrschenden Ventilationsbedingungen unterscheiden. Zum Vergleich sind auch die Verläufe der Wärmefreisetzungsraten der Simulationen mit dem in Abschnitt 8.4 untersuchten Pyrolysemodell »2« dargestellt. Hierbei ist zu beobachten, dass sich einerseits die Kurven der einzelnen Simulationsvarianten mit dem Pyrolysemodell »3« untereinander stark ähneln und andererseits diese sowohl bezüglich der maximalen Wärmefreisetzungen als auch im Hinblick auf die insgesamt freigesetzte Wärme, weitestgehend unterhalb der mit dem Pyrolysemodell »2« generierten Vergleichsdaten verlaufen. Eine Wärmefreisetzungsrate von 230 kW wird in keiner Simulation überschritten, was bedeutet, dass die mitbrennenden Fahrzeugkomponenten in Summe stets eine geringere Brandintensität als der Initialbrand, dessen Anteil maximal 120 kW beträgt, aufweisen und sich alle betrachteten Szenarien als selbstverlöschend darstellen. Infolgedessen sind die vorliegenden Simulationsergebnisse insgesamt im Hinblick auf die Sicherheit anwesender Personen als weniger kritisch einzuordnen. Daraus lässt sich ableiten, dass eine detaillierte Auswertung hinsichtlich der Erträglichkeitskriterien keine weiterführenden Erkenntnisse erwarten lässt.

⁹¹ vgl. Abschnitt 8.1.13

⁹² vgl. Abschnitt 8.1.4

Kapitel 8 – Numerische Untersuchungen an einem Schienenfahrzeug

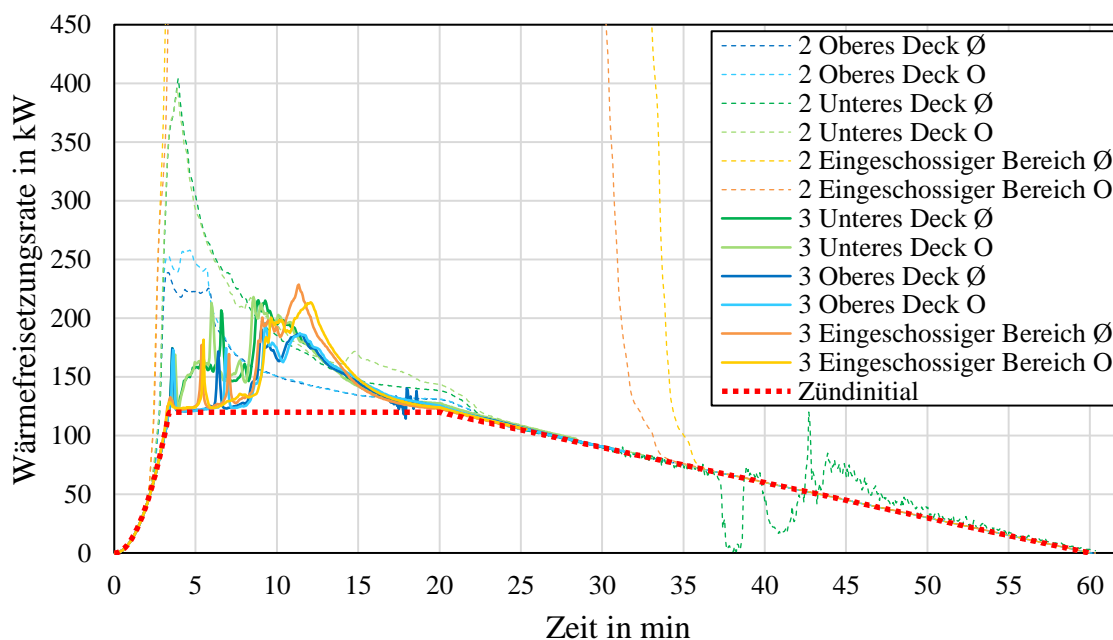


Abbildung 8.35: Wärmefreisetzungen der Simulationen »2« und »3« mit geschlossener (\emptyset) und geöffneter (O) Wagenendtür

In allen Szenarien breitet sich der Initialbrand hauptsächlich auf den Fahrgast-sitz aus, auf dem sich das brennende Gepäckstück befindet. Zeitweise brennen auch kleinere Bereiche der Wand- und Deckenverkleidung (vgl. Abbildung 8.36). Anhand der vergrößerten Darstellung der Wärmefreisetzungen in Abbildung 8.37 sind die spezifischen Charakteristika des gewählten Pyrolysemodells zu beobachten: Die Profile der Wärmefreisetzungen kennzeichnen sich bei allen Simulationen durch drei Maxima, wovon die ersten beiden lanzenförmig verlaufen und sich das Dritte breiter ausgeprägt darstellt. In dieser Kontur lässt sich in erster Linie das Brandverhalten der übereinander angeordneten Materialien des hauptsächlich mit-brennenden Fahrgastsitzes erkennen: Die ersten beiden spitzförmigen Maxima entsprechen den seriell ablaufenden Verbrennungsreaktionen des Bezugstoffes und des Interliners, die innerhalb weniger Sekunden ablaufen (vgl. Abbildung 8.36, linke Seite). Das dritte Maximum repräsentiert daraufhin den Abbrand des Sitzpolsters (vgl. Abbildung 8.36, rechte Seite).

Bei den Szenarien, in denen sich der Initialbrand im unteren Deck befindet, ist zwischen der vierten und neunten Minute ein zusätzlicher Anstieg der Wärmefrei-setzungsrate festzustellen. Anhand von Probesimulationen mit nichtbrennbaren Fahrgastsitzen lässt sich zeigen, dass es sich bei diesem Maximum um den Mit-brand der Seitenwandverkleidung handelt, der bei den anderen Aufstellorten des Initialbrandes aufgrund der geringeren exponierten Seitenwandfläche nicht in die-

sem Maße stattfindet⁹³.

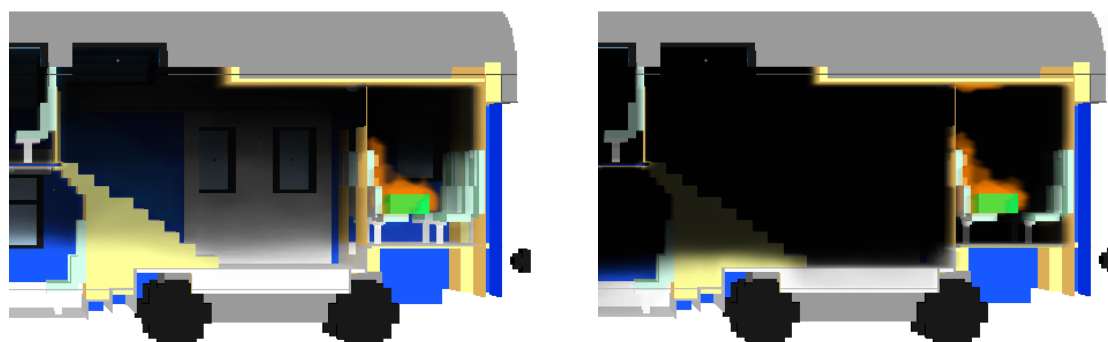


Abbildung 8.36: Simulation »3FC« bei $t = 322$ s (links) und $t = 681$ s (rechts)

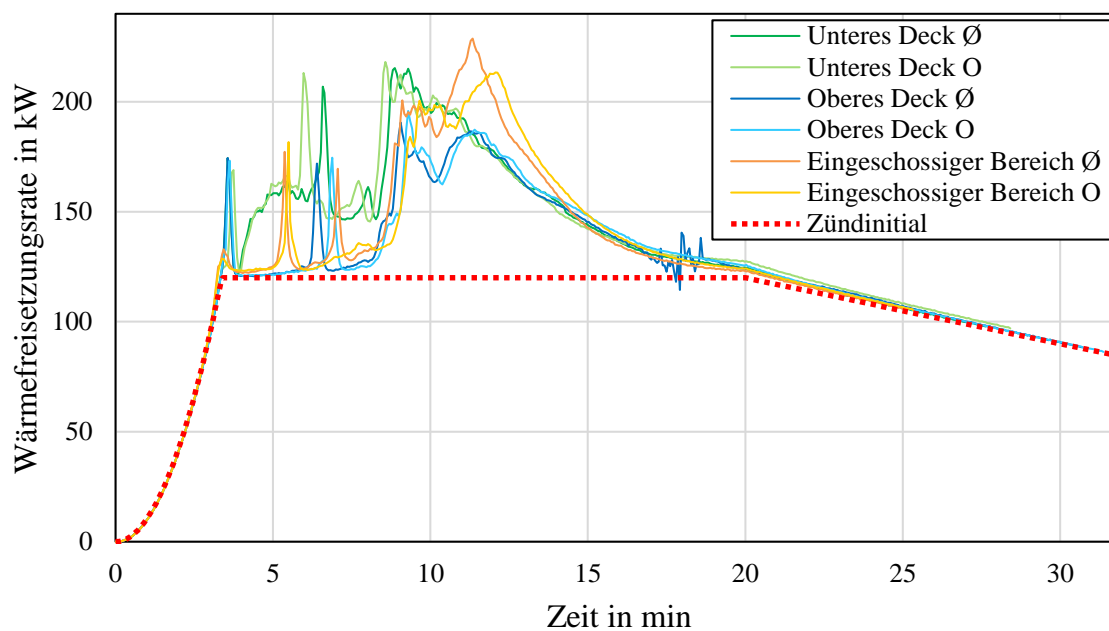


Abbildung 8.37: Wärmefreisetzungen der Simulationen »3« mit geschlossener (\emptyset) und geöffneter (O) Wagenendtür

⁹³ vgl. Abschnitt 8.4.2

Kapitel 9

Bewertung der Simulationsergebnisse und Ableiten von Empfehlungen und Maßnahmen

Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Hauptabschnitte: Nach der kritischen Diskussion der Simulationsergebnisse, die auch die Resultate der verschiedenen Modellierungsansätze und Eingangsparameter thematisiert, werden mögliche technische Maßnahmen und Empfehlungen entwickelt, um die Personensicherheit in Schienenfahrzeugen zu verbessern.

9.1 Einordnung und Bewertung der Simulationsergebnisse

Dieser Abschnitt fasst die in den Abschnitten 8.3 bis 8.5 dargestellten Ergebnisse der numerischen Untersuchungen zusammen. Für ausgewählte Szenarien werden die Zeitpunkte quantifiziert, zu denen die Grenzen der betrachteten Erträglichkeitskriterien erreicht werden und daraus entsprechende ASET-Werte¹ abgeleitet. Ferner werden die beiden in den Simulationen verwendeten Pyrolysemethoden diskutiert und anhand der jeweils zugrunde liegenden Modellannahmen bewertet.

9.1.1 Simulationen mit Pyrolysemethode »0«

Die Untersuchungen der Simulationen ohne implementierten Pyrolyseansatz für die brennbaren Fahrzeugkomponenten zeigen, dass sich sowohl die Position des Gepäckstückbrandes als auch die Ventilationsbedingungen auf die Rauchgasverteilung und folglich die Überlebensbedingungen innerhalb des Fahrzeuges signifikant auswirken: Je niedriger die Lage des Initialbrandes innerhalb des Wagens, desto länger ist die Wegstrecke, die der thermisch aufbereitete Brandrauch in den oberen Fahrzeugbereich zurücklegt und desto intensiver präsentiert sich der Vermischungsprozess mit der umgebenden Luft. Infolgedessen verteilt sich auch der Brandrauch nahezu homogen im Fahrzeug und die jeweiligen Erträglichkeitsgrenzwerte werden vergleichsweise spät erreicht. Im Gegensatz dazu formiert sich bei einem höher positionierten Initialbrand eine deutliche Stratifizierung innerhalb des Fahrzeuges, bestehend aus einer hochkonzentrierten Rauchgasschicht und der darunterliegenden raucharmen Schicht, da so gut wie keine Vermischungen stattfinden.

¹ vgl. Abschnitt 4.3

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Dementsprechend schnell übersteigen sowohl die toxischen als auch die thermischen Kriterien die Erträglichkeitsgrenzen, zumindest im oberen Fahrzeugbereich.

Bezüglich der Ventilationsverhältnisse ist bei den Simulationen mit geöffneter Endwagentür aufgrund des anteiligen Ausströmens von Brandrauch im Allgemeinen ein weniger kritisches Szenario festzustellen. Trotzdem sind in diesem Zusammenhang die bereits diskutierten Betrachtungen hinsichtlich der Übertragbarkeit der zugrunde liegenden Randbedingungen auf die Realanwendung zu berücksichtigen².

Tabelle 9.1 fasst für die analysierten Simulationen, zunächst aufgeschlüsselt nach den toxischen und thermischen Beurteilungskriterien, die Zeitpunkte des Erreichens der Erträglichkeitsgrenze zusammen. Dabei ergibt sich der Wert der für die sichere Flucht verfügbaren Zeit (ASET) anhand des Kriteriums, dessen Erträglichkeit am ehesten überschritten wird. Neben dem Grenzwert von 0,1, der der Fluchtunfähigkeit von 1,1 % der exponierten Individuen entspricht, erfolgt die Ermittlung von ASET für die Toxizitätskriterien FED und FEC auch basierend auf dem Grenzwert von 0,3, dem eine Fluchtunfähigkeit von 11,4 % der exponierten Individuen gleichzusetzen ist³. Im Sinne der Aufgabenstellung, die vorherrschenden Bedingungen innerhalb des Fahrzeuges darzustellen, ist eine Ermittlung der ASET-Werte pro Sensor (insg. 16 Sensoren) bzw. pro einzeltem Wagenbereich nicht zielführend. Stattdessen wird der Zeitpunkt, zu dem die Erträglichkeitsgrenze in einem der vier Wagenbereiche erreicht wird, als konservatives Ergebnis für das jeweilige Szenario angegeben. Entsprechende Detailauswertungen finden sich in den Abschnitten 8.3.1 bis 8.3.3 und als Diagramme mit allen Messstellen in Anhang B.3.

² vgl. Abschnitte 8.1.7 und 8.3.1

³ vgl. Abschnitte 4.3.2 und 8.3

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Tabelle 9.1: ASET für die Simulationen mit Pyrolysemethode »0«

Kriterium	ASET pro Simulation und Kriterium in Minuten					
	0LCCO	0LOCO	0UCCO	0UOCO	0FCCO	0FOCO
FED _{0,1}	14	19	9	9	12	20
FED _{0,3}	23	–	14	15	19	41
FEC _{0,1}	10	–	4	4	8	–
FEC _{0,3}	–	–	14	21	30	–
Temperatur _{80 °C}	–	–	3	3	4	–
Strahlung _{2,5 kW/m²}	–	–	–	–	–	–
ASET _{Tox.=0,1 & Therm.}	10	19	3	3	4	20
ASET _{Tox.=0,3 & Therm.}	23	–	3	3	4	41

Die Ergebnisse belegen, dass es nicht möglich ist, für die Quantifizierung der Erträglichkeit ein einzelnes Kriterium zu identifizieren. Vielmehr sind es die jeweiligen Simulationsrandbedingungen, die entweder die toxisch wirksame Dosis oder die Konzentration bzw. die Höhe der Lufttemperaturen als Kriterium zur Bestimmung des Zeitpunktes einer Fluchtunfähigkeit definieren. Losgelöst von dem letztendlich ausschlaggebendem Kriterium ist festzuhalten, dass die ermittelten Werte der für eine sichere Flucht verfügbaren Zeiten teilweise erheblich unterhalb des Zeitraumes von fünfzehn Minuten liegen, den das Fahrzeug in der zugrunde liegenden Szenariovorstellung maximal benötigt, um einen sicheren Ort zu erreichen, an dem eine Evakuierung durchführbar ist⁴. Das bedeutet, dass, basierend auf den Ergebnissen der experimentellen und numerischen Untersuchungen, ein brennendes Gepäckstück – ohne die Beteiligung anderer brennbarer Komponenten – dazu führen kann, dass die Atmosphäre innerhalb der betrachteten Fahrzeuggeometrie die Erträglichkeitsgrenzen für Personen überschreitet, bevor das Fahrzeug an einem sicheren Ort angekommen und die Evakuierung abgeschlossen ist.

9.1.2 Simulationen mit Pyrolysemethode »2«

Anhand der Simulationen, bei denen den brennbaren Fahrzeugkomponenten die Pyrolysemethode »2« zugeordnet ist, lässt sich beobachten, dass sich die dem Initialbrand nächstgelegenen Komponenten, wie Fahrgastsitz und Seitenwandverkleidung, nach einigen Minuten entzünden. In der überwiegenden Anzahl der Fälle hält sich deren Beitrag zum Brandereignis jedoch in Grenzen und das Szenario

⁴ vgl. Abschnitt 8.1.2

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

verläuft selbstverlöschend (vgl. Abbildung 9.1 sowie Abschnitte 8.4.1 bis 8.4.2). In Konfigurationen, die einerseits über eine in Summe große exponierte brennbare Oberfläche in direkter Nähe zum Initialbrand verfügen und andererseits eine Stauung des freigesetzten Brandrauches begünstigen, kann es nach wenigen Minuten zu einer raschen Brandausbreitung kommen (vgl. Abschnitt 8.4.3). Die zugehörigen Sensitivitätsuntersuchungen in Abschnitt 8.4.4 belegen diese Erkenntnis.

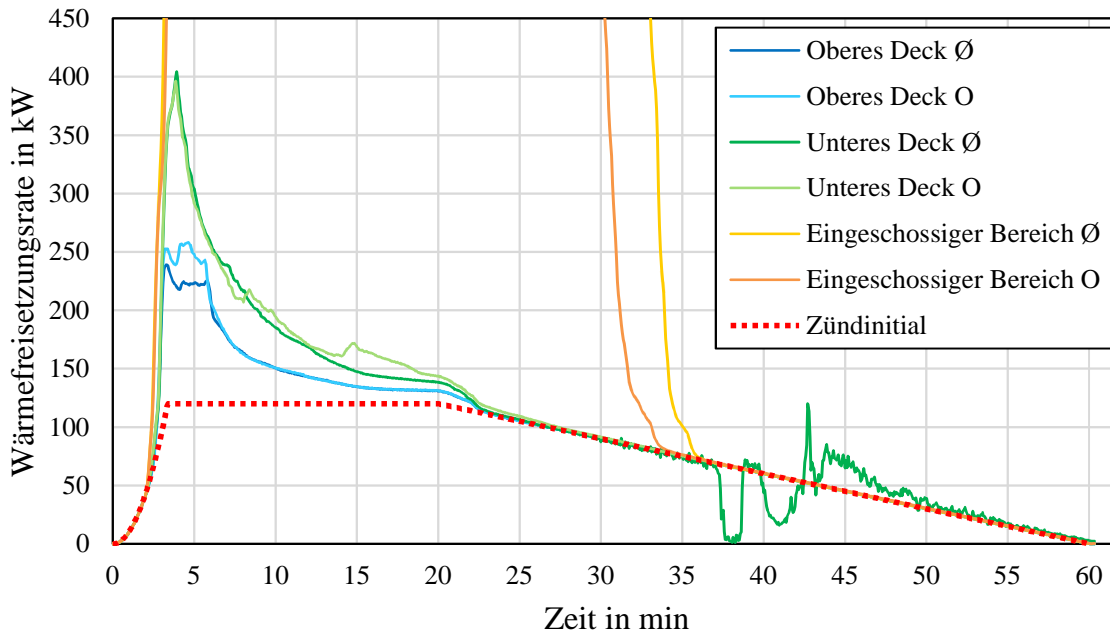


Abbildung 9.1: Wärmefreisetzungen der Simulationen »2« mit geschlossener (Ø) und geöffneter (O) Wagenendtür

Hinsichtlich der Erträglichkeitskonditionen verschärft sich auch bei geringem Mitbrand der Fahrzeugkomponenten zumeist die Situation gegenüber den Szenarien mit nichtbrennbaren Fahrzeugkomponenten, wie die in Tabelle 9.2 dargestellten ASET-Werte beweisen. Dabei geben die Indizes Aufschluss darüber, inwiefern sich der Zeitpunkt des Erreichens des jeweiligen Erträglichkeitskriteriums gegenüber den Szenarien ohne brennbare Fahrzeugkomponenten verschiebt: Die zeitliche Veränderung ist in Minuten angegeben, »0« bedeutet keine Veränderung, »-?« und »+?« sagen aus, dass sich die Situation gegenüber dem Referenzszenario verschlechtert bzw. verbessert, jedoch kein numerischer Zahlenwert angegeben werden kann, weil die Erträglichkeit in einem der beiden Szenarien nicht überschritten wird. Dass sich für das Kriterium der Fraktionellen Effektiven Konzentration teilweise eine Verbesserung einstellt, begründet sich in den spezifischen Modelleingaben⁵.

⁵ vgl. Abschnitt 8.4.1

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Tabelle 9.2: ASET für die Simulationen mit Pyrolysemethode »2«

Kriterium	ASET pro Simulation und Kriterium in Minuten					
	2LCCO	2LOCO	2UCCO	2UOCO	2FCCO	2FOCO
FED _{0,1}	9 (-5)	12 (-7)	7 (-2)	7 (-2)	4 (-8)	4 (-16)
FED _{0,3}	15 (-8)	33 (-?)	10 (-4)	11 (-4)	4 (-15)	4 (-37)
FEC _{0,1}	10 (0)	– (0)	4 (0)	4 (0)	– (+?)	– (0)
FEC _{0,3}	37 (-?)	– (0)	12 (-2)	– (+?)	– (+?)	– (0)
Temperatur _{80 °C}	3 (-?)	3 (-?)	2 (-1)	2 (-1)	3 (-1)	3 (-?)
Strahlung _{2,5 kW/m²}	3 (-?)	3 (-?)	3 (-?)	3 (-?)	3 (-?)	3 (-?)
ASET _{Tox.=0,1 & Therm.}	3 (-7)	3 (-16)	2 (-1)	2 (-1)	3 (-1)	3 (-17)
ASET _{Tox.=0,3 & Therm.}	3 (-20)	3 (-?)	2 (-1)	2 (-1)	3 (-1)	3 (-38)

Kritische Betrachtung der Pyrolysemethode »2«

Um das Brandverhalten der Fahrzeugkomponenten in FDS zu implementieren, werden in dieser Untersuchung zwei voneinander unabhängige Ansätze verwendet, die die Pyrolysemechanismen der brennbaren Oberflächen auf verschiedenen Modellierungsebenen nachbilden (siehe auch nachfolgenden Abschnitt). Die Gasfreisetzung der exponierten Brennstoffoberflächen erfolgt bei der Pyrolysemethode »2« über die Vorgabe des zeitabhängigen Quellterms mit dem Erreichen einer vordefinierten Zündtemperatur für jedes Flächenelement⁶. Das hierfür hinterlegte zeitabhängige Profil der Wärmefreisetzungsrate, aus dem FDS in Verbindung mit der materialspezifischen effektiven Verbrennungswärme den gewünschten gasförmigen Brennstoffmassenstrom berechnet, stammt aus kleinskaligen Brandversuchen, bei denen einzelne Materialproben im Cone Kalorimeter einer definierten Strahlungsdichte exponiert werden. Das heißt, dass der mit dieser Pyrolysemethode freigesetzte Brennstoffmassenstrom einzig von dem Erreichen der Zündtemperatur am Oberflächenelement abhängt und eine direkte Korrelation zur real auftretenden Strahlungsdichte nicht gegeben ist. Infolgedessen wird das reale Brandverhalten des betrachteten Oberflächenelementes entweder unter- oder überschätzt, da die in der Simulation auftretende Wärmestromdichte nie exakt der gewählten Bestrahlung der experimentellen Untersuchungen entspricht und in der Regel einer zeitlichen Änderung unterliegt [181]. Dieser Aspekt ist im Rahmen der Auswahl⁷ des hinterlegten Freisetzungspfils zu berücksichtigen. Anhand von Probesimula-

⁶ vgl. Abschnitt 7.1.4.1

⁷ Insofern eine Datenbasis mit verschiedenen Bestrahlungsintensitäten vorhanden ist

tionen lassen sich entsprechende Anhaltswerte für die am Flächenelement auftretende Strahlungsdichte generieren [31].

9.1.3 Simulationen mit Pyrolysemethode »3«

In einigen Simulationen wird für das Brandverhalten der Fahrgastsitze und der Seitenwandverkleidung die Pyrolysemethode »3« verwendet⁸. Dieser Ansatz zur Ermittlung des Brenngasmassenstromes bedeutet gegenüber der vorgenannten Methode »2« einen höheren Detaillierungsgrad der Modellierung. Das heißt, dass FDS den Quellterm anhand der Arrhenius-Gleichung direkt berechnet und dabei auf die vom Anwender vorgegebenen kinetischen Parameter und Reaktionspfade zurückgreift⁹.

Die für die einzelnen Szenarien generierten Wärmefreisetzungsprofile weisen untereinander keine wesentlichen Änderungen in Abhängigkeit vom Aufstellort des Initialbrandes im Fahrzeug oder den variierten Ventilationskonditionen auf. Bei allen untersuchten Szenarien fällt der Abbrand der beteiligten Fahrzeugkomponenten Fahrgastsitze und Seitenwandverkleidung geringer aus als bei den Simulationsvarianten, in denen die Pyrolysemethode »2« verwendet wird (vgl. Abbildung 8.35 in Abschnitt 8.5). Infolgedessen sind die Ergebnisse mit der Pyrolysemethode »3« hinsichtlich der Personensicherheit an Bord als weniger kritisch einzustufen und eine weitere Auswertung der Erträglichkeitsbedingungen ist demnach nicht zielführend.

Kritische Betrachtung der Pyrolysemethode »3«

Beide Methoden zur Modellierung der Feststoffpyrolyse mit dem Fire Dynamics Simulator wurden bereits im TRANSFEU-Projekt¹⁰ verwendet und anhand einer Serie mehrskalig angelegter Brandversuche experimentell validiert [52]. Die Modellierungsansätze unterscheiden sich maßgeblich im Prozess der Gewinnung und der Menge von Eingangsdaten und dem Modellierungsaufwand für die Simulation: Die für die Methode »2« benötigten thermophysikalischen Materialdaten sowie die Zündtemperatur und das flächenspezifische Wärmefreisetzungsprofil lassen sich aus branchenüblichen brandtechnologischen Testverfahren, wie dem Cone Kalorimeter generieren¹¹.

Dem gegenüber setzt die Methode »3« fundierte Kenntnisse über den Aufbau, die

8 vgl. Abschnitt 8.1.13

9 vgl. Abschnitt 7.1.4.2

10 vgl. Abschnitt 2.1.5

11 vgl. Abschnitte 7.1.4.1 und 8.1.4

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Struktur und die komplexen thermischen Zersetzungsmechanismen der als brennbar zu modellierenden Komponenten voraus [50]. Zudem erfordert die Methode »3« geeignete Eingangsdaten, basierend auf den Verfahren der Thermogravimetrie und der Differenzkalorimetrie sowie der anschließenden Anwendung eines mathematischen Optimierungsalgorithmus¹². Infolgedessen etabliert sich die Methode »2« mittlerweile als probater Ansatz im Rahmen ingenieurmäßiger Verfahren des Brandschutzes, während die Methode »3« weiterhin hauptsächlich wissenschaftlichen Anwendungen und Forschungszwecken unterliegt [49, 50].

9.1.4 Ergebnisbewertung im Kontext der Kernfragestellung

Die zweite Kernfragestellung dieser Forschungsarbeit lautet:

*Welchen Effekt hat ein Gepäckbrand
in einem Schienenfahrzeug hinsichtlich
a) der Personensicherheit und
b) der Brandausbreitung?*¹³

Zur Beantwortung dieser Frage wird das in den Kapiteln 5 und 6 entwickelte Brandmodell eines Gepäckstückes in Kapitel 7 numerisch umgesetzt und in Kapitel 8 als Initialbrand innerhalb der Geometrie eines Doppelstockwagens verwendet. In insgesamt 37 Simulationsvarianten wurden 24 unterschiedliche Brandszenarien analysiert und ausgewertet, um fundierte Aussagen treffen zu können:

a) zur Personensicherheit

Zur Beurteilung der Sicherheit bei einem Brand wurden die Erträglichkeitsbedingungen für Personen in Übereinstimmung mit international anerkannten Standards ausgewählt. Diese basieren auf Kriterien, die die thermischen Einwirkungen und die Exposition gegenüber toxischen Rauchgasen quantifizieren. Dabei steht das toxische Potential in direkter Korrelation zur Menge und Verteilung der vom Brand emittierten Rauchgase.

Die **Rauchverteilung** in den Fahrzeugbereichen wird maßgeblich von der Positionierung des Gepäckstückbrandes bestimmt¹⁴. Dabei gilt:

- je niedriger die Lage des Initialbrandes innerhalb des Doppelstockwagens, desto größer die Vermischung mit der umgebenden Luft und desto homogener die Rauchverteilung im gesamten Fahrzeugraum;

¹² vgl. Abschnitte 7.1.4.2 und 8.1.4

¹³ vgl. Abschnitt 1.3

¹⁴ vgl. Abschnitt 8.3

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

- je höher die Lage des Initialbrandes, desto geringer die Vermischung und desto schmaler und stabiler die Rauchgasstratifizierung im oberen Fahrzeugbereich.

Alle in diesem Kapitel numerisch untersuchten Szenariovarianten unterliegen der Annahme, dass sich Personen bis zu 15 Minuten im betrachteten Fahrzeug aufhalten, bevor eine Evakuierung stattfinden kann und mindestens über diesen Zeitraum den stofflichen und energetischen Brandemissionen gegenüber exponiert sind¹⁵.

Bezüglich der **Erträglichkeitskonditionen** belegen die in den Abschnitten 8.3 bis 8.5 ausgewerteten Simulationen,

- dass nur die von einem Gepäckstück freigesetzten Brandprodukte zu einer Überschreitung der toxischen und thermischen Grenzwerte innerhalb des betrachteten Zeitraumes führen können¹⁶,
- dass die betroffenen Wagenbereiche und die Intensität der Einwirkung mit dem Aufstellort des Gepäckstückbrandes variieren,
- dass es nicht möglich ist, die Beurteilung der Personensicherheit auf ein einzelnes Erträglichkeitskriterium zu reduzieren, das die anderen mit abdeckt,
- dass die modifizierten Ventilationsverhältnisse sich nur geringfügig auf die Ver Rauchung und damit auf die Erträglichkeitsbedingungen auswirken und
- dass mitbrennende Fahrzeugkomponenten (natürlich) zu kritischeren Zuständen führen¹⁷.

b) zur Brandausbreitung

Um das Brandausbreitungspotential innerhalb eines Doppelstockwagens mit einem Gepäckstück als Initialbrand zu untersuchen, werden die grundsätzlich brennbaren Fahrzeugmaterialien auch im numerischen Modell als brennbar umgesetzt. Hierbei kommen zwei Methoden zur Anwendung, die die Feststoffpyrolyse für die Komponenten Fahrgastsitze und Seitenwandverkleidung auf verschiedenen Detaillierungs- und Komplexitätsebenen nachbilden. Ebenfalls werden die Deckenverkleidung und der Bodenbelag als brennbar modelliert. Hierbei erzeugt die Pyrolysemethode mit geringerem Modellierungsgrad hinsichtlich der Brandausbreitungscharakteristik konservativere Ergebnisse und stellt sich in der Anwendung als praktikabler dar.

Ferner zeigen die Simulationsergebnisse,

- dass sich der Initialbrand in der Mehrzahl der untersuchten Szenarien auf einen

¹⁵ vgl. Abschnitt 8.1.2

¹⁶ vgl. insbesondere Tabelle 9.1 in Abschnitt 9.1.1

¹⁷ vgl. insbesondere Tabelle 9.2 in Abschnitt 9.1.2

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Fahrgastsitz und Teile der Seitenwand- und zeitweise auch der Deckenverkleidung ausbreitet,

- dass der Brand in den meisten Fällen selbstverlöschend verläuft,
- dass bei speziellen geometrischen Konfigurationen auch eine rasche Brandausbreitung (Flashover) erfolgen kann¹⁸,
- dass dieser Effekt durch große brennbare Flächen nahe des Initialbrandes und thermische Interaktion durch sich anstauenden Brandrauch begünstigt werden kann¹⁹.

¹⁸ vgl. Abschnitt 9.1.2

¹⁹ vgl. Abschnitt 8.4.4

9.2 Diskussion von Empfehlungen und Maßnahmen

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit belegen, dass ein Gepäckstückbrand innerhalb eines Doppelstockwagens ein Ereignis darstellt, bei dem sich eine kritische Atmosphäre für Personen entwickeln kann, falls die infrastrukturellen Gegebenheiten eine zeitnahe Evakuierung des Fahrzeuges nicht erlauben. Dieser Abschnitt diskutiert daher verschiedene Ansätze und potentielle Maßnahmen, die zur Entschärfung der aufgezeigten Problematik beitragen können und die Intention verfolgen, die Personensicherheit bei einem Brand in einem Schienenfahrzeug zu erhöhen.

9.2.1 Brandverhalten von Materialien

Die Normenreihe DIN EN 45545 »Brandschutz in Schienenfahrzeugen« stützt sich neben der Vermeidung von Zündquellen und dem Errichten feuerwiderstandsfähiger Strukturen in der Hauptsache auf Anforderungen, die das Brandverhalten der Fahrzeugkomponenten betreffen. Diese richten sich im Detail an die Entzündbarkeit, die Wärmefreisetzungsrate und die Flammenausbreitung sowie die optische Dichte und die Toxizität des Brandrauches und basieren auf einer von drei Gefährdungsstufen, die sich aus der Bauart- und Betriebsklasse des Fahrzeugs ergeben. Die zugeordnete Betriebsklasse berücksichtigt bereits die infrastrukturellen Gegebenheiten im Hinblick auf die Evakuierungsbedingungen und die daraus resultierende Fahrzeit im Brandfall.²⁰

Theoretisch ist es denkbar, die Anforderungen an das Brandverhalten der Fahrzeugkomponenten weiter zu verschärfen. Allerdings fällt es den Herstellern und Ausrüstern bereits teilweise schwer, den bestehenden Brandschutzanforderungen nachzukommen [108, 174, 223]. Weitaus entscheidender ist jedoch der Aspekt, dass eine solche Maßnahme nicht zur Lösung des Kernproblems beiträgt: Die numerischen Simulationen haben gezeigt, dass ein einzelnes brennendes Gepäckstück auch ohne jegliches Mitbrennen fahrzeugseitiger Komponenten eine kritische Atmosphäre erzeugen kann.

Infolgedessen müsste entweder auf das Brandverhalten extern eingebrachter Brandlasten, wie Gepäckstücke oder Bekleidung, eingewirkt oder diese gänzlich separiert untergebracht werden. Hier stellt sich jedoch die Frage hinsichtlich der Praktikabilität.

²⁰ vgl. Abschnitt 2.2.2

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

9.2.2 Maßnahmen zur Entrauchung

Ein lokal begrenztes Brandereignis führt innerhalb weniger Minuten zu einer Verschlechterung der Erträglichkeitskonditionen im gesamten Fahrzeug. Grund hierfür sind die freigesetzten Rauchgase, die sich schnell im vorhandenen Luftvolumen verteilen und denen gegenüber anwesende Personen, insbesondere bezüglich thermischer Einwirkungen und der Inhalation toxischer Bestandteile, exponiert sind.

Vergleichbaren Szenarien, die sich durch eine nicht unerhebliche Rauchfreisetzung innerhalb von Räumen und eine gewisse Anzahl potentiell anwesender Personen charakterisieren, begegnet man in anderen Sektoren²¹ mit technischen Maßnahmen zur gezielten Abführung des Brandrauches. Primäres Ziel hierbei ist es, günstigere Evakuierungsbedingungen bezüglich der Sichtverhältnisse sowie der toxischen und thermischen Einwirkungen zu schaffen und in zweiter Linie den Strahlungsaustausch zwischen der Rauchgasschicht und brennbaren Oberflächen gering zu halten und damit einer raschen Brandausbreitung entgegenzuwirken.

Im Allgemeinen sind technische Maßnahmen zur Entrauchung von Schienenfahrzeugen im Brandfall nicht vorgesehen. Allerdings existieren bereits Forschungsarbeiten, die diesbezügliche Ansätze diskutieren [10, 215]. Eine bereits patentierte Lösung sieht die maschinelle Entrauchung eines Schienenfahrzeuges über die vorhandene Klimaanlage vor, wohingegen die derzeit geltende DIN EN 45545 lediglich deren Abschaltung für die Betriebsklassen 3 und 4 fordert, um weitere Brandschäden zu vermeiden [86]. Die grundsätzliche Idee des Patents besteht in der automatischen Ansteuerung der Klimaanlage, um im betroffenen Wagen oder Wagenverbund die Zuluft abzuschalten und den Abluftstrom zu maximieren, sobald das vorhandene Detektionssystem dort einen Brand erkennt. Dadurch sollen zum einen eine gerichtete Strömung erzeugt und die Rauchgase über die Fortlüfter abgeführt und zum anderen eine Ausbreitung durch die aus anderen Bereichen nachströmende Luft verhindert werden [163].

Neben der erforderlichen Leistungsfähigkeit und der thermischen Widerstandsfähigkeit des Klimatisierungssystems ist der Verbleib der abzuführenden Rauchgase ein Aspekt, den es hinsichtlich der Praktikabilität dieses Ansatzes zu beachten gilt: Problematisch können hier unter anderem deren Ansaugung durch Folgewagen, insbesondere in Tunneln, oder die Rauchabführung in unterirdische oder umbaute Verkehrsanlagen mit dem möglichen Resultat der Beeinträchtigung baulicher Evakuierungsbereiche sein.

²¹ z. B. Gebäude [178], Atrien in Passagierschiffen [208], industrielle Bauten [182]

9.2.3 Anlagentechnische Brandbekämpfung

Stationäre Löschsyste me verfügen über ein breites Anwendungsspektrum und kommen bei einer Vielzahl brandschutztechnischer Fragestellungen zum Einsatz [120, 129]. Auch in Schienenfahrzeugen finden sie vermehrt Anwendung [24, 101, 102, 205].

Die DIN EN 45545²² fordert fest installierte Brandbekämpfungseinrichtungen lediglich in Bereichen mit Verbrennungsmotoren und Technikschränken mit Traktionsausrüstung für alle Fahrzeugbauarten in den Betriebskassen 3 und 4, falls diese über nur eine Traktionseinheit verfügen [86]. Als zur Zeit einzige europäische Nation stellt Italien darüber hinausgehende Brandschutzanforderungen, indem es seit dem Jahr 2005 für alle neuen Schienenfahrzeuge, die in Tunneln²³ mit einer Länge größer als 1000 m verkehren, auch in Fahrgastbereichen ein stationäres Brandbekämpfungssystem vorschreibt [183] und ebenfalls eine entsprechende Nachrüstung von Bestandsfahrzeugen bis zum Jahr 2021 vorsieht [61]. Nach dem Beschluss der europäischen Kommission »TSI LOC&PAS CR« [5] ist es ebenfalls möglich, stationäre Löschsyste me in Form einer kompensatorischen Maßnahme als Ersatz für brandschutztechnische Abtrennungen in Passagier- und Personalbereichen zu integrieren²⁴. Die für Deutschland erarbeitete Richtlinie »Brandbekämpfung in Schienenfahrzeugen« der Arbeitsgemeinschaft Detektionstechnik [13] dient dabei der Spezifizierung von Brandbekämpfungs- bzw. Brandlöschsystemen²⁵.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen »löschenden« und »kontrollierenden« Brandbekämpfungsanlagen²⁶. Ferner ist eine Einteilung bezüglich des verwendeten Löschmittels üblich. Für die Anwendung in Fahrgast- und Personalbereichen in Schienenfahrzeugen eignen sich insbesondere Wassernebelssysteme. Diese zeichnen sich durch die schnellen Wärmebindungseigenschaften der äußerst fein verteilten Wassertropfen und die Verträglichkeit gegenüber anwesenden Personen aus. Moderne Wassernebelanlagen bestehen aus dem Löschmittelbehälter, der Druckerzeugungseinrichtung in Form von Druckgasflaschen im Dachbereich, der Hauptverrohrung, Bereichsventilen, Nebenleitungen und den offenen Düsenköpfen. Die Aktivierung der Düsen erfolgt selektiv in Abhängigkeit vom optischen Branderkennungssystem ausgemachten Brandbereich. [25, 164]

22 vgl. Abschnitt 2.2.2

23 es existieren gewisse Ausnahmeregelungen [183]

24 vgl. Abschnitt 4.1.1

25 vgl. Abschnitt 3.2.3

26 im Folgenden werden die Begriffe Brandbekämpfungs- und Löschanlage synonym verwendet

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Die Hauptintention einer stationären Brandbekämpfungsanlage besteht im schnellen Detektieren und Beherrschen des Brandereignisses, um für anwesende Personen eine erträgliche Atmosphäre bis zum Zeitpunkt des Evakuierens aufrecht zu erhalten. Diese technische Maßnahme wirkt also direkt auf die Gefahrenquelle ein und mindert nicht nur deren Folgen und Auswirkungen, sondern verhindert diese fast vollständig, wodurch sich ein Einhalten der Erträglichkeitsbedingungen auch in direkter Nähe des Brandherdes erreichen lässt [101]. Ausdrücklich hervorzuheben ist außerdem der Aspekt, dass mit einer fest installierten Löschanlage neben Bränden fahrzeugseitiger Komponenten und extern eingebrachter Gegenstände – wie Gepäck oder Bekleidung – auch beispielsweise Anschlagsszenarien mit Brandbeschleunigern entgegengetreten werden kann, die bislang in der Fahrzeugauslegung keine Berücksichtigung finden²⁷.

Gegen einen flächendeckenden Einbau von Brandbekämpfungssystemen in Schienenfahrzeugen sprechen unter anderem der finanzielle Aufwand für Installation und Wartung sowie die begrenzten Möglichkeiten zur Unterbringung der Anlagentechnik und die damit einhergehende Masseerhöhung des Fahrzeuges [136, 164]. Fraglich sind ferner die Verfügbarkeit und die Wirksamkeit dieser Maßnahme bei einem Brand als sekundäres Ereignis nach etwa einer Kollision oder der Entgleisung eines Fahrzeuges.

Bisher werden Brandbekämpfungsanlagen oftmals als zusätzliche Maßnahme angesehen. Betrachtet man allerdings ein stationäres Löschesystem als integralen Bestandteil des Fahrzeugbrandschutzes, der sich als die Summe aller kumulativ wirkenden Einzelmaßnahmen versteht [189] und sich zur Zeit hauptsächlich auf das Brandverhalten von Fahrzeugkomponenten sowie feuerwiderstandsfähige Bauteile stützt²⁸, eröffnet sich gegebenenfalls die Möglichkeit, bei den Letztgenannten Aufwand sowie Masse zu reduzieren und trotzdem die Brandsicherheit zu erhöhen. Beispielhaft ist hier das Ersetzen brandschutztechnischer Abtrennungen durch eine Brandbekämpfungsanlage zu nennen, für das nach »TSI LOC&PAS CR« ein Nachweis gleicher Sicherheit zu erbringen ist, welcher auch die Gewährleistung der Zuverlässigkeit und Betriebsbereitschaft der alternativen Ausführung umfasst [5]. Auf diese Weise lassen sich neben einer Optimierung der Fahrzeugmasse auch mehr Freiheiten im Design bezüglich des Strebens nach durchgehend offenen Zügen und der Materialauswahl realisieren [101].

²⁷ vgl. Abschnitt 2.2.2

²⁸ vgl. Abschnitte 2.2.2 und 9.2.1

Kapitel 9 – Bewertung der Ergebnisse und Ableiten von Maßnahmen

Im nächsten Schritt lässt sich der Ansatz einer ganzheitlichen Betrachtung des Brandschutzes auch auf die Infrastruktur erweitern, in der das Schienenfahrzeug verkehrt: Das Brandschutzkonzept für eine Personenverkehrsanlage beinhaltet unter anderem Maßnahmen zur Gewährleistung der sicheren Evakuierung und des effektiven Einsatzes von Rettungskräften. Dementsprechend richtet sich die Dimensionierung von Entrauchungseinrichtungen, Löschmöglichkeiten oder der Tragfähigkeit thermisch belasteter Komponenten nach zu definierenden Brandszenarien, die in der Regel auch einen Fahrzeugbrand innerhalb der jeweiligen baulichen Anlage berücksichtigen. Solch ein Fahrzeugbemessungsbrand lässt sich beispielsweise aus dem prognostizierten Brandverhalten des Fahrzeuges bei dem Einwirken eines festgelegten Zündinitials in der Größenordnung eines brennenden Gepäckstückes²⁹ im Fahrgastbereich ableiten. [38, 107, 125, 211]

Es ist anzunehmen, dass sich die resultierenden Brandverlaufskurven eines Fahrzeuges ohne und mit fest installiertem Brandbekämpfungssystem erheblich unterscheiden. Im Extremfall können sich ohne Löschanlage ein Vollbrandszenario und mit Löschanlage eine rasche Brandlöschung ohne nennenswerte Brandausbreitung gegenüber stehen. Letzteres führt auf Basis der durchgeführten Risikoanalyse gegebenenfalls dazu, dass zur Auslegung der anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen nicht ein Brandereignis im Fahrgastraum, sondern Szenarien, wie ein Brand unterhalb des Fahrzeugwagenkastens oder ein Abfallbehälter- oder Gepäckstückbrand am Bahnsteig herangezogen wird. Resultat kann die Erfordernis kleiner dimensionierter Anlagentechnik und dementsprechend kostengünstigere Ausführungen sein. [101, 164]

Entfernt man sich also von dem historisch gewachsenen Ansatz des separaten Brandschutzes für Fahrzeuge und zugehörige bauliche Anlagen und entwickelt stattdessen moderne und holistische Brandsicherheitskonzepte gemäß des hier beschriebenen Ansatzes, eröffnen sich vor allem bei Neuplanungen und wesentlichen Erweiterungen bestehender Verkehrssysteme Möglichkeiten des kosteneffizienten Brandschutzes für Fahrzeuge und Gebäude³⁰. [102, 205]

²⁹ vgl. »Zündinitial für den Fahrzeug-Bemessungsbrand nach TR Strab BS« in Abschnitt 3.2.3
³⁰ eine beispielhafte Rechnung für ein System aus Fahrzeugen und Infrastruktur findet sich in [164]

Kapitel 10

Fazit und Ausblick

10.1 Fazit

In dieser Forschungsarbeit werden auf der Basis ingenieurwissenschaftlicher Methoden experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Reisegepäck und numerische Analysen zu den Auswirkungen eines brennenden Gepäckstückes innerhalb eines Doppelstockwagens durchgeführt. Anhand der hieraus gewonnenen Erkenntnisse lässt sich zeigen, dass die gegenwärtig präskriptiv geprägte Strategie des fahrzeugseitigen Brandschutzes die Auswirkungen eines Gepäckstückbrandes auf die Sicherheit von Personen bei infrastrukturell bedingter Evakuierungsverzögerung nicht ausreichend berücksichtigt.

Gleichwohl stellt der Brand eines Gepäckstückes ein normatives und typisch anzuwendendes Szenario zur Auslegung von Schienenfahrzeugen dar¹. Folglich ist anzunehmen, dass dem Szenario eines brennenden Gepäckstückes im Fahrgastbereich eine hinreichende Eintrittswahrscheinlichkeit beizumessen ist, die auch die Erfordernis risikomindernder Maßnahmen rechtfertigt. Abschnitt 9.2 zeigt entsprechende Lösungsansätze beispielhaft auf und adressiert neben der Eignung im Sinne der Aufgabenstellung insbesondere deren technische Realisierbarkeit sowohl hinsichtlich des Systems »Fahrzeug« als auch der umgebenden Infrastruktur.

¹ vgl. Abschnitt 3.2.3

10.2 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Ausarbeitung basieren in Teilen auf ingenieurmäßigen Annahmen, die in den entsprechenden Textpassagen detailliert ausgeführt und argumentativ begründet werden. Ferner tangiert diese Untersuchung benachbarte Themenfelder, die den Umfang der hier bearbeiteten Aufgabenstellung übersteigen. Dieser Abschnitt greift ausgewählte Aspekte aus den beiden vorgenannten Kategorien auf, in denen aus der Perspektive dieser Untersuchung eine weitergehende wissenschaftliche Forschung notwendig und zielführend ist.

Getroffene Annahmen und Vereinfachungen

Um die in dieser Arbeit zu untersuchende Problematik mit den vorhandenen Werkzeugen lösungsorientiert darzustellen, stützen sich insbesondere die durchgeführten numerischen Analysen auf eine Reihe modellhafter Vereinfachungen. Das ist hauptsächlich auf den stetigen Entwicklungsfortschritt und das rasant wachsende Anwendungsspektrum dieser Technologie in den letzten Jahren zurückzuführen. Die folgende Auflistung nennt diesbezüglich einige Elemente:

- Die räumliche Diskretisierung des Strömungsfeldes ist ein Parameter, der einen Effekt auf die Simulationsergebnisse haben kann². Dieser Aspekt wird in den Abschnitten 7.2.2 und 8.1.3 bereits eingehend beleuchtet. Allerdings ist das Variieren der Gitterzellgröße, bedingt durch die verfügbaren Rechenkapazitäten, nur bis zu einem gewissen Grad möglich. Mit steigender Rechenleistung lassen sich hier weitere Potentiale erschließen.
- Die Brandsimulationen berücksichtigen keine Personen innerhalb des Fahrzeuges. Indessen ist in der Realanwendung anzunehmen, dass das verfügbare Luftvolumen, in dem der Brandrauch dispergiert, infolge anwesender Passagiere geringer ausfällt. Darüber hinaus bestünde die Möglichkeit, dass sich Personenbewegungen auf die vorherrschenden Strömungsverhältnisse auswirken. Erste Ansätze, personenbesetzte Schienenfahrzeuge abzubilden, zeigen jedoch, dass sich die ausgewerteten Parameter, wie die Rauchgastransmission, nur um bis zu zwei Prozentpunkte gegenüber einem unbesetzten Fahrzeug ändern. Auch etwaige Einflüsse von Personenbewegungen auf die Rauchgasströmung konnten nicht nachgewiesen werden. [176]
- Das Modell zur numerischen Nachbildung des thermisch induzierten Integritätsverlustes der Fahrzeugverglasungen in Abschnitt 8.1.6 basiert auf verschiedenen

² vgl. Abschnitt 7.1.2

Kapitel 10 – Fazit und Ausblick

Annahmen und Vereinfachungen. Insbesondere was das Wärmefreisetzungsprofil bei Fahrzeugbränden zur Dimensionierung baulicher Anlagen betrifft³, ist den Ventilationsverhältnissen innerhalb des Fahrzeuges ein hoher Stellenwert beizumessen. Eine umfassende und experimentell validierte Datenbasis zur Nutzung für die Simulation von Brandereignissen in Schienenfahrzeugen ist für zukünftige Arbeiten wünschenswert.

Entzündung von Schienenfahrzeugen

Diese Forschungsarbeit analysiert die Auswirkungen eines brennenden Gepäckstückes im Fahrgastbereich. Während die Sicherheit anwesender Personen von primärem Interesse ist, erfolgt daneben auch eine Betrachtung des Ausbreitungspotentials des Initialbrandes. Dessen Aufstellort wird in Abschnitt 8.1.10 unter Berücksichtigung einer möglichst konservativen Ausbreitungscharakteristik sowie in Anlehnung an bereits bewährte Zündkonfigurationen für Schienenfahrzeuge gewählt. Die Mehrzahl der mit dieser Randbedingung berechneten Brandszenarien führt zu einer nur geringen Brandausbreitung mit selbstverlöschender Charakteristik. Grundsätzlich existieren jedoch unterschiedliche Aussagen dazu, ob und inwiefern die Position des Initialbrandes das Brandausbreitungspotential im Fahrgastraum eines Schienenfahrzeuges beeinflusst [136, 175, 181].

Dessen ungeachtet beinhalten die durchgeführten Brandsimulationen keine weiteren Gepäckstücke oder andere extern eingebrachte Brandlasten, sondern werden höchstens um brennbare Fahrzeugkomponenten erweitert. Es besteht daher eine gewisse Diskrepanz gegenüber der Realität, für die anzunehmen ist, dass sich nahe des Initialbrandes zusätzliche brennbare Gegenstände, wie weitere Gepäckstücke oder Bekleidung befinden. Speziell vor dem Hintergrund, dass Zündinitiale mit Wärmefreisetzungsratenen zwischen 100 kW und 170 kW [222] bzw. zwischen 150 kW und 200 kW [10] erforderlich sind, um eine Brandausbreitung innerhalb eines Schienenfahrzeuges herbeizuführen und der hier verwendete Initialbrand sich mit einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von 120 kW im unteren Bereich dieses Spektrums befindet, kann dies ein geeigneter Ansatzpunkt für weiterführende Untersuchungen sein. In diesem Zusammenhang birgt auch das Entwickeln pyrolytischer Parameter für typische Reisegepäckmaterialien und -kompositionen großes Potential, um das Entzündungs- und Brandverhalten benachbarter Gepäckstücke numerisch abzubilden.

³ vgl. Abschnitt 9.2.3

Numerische Modellierung von Brandbekämpfungssystemen

Abschnitt 9.2.3 empfiehlt eine fest installierte Löschanlage zur Verbesserung der Brandsicherheit innerhalb von Schienenfahrzeugen und bestenfalls auch der zugehörigen Infrastruktur. Zur Zeit erfolgt die Funktionsnachweisführung der Wirksamkeit von Brandbekämpfungsanlagen anhand von experimentell basierten Tests an Prototypen, bestehenden Fahrzeugen oder realmaßstäblichen Modellen, bei denen auch die Referenzbrandlast »Reisetasche«⁴ Anwendung findet [13]. Der nächste logische Schritt ist auch an dieser Stelle der Einsatz numerischer Methoden, um die Löschanlage anwendungsspezifisch auszulegen und wirtschaftlich die optimale Systemvariante herauszuarbeiten. Der Fire Dynamics Simulator verfügt mittlerweile über Submodelle, mit denen sowohl thermisch aktivierbare Sprinklerköpfe als auch beispielsweise Wassernebeldüsen sowie deren Auslösung in Kopplung an ein Branderkennungssystem abgebildet werden können [117]. Allerdings ist die experimentelle Validierung dieser Sprinklermodelle noch Gegenstand aktueller Forschung [28, 112, 195]. Nichtsdestotrotz zeichnet sich auch hier der stetige Weg der Ingenieurmethoden ab, das derzeitige Anwendungsspektrum zu erweitern.

⁴ vgl. Abschnitt 3.2.3

Glossar

Brandschutzingenieurverfahren sind ingenieurtechnische Verfahren, die auf wissenschaftlichen Grundsätzen beruhen, für den Entwurf und die Bemessung von baulichen Anlagen durch die Untersuchung bestimmter Brandszenarien oder durch die Quantifizierung des Risikos für eine Gruppe von Brandszenarien [95].

Brandursache ist das zündende Zusammenwirken von Brennstoff, Sauerstoff und Zündquelle am gleichen Ort und zu gleicher Zeit [220].

Eisenbahn ist eine öffentliche Einrichtung oder ein privatrechtlich organisiertes Unternehmen, das Eisenbahnverkehrsleistungen erbringt oder eine Eisenbahninfrastruktur betreibt [47].

Evakuierung bezeichnet hier den Prozess vom Verlassen des Gefahrenbereiches bis zum Erreichen eines sicheren Ortes und wird synonym zum Begriff Räumung verwendet [134].

Fernverkehr hier: siehe Schienenpersonenfernverkehr.

Flashover ist der Übergang vom lokal begrenzten Brand zu einer Brandphase, in der die gesamte Oberfläche der brennbaren Stoffe in einem Raum am Brand beteiligt ist, infolge thermischer Aufbereitung des brennbaren Inhalts bzw. spontaner Durchzündung entstandener Pyrolyseprodukte. Der Flashover ist durch einen sehr steilen Anstieg der Brandverlaufskurve charakterisiert. [95, 134, 220]

Nahverkehr hier: siehe Schienenpersonennahverkehr.

Relative Sicherheit liegt in einem Bereich vor, in dem ein Aufenthalt mit akzeptablen Personengefährdungen über einen definierten Zeitraum möglich ist [13].

Schienenfahrzeug ist hier ein Fahrzeug des spurgeführten öffentlichen Personenverkehrs an Land [81]. Im Allgemeinen versteht man darunter ein spurgebundenes Fahrzeug, das auf mit Spurkranz versehenen Rädern auf paarweise und parallel angeordneten Schienen fährt und sowohl Güter als auch Personen befördert [158].

Schiennenpersonenfernverkehr bezeichnet Eisenbahnen, die nicht dem Schienenpersonennahverkehr zugeordnet sind [42] und umfasst unter anderem die Zuggattungen Intercity-Express, Intercity, EuroCity, City Night Line und D-Zug.

Schiennenpersonennahverkehr ist die allgemein zugängliche Beförderung von Personen in Zügen, die überwiegend dazu bestimmt sind, die Verkehrsnachfrage im Stadt-, Vorort oder Regionalverkehr zu befriedigen. Das ist im Zweifel der Fall, wenn in der Mehrzahl der Beförderungsfälle eines Zuges die gesamte Reiseweite 50 Kilometer oder die gesamte Reisezeit eine Stunde nicht übersteigt [42, 46, 47]. Er umfasst unter anderem die Zuggattungen InterRegio, Regionalexpress, Regionalbahn, S-Bahn und Straßenbahn.

Schutzziel des Brandschutzes ist das angestrebte Ziel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit eines Brandes bezogen auf wesentliche Aspekte von baulichen Anlagen. Diese wesentlichen Aspekte beziehen sich typischerweise auf die Sicherheit von Personen, die Erhaltung von Eigentum, die Aufrechterhaltung von betrieblichen Abläufen, den Umweltschutz und die Erhaltung des kulturellen Erbes [95].

Sekundäre Zündquelle ist keine direkte Zündquelle, sondern wird durch eine primäre Zündquelle entzündet und begünstigt die Brandausbreitung [151].

Straßenbahn ist eine Schienenbahn, die den Verkehrsraum öffentlicher Straßen benutzt [...] oder einen besonderen Bahnkörper hat und [...] der Beförderung von Personen im Orts- und Nachbarschaftsbereich dient. Als Straßenbahnen gelten auch Bahnen, die als Hoch- und Untergrundbahnen, Schwebebahnen oder ähnliche Bahnen besonderer Bauart angelegt sind oder angelegt werden, ausschließlich oder überwiegend der Beförderung von Personen im Orts- oder Nachbarschaftsbereich dienen und nicht Bergbahnen oder Seilbahnen sind. [46]

Zündinitial wird in der Regel als »ortsfremder Körper« aufgefasst und stellt die Verbindung zwischen der Zündquelle und den nutzungsspezifischen Brandstoffen her [134].

Zündmodell ist hier eine durch technische Parameter definierte und reproduzierbare Nachbildung eines Entzündungsvorgangs [81].

Zündquelle ist die Energiequelle, die verwendet wird, um das Brennen einzuleiten [95] bzw. jede Quelle, die ausreichend Energie besitzt, die Verbrennung auszulösen [76, 94, 220].

Literaturverzeichnis

- [1] 2008/163/EG TSI SRT: *über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem.* Amtsblatt der Europäischen Union L64/1, 20.12.2007
- [2] 2008/164/EG TSI PRM: *über die technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „eingeschränkt mobiler Personen“ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem.* Amtsblatt der Europäischen Union L 64/72, 07.03.2008
- [3] 2008/232/EG TSI HS RST: *über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge“ des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems.* Amtsblatt der Europäischen Union L 84/132, 21.02.2008
- [4] 2008/57/EG: *über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems in der Gemeinschaft.* Amtsblatt der Europäischen Union L 191/1, 17.06.2008, zuletzt geändert durch 2011/18/EU
- [5] 2011/291/EU TSI LOC&PAS CR: *über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Fahrzeug-Teilsystems „Lokomotiven und Personenwagen“ des konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystems.* Amtsblatt der Europäischen Union L 139/1, 26.04.2011
- [6] 321/2013 (EU): *über die technische Spezifikation für die Interoperabilität zum Teilsystem „Fahrzeuge — Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union.* Amtsblatt der Europäischen Union L104/1, 13.03.2013
- [7] 352/2009 (EU): *über die Festlegung einer gemeinsamen Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken gemäß Artikel 6 Absatz 3 Buchstabe a der Richtlinie 2004/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rats.* Amtsblatt der Europäischen Union L108/4, 24.04.2009
- [8] ALVEAR, DANIEL: *Fire protection and life safety conditions in passenger trains.* Conference on Fire Protection of Rolling Stock, Berlin, 2014

- [9] AN MEY, DIETER; TERBOVEN, CHRISTIAN; KAPINOS, PAUL; SCHMIDL, DIRK; WIENKE, SANDRA; CRAMER, TIM; WIRTZ, MACHAEL: *The RWTH HPC-Cluster User's Guide*. Rechen- und Kommunikationszentrum der RWTH Aachen, 2013
- [10] ANDREINI, ANTONIO; DA SOGHE, RICCARDO; CARUSO, LAURA: *Pyrolysis Modeling and Numerical Simulation of Rail Carriage Fire Scenarios for the Safe Design of a Passenger Train*. University of Florence, Department of Energy Engineering, 2011
- [11] ANDREINI, ANTONIO; DA SOGHE, RICCARDO; FACCHINI, BRUNO; GIUSTI, ANDREA; CARUSO, LAURA; LUCONI, G.; TROIANO, DOMENICO: *Fire Scenarios Modelling for the Safe Design of a Passenger Rail Carriage*. 9th World Congress on Railway Research, Lille, 2011
- [12] ARGE: *Richtlinie – Teil 1 »Branderkennung in Schienenfahrzeugen« – Funktionsnachweisführung zur Positionierung von Brandmeldern in für Personen zugänglichen Räumen, Elektroschaltschränken und Bereichen von Verbrennungsmaschinen – Regelung/Verfahrensanweisung zur Prüfung*. Arbeitsgemeinschaft Detektionstechnik, Rev. 4.0, 17.09.2012
- [13] ARGE: *Richtlinie – Teil 2 »Brandbekämpfung in Schienenfahrzeugen« – Funktionsnachweisführung zur Wirksamkeit von Brandbekämpfungsanlagen in für Personen zugänglichen Räumen, Elektroschaltschränken und Bereichen von Verbrennungsmaschinen – Regelung / Verfahrensanweisung zur Prüfung*. Arbeitsgemeinschaft Detektionstechnik, Rev. 3.0, 17.09.2012
- [14] ARGE: *Richtlinie – Teil 3 »Systemfunktionalität Brandmelde- und Brandbekämpfungsanlagen in Schienenfahrzeugen« – Funktionsnachweisführung zur Alarmierung und Steuerung von Systemfunktionen – Regelung zur Auslegung und Prüfung*. Arbeitsgemeinschaft Detektionstechnik, Rev. 2.0, 17.09.2012
- [15] BABRAUSKAS, VYTENIS: *The Cone Calorimeter*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008
- [16] BABRAUSKAS, VYTENIS: *Heat Release Rates*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008
- [17] BABRAUSKAS, VYTENIS: *Tables and Charts*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008

Literaturverzeichnis

- [18] BABRAUSKAS, VYTENIS: *Glass Breakage in Fires*. Fire Science and Technology Inc., 2010
- [19] BANSEMER, BJÖRN: *Ein Modell zur szenarioabhängigen Beurteilung der Rauchgastoxizität*. Dissertation an der Bergischen Universität Wuppertal, 2003
- [20] BANSEMER, BJÖRN: *FIRST – Normative Kenngrößen für die Beurteilung des brandtechnologischen Materialverhaltens nach CEN/TS 45545-2*. Vortrag beim Brandschutztag Schienenfahrzeuge, Leverkusen, 2010
- [21] BANSEMER, BJÖRN: *Forschungsprojekt TRANSFEU – FDS-Eingabedateien für Simulationen zu WP5.6: Development of a simplified assessment tool for the train design*. Persönliche Übergabe am 28.09.2011
- [22] BANSEMER, BJÖRN; HALFMANN, MICHAEL: *Assessment of the Fire Behavior of Products Used on Railway Vehicles*. EURAILmag Business & Technology, Issue 26, 2012
- [23] BANSEMER, BJÖRN; PASCHEN, CHRISTIAN; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM: *Numerische Simulation von Schienenfahrzeugbränden*. EI – Eisenbahningenieur, Nr. 12, 2006
- [24] BARBAGLI, MICHELE: *From Low Speed (APMs) to Very High Speed (Long Distance) – Importance of Active Fire Protection Increases Faster and Faster*. Conference on Fire Protection of Rolling Stock, London, 2013
- [25] BARBAGLI, MICHELE: *Theoretical and Practical Perspectives of Application of High Pressure Water Mist Systems for Railway Vehicles*. Railway Reports, Instytut Kolejnictwa, Polen, 2013
- [26] BEARD, ALAN; CARVEL, RICHARD (Hrsg.): *Handbook of Tunnel Fire Safety*. Second Edition, Institution of Civil Engineers, London, 2012
- [27] BEITEL, J. J.; BERTOLO, C. A.; CAROLL, W. F.; GRAND, A. F.; HIRSCHLER, M. M.; SMITH, G. F.: *Hydrogen Chloride Transport and Decay in a Large Apparatus: II. Variables Affecting Hydrogen Chloride Decay*. Journal of Fire Sciences, Volume 5, 1987
- [28] BOURQUE, MATTHEW J.; SVIRSKY, THOMAS A.: *Computational Modeling*

- of Fire Sprinkler Spray Characteristics Using the Fire Dynamics Simulator.* Worcester Polytechnic Institute, 2013
- [29] BRIGGS, PETER; MÉTRAL, SERGE; GIL, PATRICIA; TALLEC, YANNICK; LE SANT, VÉRONIQUE; TROIANO, DOMENICO; MARRUCCI, STEFANO; MESSA, SILVIO; BAIOCCHI, CLAUDIO; BREULET, HERVÉ: *FIRESTARR Project – Final Report.* FIRESTARR Consortium, 2001
- [30] BRÄNNSTRÖM, FABIAN: *Thermisches Verhalten von Schienenfahrzeugverglasungen.* Bombardier Transportation GmbH, E-Mail-Verkehr zwischen dem 02.12.2013 und dem 02.01.2014
- [31] BULK, JULIAN: *Modellierung von Bränden in Schienenfahrzeugen im Rahmen des TRANSFEU-Projekts.* Vortrag beim Brandschutztag Schienenfahrzeuge, Leverkusen, 2013
- [32] BULK, JULIAN: *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Brandverhalten von Gepäckstücken.* Vortrag beim Brandschutztag Schienenfahrzeuge, Leverkusen, 2014
- [33] BULK, JULIAN; BANSEMER, BJÖRN; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM: *Fire Safety of Rail Vehicles – The Significance of Luggage.* Third International Conference on Fires in Vehicles, Berlin, 2014
- [34] BULK, JULIAN; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM: *TRANSFEU Project – WP4, D4.3: Description of Numerical Simulation Tools for the Evaluation of Fire Performance.* FP7 contract number: 233786, 2012
- [35] BULK, JULIAN; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM: *TRANSFEU Project – WP5, D5.3: Validation of the Numerical Tools Developed in Tasks 5.1 and 5.2 – FDS Simulation of Real-Scale Scenario 2A.* FP7 contract number: 233786, 2012
- [36] BULK, JULIAN; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM: *TRANSFEU Project – WP5, D5.3: Validation of the Numerical Tools Developed in Tasks 5.1 and 5.2 – FDS Simulation of Full-Scale Compartment with Method 1.* FP7 contract number: 233786, 2013
- [37] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Verkehr und Umwelt – Herausforderungen.* www.bmu.de, abgerufen am 15.07.2013

Literaturverzeichnis

- [38] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR: *Technische Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen (TRStrab Brandschutz)*. Entwurf, 24. Juni 2014
- [39] BUNDESREGIERUNG BRD: *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung – BOStrab)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2569, 08.11.2007
- [40] BUNDESREGIERUNG BRD: *Verordnung über die Interoperabilität des trans-europäischen Eisenbahnsystems (Transeuropäische-Eisenbahn-Interoperabilitätsverordnung - TEIV)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2632, 10.12.2012
- [41] BUNDESREGIERUNG BRD: *Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (Regionalisierungsgesetz – RegG)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2598, 14.12.2012
- [42] BUNDESREGIERUNG BRD: *Sozialgesetzbuch (SGB) Neuntes Buch (IX) – Rehabilitation und Teilhabe behinderter Menschen*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2598, 14.12.2012
- [43] BUNDESREGIERUNG BRD: *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 467, 19.03.2008
- [44] BUNDESREGIERUNG BRD: *Nahverkehrszügeordnung*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 1046, 19.06.2001
- [45] BUNDESREGIERUNG BRD: *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Schmalspurbahnen (ESBO)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 215, 26.02.2008
- [46] BUNDESREGIERUNG BRD: *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 1738, 26.06.2013
- [47] BUNDESREGIERUNG BRD: *Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2542, 29.07.2009
- [48] BUTLER, KATHRYN M.; MULHOLLAND, GEORGE W.: *Generation and Transport of Smoke Components*. Fire Technology, Volume 40, 2004
- [49] CAMILLO, ANYCÉE: *Multi-Scale Investigation of Fire Behaviour of a Seat and a Wall Panel from European Transport System*. Dissertation am École Nationale Supérieure de Mécanique et d’Aérotechnique, 2013

- [50] CAMILLO, ANYCÉE; BUSTAMANTE VALENCIA, LUCAS; DIDIEUX, FRANCK; GUILLAUME, ERIC; REIMANN, HEINZ; HUDSON, STEVE; BRÄNNSTRÖM, FABIAN; HOSTIKKA, SIMON: *TRANSFEU Project – WP5, D5.1: Development of Numerical Tools for Simulation of Products Fire Growth in Vehicles*. FP7 contract number: 233786, 2012
- [51] CAMILLO, ANYCÉE; GUILLAUME, ERIC: *Methodology of Fire Growth and Toxic Gases Production Simulation – Application to an European Train Vehicle*. Second International Conference on Fires in Vehicles, Chicago, 2012
- [52] CAMILLO, ANYCÉE; GUILLAUME, ERIC: *TRANSFEU Project – WP5, D5.3: Comparison of the Experiments and Numerical Simulations of the Fire Behaviour of the Design Fire Scenario 1A - Application of the Multi-Scale Methodology*. FP7 contract number: 233786, 2012
- [53] CAMILLO, ANYCÉE; GUILLAUME, ERIC; REIMANN, HEINZ; HOSTIKKA, SIMO; U.A.: *TRANSFEU Project – WP4, D4.2: Relative Fire Risk Analysis and Design Fire Scenarios*. FP7 contract number: 233786, 2011
- [54] CAMILLO, ANYCÉE; GUILLAUME, ERIC; ROGAUME, THOMAS: *Risk Analysis of Fire and Evacuation Events in the European Railway Transport Network*. Fire Safety Journal, Volume 60, 2013
- [55] CAPOTE, JORGE A.; ALVEAR, DANIEL; ABREU, ORLANDO; CUESTA, ARTURO; ALONSO, VIRGINIA: *A Stochastic Approach for Simulating Human Behaviour During Evacuation Process in Passenger Trains*. Fire Technology, Volume 48, 2012
- [56] CAPOTE, JORGE A.; ALVEAR, DANIEL; ABREU, ORLANDO; LÁZARO, MARIANO: *Physical Scale and Computational Modeling of Smoke Movement in High Speed Passenger Trains*. International Congress Fire Computer Modeling, Santander, 2012
- [57] CAPOTE, JORGE A.; JIMENEZ, JOSÉ A.; ALVEAR, DANIEL; ALVAREZ, JULIO; ABREU ORLANDO; LAZARO, MARIANO: *Assessment of Fire Behaviour of High-Speed Trains' Interior Materials: A small-Scale and Full-Scale tests*. Fire and Materials, Volume 38, Issue 7, 2014
- [58] CHIAM, BOON HUI: *Numerical Simulation of a Metro Train Fire*. Master

Literaturverzeichnis

- Thesis an der University of Canterbury, Department of Civil Engineering, Christchurch, New Zealand, 2005
- [59] CLAESSON, ALEXANDER; LÖNNERMARK, ANDERS; INGASON, HAUKUR; LINDSTRÖM, JOHAN; LI, YING ZHEN; KUMM, MIA: *Laboratory Fire Experiments with a 1/3 Train Carriage Mockup*. SP Technical Research Institute of Sweden, 2012
- [60] CRANE, CHARLES R.: *Human Tolerance Limit to Elevated Temperature: An Empirical Approach to the Dynamics of Acute Thermal Collapse*. Federal Aviation Administration, Oklahoma City, Oklahoma, 1978
- [61] CREMONCINI, ANDREA: *Development and Validation of Custom Fire Fighting System Solutions for Rolling Stock*. Conference on Fire Protection of Rolling Stock, London, 2013
- [62] CUTONILLI, JOHN; BEYLER, CRAIG: *Predictions of Railcar Heat Release Rates*. Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt, 2010
- [63] DIN 25003: *Bahnanwendungen – Systematik der Schienenfahrzeuge – Übersicht, Benennungen, Definitionen*. Beuth-Verlag, September 2001
- [64] DIN 33402-2: *Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte*. Beuth-Verlag, Dezember 2005
- [65] DIN 4102-1: *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe – Begriffe, Anforderungen und Prüfungen*. Beuth-Verlag, Mai 1998
- [66] DIN 53438-1: *Prüfung von brennbaren Werkstoffen – Verhalten beim Beflammen mit einem Brenner – Teil 1: Allgemeine Angaben*. Beuth-Verlag, Juni 1984
- [67] DIN 54341: *Prüfung von Sitzen für Schienenfahrzeuge des öffentlichen Personenverkehrs – Bestimmung des Brennverhaltens mit einem Papierkissen*. Beuth-Verlag, Januar 1988
- [68] DIN 54837: *Prüfung von Werkstoffen, Kleinteilen und Bauteilabschnitten für Schienenfahrzeuge – Bestimmung des Brennverhaltens mit einem Gasbrenner*. Beuth-Verlag, Dezember 2007
- [69] DIN 5510-1: *Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen –*

- Teil 1: Brandschutzstufen, brandschutztechnische Maßnahmen und Nachweise.* Beuth-Verlag, Oktober 1988
- [70] DIN 5510-2: *Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Brennverhalten und Brandnebenscheinungen von Werkstoffen und Bauteilen – Klassifizierung, Anforderungen und Prüfverfahren.* Beuth-Verlag, Mai 2009
- [71] DIN 5510-4: *Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 4: Konstruktive Gestaltung der Fahrzeuge – Sicherheitstechnische Anforderungen.* Beuth-Verlag, Oktober 1988
- [72] DIN 5510-5: *Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 5: Elektrische Betriebsmittel – Sicherheitstechnische Anforderungen.* Beuth-Verlag, Oktober 1988
- [73] DIN 5510-6: *Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 6: Begleitende Maßnahmen – Funktion der Notbremseinrichtung, Informationssysteme, Brandmeldeanlagen, Brandbekämpfungseinrichtungen – Sicherheitstechnische Anforderungen.* Beuth-Verlag, Oktober 1988
- [74] DIN EN 1021-1: *Möbel – Bewertung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln – Teil 1: Glimmende Zigarette als Zündquelle; Deutsche Fassung prEN 1021-1:2012.* Beuth-Verlag, Januar 2013
- [75] DIN EN 1021-2: *Möbel – Bewertung der Entzündbarkeit von Polstermöbeln – Teil 2: Eine einem Streichholz vergleichbare Gasflamme als Zündquelle; Deutsche Fassung prEN 1021-2:2012.* Beuth-Verlag, Januar 2013
- [76] DIN EN 13237: *Begriffe für Geräte und Schutzsysteme zur Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen; Deutsche Fassung EN 13237:2003.* Beuth-Verlag, November 2003
- [77] DIN EN 13238: *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Konditionierungsverfahren und allgemeine Regeln für die Auswahl von Trägerplatten; Deutsche Fassung EN 13238:2001.* Beuth-Verlag, Dezember 2001
- [78] DIN EN 13501-1: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2007.* Beuth-Verlag, Mai 2007

Literaturverzeichnis

- [79] DIN EN 13501-2: *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2007+A1:2009*. Beuth-Verlag, Februar 2010
- [80] DIN EN 13823: *Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen; Deutsche Fassung EN 13823:2010*. Beuth-Verlag, Dezember 2010
- [81] DIN EN 45545-1: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 45545-1:2013*. Beuth-Verlag, August 2013
- [82] DIN EN 45545-2: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten; Deutsche Fassung EN 45545-2:2013*. Beuth-Verlag, August 2013
- [83] DIN EN 45545-3: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 3: Feuerwiderstand von Feuerschutzabschlüssen; Deutsche Fassung EN 45545-3:2013*. Beuth-Verlag, August 2013
- [84] DIN EN 45545-4: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 4: Brandschutzanforderungen an die konstruktive Gestaltung von Schienenfahrzeugen; Deutsche Fassung prEN 45545-4:2013*. Beuth-Verlag, August 2013
- [85] DIN EN 45545-5: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 5: Brandschutzanforderungen an die elektrische Ausrüstung einschließlich der von Oberleitungsbussen, spurgeführten Bussen und Magnetschwebefahrzeugen; Deutsche Fassung EN 45545-5:2013*. Beuth-Verlag, Juli 2013
- [86] DIN EN 45545-6: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen – Teil 6: Brandmelde- und Brandbekämpfungseinrichtungen und begleitende Brandschutzmaßnahmen; Deutsche Fassung EN 45545-6:2013*. Beuth-Verlag, August 2013
- [87] DIN EN 45545-7: *Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen*

- *Teil 7: Brandschutzanforderungen an Anlagen für brennbare Flüssigkeiten und Gase; Deutsche Fassung EN 45545-7:2013*. Beuth-Verlag, August 2013
- [88] DIN EN 597-1: *Möbel – Bewertung der Entzündbarkeit von Matratzen und gepolsterten Bettböden – Teil 1: Zündquelle: Glimmende Zigarette; Deutsche Fassung EN 597-1:1994*. Beuth-Verlag, Januar 1995
- [89] DIN EN 597-2: *Möbel – Bewertung der Entzündbarkeit von Matratzen und gepolsterten Bettböden – Teil 2: Eine einem Streichholz vergleichbare Gasflamme; Deutsche Fassung EN 597-2:1994*. Beuth-Verlag, Januar 1995
- [90] DIN EN 60332-1-2: *Prüfungen an Kabeln, isolierten Leitungen und Glasfaserkabeln im Brandfall – Teil 1-2: Prüfung der vertikalen Flammenausbreitung an einer Ader, einer isolierten Leitung oder einem Kabel – Prüfverfahren mit 1-kW-Flamme mit Gas/Luft-Gemisch (IEC 60332-1-2:2004); Deutsche Fassung EN 60332-1-2:2004*. Beuth-Verlag, Juni 2005
- [91] DIN EN 60695-11-4: *Prüfungen zur Beurteilung der Brandgefahr – Teil 11-4: Prüfflammen – 50-W-Prüfflamme – Prüfeinrichtungen und Prüfverfahren zur Bestätigung (IEC 60695-11-4:2011); Deutsche Fassung EN 60695-11-4:2011*. Beuth-Verlag, Mai 2013
- [92] DIN EN ISO 11925-2: *Prüfungen zum Brandverhalten – Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung – Teil 2: Einzelflammentest (ISO 11925-2:2010); Deutsche Fassung EN ISO 11925-2:2010*. Beuth-Verlag, Februar 2011
- [93] DIN EN ISO 12952-2: *Textilien – Bewertung der Entzündbarkeit von Bettzeug – Teil 2: Zündquelle: kleine offene Flamme (ISO 12952-2:2010); Deutsche Fassung EN ISO 12952-2:2010*. Beuth-Verlag, Januar 2011
- [94] DIN EN ISO 13702: *Erdöl und Ersgasindustrien – Überwachung und Eindämmung von Feuer und Explosionen auf Offshore-Produktionsplattformen – Anforderungen und Richtlinien (ISO/DIS 13702:2013); Englische Fassung prEN ISO 13702:2013*. Beuth-Verlag, September 2013
- [95] DIN EN ISO 13943: *Brandschutz – Vokabular; Deutsche und Englische Fassung EN ISO 13943:2010*. Beuth-Verlag, Februar 2011
- [96] DIN EN ISO 4589-2: *Kunststoffe – Bestimmung des Brennverhaltens durch den Sauerstoff-Index – Teil 2: Prüfung bei Umgebungstemperatur (ISO*

Literaturverzeichnis

- 4589-2:1996 + Amd. 1:2005) Deutsche Fassung EN ISO 4589-2 + A1:2006. Beuth-Verlag, Juni 2006
- [97] DIN IEC 60695-11-10: *Prüfungen zur Beurteilung der Brandgefahr – Teil 11-10: Prüfflammen – Prüfverfahren mit 50-W-Prüfflamme horizontal und vertikal (IEC 89/932/CD:2009)*. Beuth-Verlag, März 2010
- [98] DIN IEC 60695-2-10: *Prüfungen zur Beurteilung der Brandgefahr – Teil 2-10: Prüfverfahren mit dem Glühdraht – Glühdrahtprüfeinrichtung und allgemeines Prüfverfahren (IEC 89/931/CD:2009)*. Beuth-Verlag, Oktober 2009
- [99] DIN IEC 60695-2-11: *Prüfungen zur Beurteilung der Brandgefahr – Teil 2-11: Prüfungen mit dem Glühdraht – Prüfung mit dem Glühdraht zur Entflammbarkeit von Enderzeugnissen (IEC 89/935/CD:2009)*. Beuth-Verlag, Dezember 2009
- [100] DIN ISO 5725-1: *Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe (ISO 5725-1 : 1994)*. Beuth-Verlag, November 1997
- [101] DIRKSMEIER, ROGER-A.: *Die Entwicklung des Brandschutzes im Schienenverkehr und der Wandel seines Verständnisses*. ZEVrail – Zeitschrift für das gesamte System Bahn, 2009
- [102] DIRKSMEIER, ROGER-A.: *Design Meets Safety – How Innovative Fire Protection Technology Can Improve Energy Efficiency, Cost Effectiveness and Design for Railway Systems*. Innovation Seminar – Energy Efficiency in Transport Systems, University of Kentucky, 2014
- [103] DRYSDALE, DOUGAL: *An Introduction to Fire Dynamics*. Third Edition. John Wiley & Sons, 2011
- [104] EISENBAHN-BUNDESAMT: *Verwaltungsvorschrift für die Genehmigung zur Inbetriebnahme von Eisenbahnfahrzeugen gemäß §§ 6 ff TEIV im Zuständigkeitsbereich des Eisenbahn-Bundesamtes (VV IBG Fahrzeuge)*. Zuletzt geändert durch BGBl. I S. 2569, 15.03.2010
- [105] EISENBAHN-BUNDESAMT: *Regelungen für die brandschutztechnische Beurteilung von Schienenfahrzeugen im Rahmen der Abnahme nach § 32 EBO*. Bonn, 2006

- [106] EISENBAHN-BUNDESAMT: *Regelungen für die brandschutztechnische Beurteilung von Eisenbahn-Fahrzeugen in Deutschland*. Bonn, 2010
- [107] EISENBAHN-BUNDESAMT: *Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes*. Eisenbahn-Bundesamt, Bonn, 2011
- [108] ERLACHER, KARL: *The Long Anticipated EN 45545 is Finally Here: Now How to Successfully Implement the Regulation*. Conference on Fire Protection of Rolling Stock, London, 2013
- [109] EUROPEAN RAILWAY AGENCY: *Railway Safety Performance in the European Union*. Valenciennes cedex, 2012
- [110] EUROPEAN RAILWAY AGENCY: *Intermediate Report on the Development of Railway Safety in the European Union*. Valenciennes cedex, 2013
- [111] EUROPEAN RAILWAY AGENCY: *Railway Safety Performance in the European Union*. Valenciennes cedex, 2014
- [112] FDS USERGROUP: *FDS Leitfaden*. Unabhängiges Forum für die deutschsprachigen FDS-Anwender, 2014
- [113] FLOYD, JASON; FORNEY, GLENN; HOSTIKKA, SIMO; KORHONEN, TIMO; MCDERMOTT, RANDALL; MCGRATTAN, KEVIN: *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2012
- [114] FLOYD, JASON; HOSTIKKA, SIMO; BAUM, HOWARD; MCGRATTAN, KEVIN; MCDERMOTT, RANDALL; MELL, WILLIAM; REHM, RONALD: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [115] FLOYD, JASON; HOSTIKKA, SIMO; MCDERMOTT, RANDALL; MCGRATTAN, KEVIN: *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide – Volume 2: Verification*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [116] FLOYD, JASON; HOSTIKKA, SIMO; MCDERMOTT, RANDALL; MCGRATTAN, KEVIN: *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide – Volu-*

Literaturverzeichnis

- me 3: Validation*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [117] FLOYD, JASON; HOSTIKKA, SIMO; MCDERMOTT, RANDALL; MCGRATTAN, KEVIN: *Fire Dynamics Simulator (Version 5) – User’s Guide*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [118] GALEA, ED: *Fire and Evacuation Modelling of Accidental Fires on Passenger Trains in Tunnels: OWG vs. Conventional Configurations*. Conference on Fire Protection of Rolling Stock, Berlin, 2014
- [119] GM/RT2130: *Railway Group Standard – Vehicle Fire, Safety and Evacuation*. Issue 4, Rail Safety and Standards Board Limited, London, 2013
- [120] GOERTZ, ROLAND: *Stationäre und mobile Löschanlagen und -geräte*. Vorlesungsunterlage an der Bergischen Universität Wuppertal, Fachgebiet Abwehrender Brandschutz, 2014
- [121] GUILLAUME, ERIC; CAMILLO, ANYCÉE: *Forschungsprojekt TRANSFEU – Szenario 1A – FDS-Eingabedateien*. E-Mail vom 28. August 2013
- [122] GUILLAUME, ERIC; CAMILLO, ANYCÉE; ROGAUME, THOMAS: *Application and Limitations of a Method Based on Pyrolysis Models to Simulate Railway Rolling Stock Fire Scenarios*. Fire Technology, Volume 50, 2014
- [123] GUILLAUME, ERIC; DIDIEUX, FRANCK; AURÉLIEN, THIRY; BELLIVIER, AXEL: *Real-Scale Fire Tests of One Bedroom Apartments with Regard to Tenability Assessment*. Fire Safety Journal, Volume 70, 2014
- [124] GUILLAUME, ERIC; SAINRAT, ALAIN; CAMILLO, ANYCÉE; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM; BULK, JULIAN: *TRANSFEU Project – WP 5, Deliverable 5.6: Development of a Simplified Assessment Tool for the Train Design*. FP7 contract number: 233786, 2013
- [125] HAACK, ALFRED; SCHREYER, JÖRG: *Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr – Zusammenfassender Bericht*. Arbeitskreis im Auftrag der Deutschen Bahn AG, Köln, 2010
- [126] HAACK, ALFRED; SCHREYER, JÖRG; MEYEROLTMANN, W.; BEYER, S.: *Brandschutz in Verkehrstunneln – Schlussbericht*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW), Bonn, 2010

- [127] HALFMANN, MICHAEL: *Die neue EN 45545 – Veröffentlichung, Struktur, aktuelle Produktanforderungen*. Vortrag beim Brandschutztag Schienenfahrzeuge, Leverkusen, 2013
- [128] HALFMANN, MICHAEL: *Transformation der CEN/TS 45545 in eine Europäische Norm*. Vortrag beim Brandschutztag Schienenfahrzeuge, Leverkusen, 2013
- [129] HALL, JOHN R.: *U.S. Experience with Sprinklers*. National Fire Protection Association, Fire Analysis and Research Division, Quincy, Massachusetts, 2013
- [130] HILL, K.; DREISBACH, J.: *Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications – Volume 7: Fire Dynamics Simulator (FDS)*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC., 2007
- [131] HIRSCHLER, MARCELO M.; MORGAN, ALEXANDER B: *Thermal Decomposition of Polymers*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008
- [132] HOSSER, DIETMAR: *Leistungsorientierte Brandschutzkonzepte*. Tagung »Brandschutz – Quo vadis?« des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Köln/Bonn, 2009
- [133] HOSSER, DIETMAR (Hrsg.): *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. 2. Auflage, Verein zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Altenberge, 2009
- [134] HOSSER, DIETMAR (Hrsg.): *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage, Verein zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Altenberge, 2013
- [135] HUDSON, STEVE: *Train Fires - Special Topic Report*. Controller, Safety Strategy & Risk – Railway Safety, London, 2001
- [136] INGASON, HAUKUR; KUMM, MIA; NILSSON, DANIEL; LÖNNERMARK, ANDERS; ET AL.: *The Metro Project – Final Report*. Mälardalen University Sweden, 2012
- [137] INGASON, HAUKUR; LI, YING ZHEN; LÖNNERMARK, ANDERS: *Tunnel*

Literaturverzeichnis

- Fire Dynamics*. Springer Verlag, New York, 2015
- [138] ISENBERG, MICHAEL: *Stuttgart21 – Der brennende Zug fährt zum Bahnhof*. Interview mit Klaus-Jürgen Bieger (Deutsche Bahn), Stuttgarter Nachrichten vom 09.10.2013
- [139] ISO 11925-3: *Reaction to Fire Tests – Ignitability of Building Products Subjected to Direct Impingement of Flame – Part 3: Multi-Source Test*. Beuth-Verlag, Juni 1997
- [140] ISO 13571: *Life-Threatening Components of Fire – Guidelines for the Estimation of Time to Compromised Tenability in Fires*. Beuth-Verlag, September 2012
- [141] ISO 14934-1: *Fire Tests – Calibration and Use of Heat Flux Meters – Part 1: General Principles*. Beuth-Verlag, Juni 2010
- [142] ISO 16312-2: *Guidance for Assessing the Validity of Physical Fire Models for Obtaining Fire Effluent Toxicity Data for Fire Hazard and Risk Assessment – Part 1: Criteria*. Beuth-Verlag, February 2010
- [143] ISO 19701: *Methods for Sampling and Analysis of Fire Effluents*. Beuth-Verlag, April 2013
- [144] ISO 19702: *Toxicity Testing of Fire Effluents – Guidance for Analysis of Gases and Vapours in Fire Effluents Using FTIR Gas Analysis*. Beuth-Verlag, October 2006
- [145] ISO 19703: *Generation and Analysis of Toxic Gases in Fire – Calculation of Species Yields, Equivalence Ratios and Combustion Efficiency in Experimental Fires*. Beuth-Verlag, June 2010
- [146] ISO 19706: *Guidelines for Assessing the Fire Threat to People*. Beuth-Verlag, September 2009
- [147] ISO 23932: *Fire Safety Engineering – General Principles*. Beuth-Verlag, June 2009
- [148] ISO 24473: *Fire Tests – Open Calorimetry – Measurement of the Rate of Production of Heat and Combustion Products for Fires of up to 40 MW*. Beuth-Verlag, April 2008

- [149] ISO 5660-1: *Reaction to Fire Tests – Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate – Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method)*. Beuth-Verlag, December 2002
- [150] ISO 9705: *Fire Tests – Full-Scale Room Test for Surface Products*. Beuth-Verlag, March 1996
- [151] ISO/TR 11925-1: *Reaction to Fire Tests – Ignitability of Building Products Subjected to Direct Impingement of Flame – Part 1: Guidance on Ignitability*. Beuth-Verlag, März 1999
- [152] ISO/TR 13387-1: *Fire Safety Engineering – Part 1: Application of Fire Performance Concepts to Design Objectives*. Beuth-Verlag, October 1999
- [153] ISO/TR 13387-2: *Fire Safety Engineering – Part 2: Design Fire Scenarios and Design Fires*. Beuth-Verlag, October 1999
- [154] ISO/TR 13387-5: *Fire Safety Engineering – Part 5: Movement of Fire Effluents*. Beuth-Verlag, October 1999
- [155] ISO/TR 17252: *Fire Tests – Applicability of Reaction to Fire Tests to Fire Modelling and Fire Safety Engineering*. Beuth-Verlag, 2008
- [156] ISO/TR 9705-2: *Reaction-to-Fire Tests – Full-Scale Room Tests for Surface Products – Part 2: Technical Background and Guidance*. Beuth-Verlag, May 2001
- [157] ITA-COSUF: *An Engineering Methodology for Performance-Based Fire Safety Design of Underground Rail Systems*. ITA Committee on Operational Safety of Underground Facilities, Lausanne, 2014
- [158] JANICKI, JÜRGEN; REINHARD, HORST; RÜFFER, MICHAEL: *DB-Fachbuch Schienenfahrzeugtechnik*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Bahn Fachverlag, Berlin, 2013
- [159] JANSSENS, MARC L.: *Measuring Rate of Heat Release by Oxygen Consumption*. Fire Technology, Volume 27, 1991
- [160] JANSSENS, MARC L.: *Calorimetry*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008
- [161] KANGEDAL, PETER; NILSSON, DANIEL: *Fire Safety on Intercity and Inter-*

Literaturverzeichnis

- regional Multiple Unit Trains*. Department of Fire Safety Engineering, Lund University Sweden, 2002
- [162] KARLSSON, BJÖRN; QUINTIERE, JAMES G.: *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press LCC, New York, 2000
- [163] KEMMANN, OLIVER; PASCHEN, CHRISTIAN: *Verfahren zum Betrieb eines Schienenfahrzeugs im Brandfall und dafür ausgebildetes Schienenfahrzeug*. Europäische Patentanmeldung, 2010
- [164] KENNEDY, WILLIAM D.; FUSTER, TORA; SWANSON, JOHN: *The Cost Effectiveness of On-Board Train Fire Suppression Systems in Underground Rail Transit Systems*. Second International Conference on Fires in Vehicles, Chicago, 2012
- [165] KLING, TERHI; RYYÄNEN, JOONAS; HAKKARAINEN, TUULA; MIKKOLA, ESKO; PAAJANEN, ANTTI; HOSTIKKA, SIMO: *TRANSFEU Project – WP5, D5.4: Numerical Tool for Simulation of the Passenger’s Evacuation for the Train Scenarios*. FP7 contract number: 233786, 2012
- [166] KLINGER, MICHAEL: *Brandrisikoanalyse und Brandschutzkonzept – Entwicklung von Standarddokumenten für Schienenfahrzeuge und Anwendung an einem konkreten Beispiel*. Diplomarbeit an der Bergischen Universität Wuppertal, 2008
- [167] KLINGER, MICHAEL: *Aktuelle Brandschutzregelwerke für Schienenfahrzeuge*. EI – Eisenbahningenieur, Mai 2012
- [168] KÖNNECKE, RAINER; SCHNEIDER, VOLKER: *A Fire Engineering Design for New and Existing Subway Stations*. Proceedings Interflam2004, Fire Science & Engineering Conference, Edinburgh, 2004
- [169] KOENIG, JEAN-GÉRARD; BONDUELLE, YVES; RAMBACH, ETIENNE: *Rapport Final de l’Enquete sur l’Accident du Train 261 Paris-Munich Survenu le 6 Novembre 2002 a Nancy*. Bureau d’enquêtes sur les accidents de transport terrestre, Paris, 2004
- [170] KROMIK, ANDREAS: *Thermisches Versagen von Schienenfahrzeugverglasungen*. Carl Wilhelm Cleff GmbH & Co. KG, E-Mail-Verkehr vom 27.11.2013
- [171] KUMM, MIA: *Carried Fire Load in Mass Transport Systems – A Study of*

- Occurrence, Allocation and Fire Behaviour of Bags and Luggage in Metro and Commuter Trains in Stockholm*. Mälardalen University Sweden, 2010
- [172] KUNKELMANN, JÜRGEN: *Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2013
- [173] KUTZ, HOLGER: *Foliensatz zur Dokumentation des Brandversuches an einem Essener U-Bahn-Fahrzeug*. Essener Verkehrs-AG, 2007
- [174] LARSEN, VIDAR: *The Experience from Using TS 45545 in the Procurement for New EMUs for NSB*. Conference on Fire Protection of Rolling Stock, Berlin, 2014
- [175] LAZARO, MARIANO; ALVEAR, DANIEL; CAPOTE, JORGE A.; SAEZ, IDURRE; LÓPEZ, ION; ARBILDI, ANDER: *Computational and Physical Scale Modeling of Smoke Movement in High Speed Trains*. INTERFLAM 2013 – Proceedings of the thirteenth international conference, London, 2013
- [176] LUTTRUP, MANUEL: *Numerische Analyse von Brandgasausbreitungen in personenbesetzten Schienenfahrzeugen*. Bachelor Thesis an der Bergischen Universität Wuppertal, 2014
- [177] MARSH, NATHAN D.; GANN, RICHARD G.; AVERILL, JASON D.; NYDEN, MARC R.: *NIST Technical Note 1750 – Smoke Component Yields from Bench-Scale Fire Tests: 1. NFPA 269 / ASTM E 1678*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2013
- [178] MBO: *Musterbauordnung*. ARGEBAU, Fachkommission Bauaufsicht; Fassung November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012,
- [179] MCGRATTAN, KEVIN: *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide – Volume 4: Software Configuration Management Plan*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2010
- [180] MEDTHERM CORPORATION: *Heat Flux Transducers and Infrared Radiometers for the Direct Measurement of Heat Transfer Rates*. Huntsville, Alabama, 2003
- [181] MILFORD, ADRIAN; SENEZ, PETER; CALDER, KEITH; COLES, ANDREW:

Literaturverzeichnis

- Computational Analysis of Ignition Source Characteristics on Fire Development in Rapid Transit Vehicles*. Third International Conference on Fires in Vehicles, Berlin, 2014
- [182] MINDBAURL: *Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (Muster-Industriebau-Richtlinie – MIndBauRL)*. ARGEBAU, Fachkommission Bauaufsicht; Stand Juli 2014,
- [183] MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI: *Sicurezza nelle gallerie ferroviarie*. Gazzetta Ufficiale n. 83, Roma, 2005
- [184] MITCHELL, ALISTAIR: *The Best Carry On Luggage Reviews 2014*. www.carryonluggagesize.info, abgerufen am 17.08.2014
- [185] MÜNCH, JÜRGEN: *Ermittlungsbericht "Brandkatastrophe am 11.11.2000 am Kitzsteinhorn in Kaprun/Österreich" – Ermittlungsverfahren der Staatsanwaltschaft Heilbronn, Az: 21Js27386/05*. Landespolizeidirektion Stuttgart, 2007
- [186] MÜNCH, MATTHIAS; GERBER, STEPHAN; OEVERMANN, MICHAEL: *Analyse von verschiedenen Verbrennungsmodellen im Hinblick auf Brandsimulationen in praktischen Geometrien*. 3. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, 2013
- [187] MORGAN, HOWARD P.; DE SMEDT, JEAN-CLAUDE: *Prescription in Flight*. Fire Prevention and Fire Engineers Journal, 2002
- [188] MSC/CIRC. 1002: *Guidelines on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety*. IMO, Maritime Safety Committee, London, 2001
- [189] MÉTRAL, SERGE: *Benefits of Standardisation in Fire Protection in Rolling Stock*. Third International Conference on Fires in Vehicles, Berlin, 2014
- [190] MULHOLLAND, GEORGE W.: *Smoke Production and Properties*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008
- [191] MULHOLLAND, GEORGE W.; CROARKIN, CARROLL: *Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke*. Fire and Materials, Volume 24, 2000
- [192] MULHOLLAND, GEORGE W.; JOHNSON, ERIK L.; FERNANDEZ, MARCO G.: *Design and Testing of New Smoke Concentration Meter*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2000

- [193] OBERBACH, KARL; BAUR, ERWIN; BRINKMANN, SIGRID; SCHMACHTENBERG, ERNST: *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [194] O’KONSKI, RICHARD: *PyroSim User Manual*. Thunderhead Engineering, Manhattan, Kansas, 2014
- [195] PASCHEN, CHRISTIAN; MEYER, TOBIAS: *Brandsimulation und Feuerlöschanlagen – Möglichkeiten und Grenzen bei der computergestützten Untersuchung von Auslösung und Löschwirkung, Vergleich Simulationsrechnung mit Brandversuchen*. VdS-Fachtagung Feuerlöschanlagen, Köln, 2012
- [196] PEACOCK, RICHARD D.; RENEKE, PAUL A.; AVERILL, JASON D.; BUKOWSKI, RICHARD W.; KLOTE, JOHN H.: *Fire Safety of Passenger Trains; Phase II: Application of Fire Hazard Analysis Techniques*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 2002
- [197] PIZZEGHELLO: *Forschungsprojekt TRANSFEU – Szenario 2A – Technische Übersichtszeichnungen zur Fahrzeugklimatisierung*. 2011
- [198] PURSER, DAVID A.: *Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008
- [199] RADKE, SABINE: *Verkehr in Zahlen 2014/2015*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hamburg, 2014
- [200] RESOLUTION A.800 (19): *Revised Guidelines for Approval of Sprinkler Systems Equivalent to That Referred to in SOLAS Regulation II-2/12*. incl. Res. MSC.284 (86) Amendments of 2009, IMO, Maritime Safety Committee, London, 1995
- [201] ROGSCHE, CHRISTIAN: *FDS und OpenMP – Erfahrungen bei der Entwicklung*. FDS Usergroup, 3. Anwendertreffen, Berlin, 2009
- [202] ROGSCHE, CHRISTIAN: *Simulationenmethoden für Brandschutz und Evakuierung – Grundlagen – Anwendung – Erweiterung*. Dissertation an der Bergischen Universität Wuppertal, 2014
- [203] SAHM, STEFAN: *Thermisches Versagen von Schienenfahrzeugverglasungen*. Alux-Luxar GmbH & Co. KG, E-Mail-Verkehr vom 21.11.2013

Literaturverzeichnis

- [204] SAINRAT, ALAIN; ET AL.: *Transport Fire Safety Engineering in the European Union (TRANSFEU) Project – Final Report*. Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 2013
- [205] SCHILLING, RENÉ: *FOGTEC Green Concept: Neue Technische Lösungen im Brandschutz zur Kostenoptimierung im ÖPNV*. 3. Klagenfurter Verkehrstagung »Mobilität-Technik-Zukunft«, 2013
- [206] SCHULZE: *Thermisches Versagen von Schienfahrzeugverglasungen*. Bombardier Transportation GmbH, Telefonat vom 05.12.2013
- [207] SHIELDS, T. J.; SILCOCK, G. W. H.; HASSANI, S. K. S.: *Behavior of Glazing in a Large Simulated Office Block in a Multi-Story Building*. Journal of Applied Fire Science, Volume 7, 1997
- [208] SOLAS: *International Convention for the Safety of Life at Sea*. Consolidated Edition: Consolidated text of SOLAS 1974 and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates, IMO, London, 2012
- [209] SPIEGEL ONLINE: *Südindien: Dutzende Menschen sterben in brennendem Zug*. www.spiegel.de/panorama/zug-unglueck-in-indien-dutzende-tote-nachfeuer-in-tamil-nadu-express-a-847084.html, abgerufen am 22.10.2013
- [210] STUDIENGESELLSCHAFT STAHLANWENDUNG E.V. (Hrsg.): *EUREKA-Project – Fires in Transport Tunnels (FIRETUN) – Report on Full-Scale Tests*. Düsseldorf, 1995
- [211] STUVATEC - STUDIENGESELLSCHAFT FÜR UNTERIRDISCHE VERKEHRSANLAGEN (Hrsg.): *Analyse und Risikobetrachtung von Brandereignissen in schienengebundenen ÖPNV-Tunnelanlagen*. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Köln, 2010
- [212] TECHNICAL BULLETIN 133: *Flammability Test Procedure for Seating Furniture for Use in Public Occupancies*. Department of Consumer Affairs, Bureau of Home Furnishings and Thermal Isolation, North Highlands, California, January 1991
- [213] TEWARSON, ARCHIBALD: *Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fire*. Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, Quincy, Massachusetts, 2008

- [214] THE NEW YORK TIMES: *Hundreds Killed in Train Fire in Egypt*. www.nytimes.com/2002/02/20/international/20CND-TRAIN.html, abgerufen am 22.10.2013
- [215] TRETTIN, CORINNA; WITTBECKER, FRIEDRICH-WILHELM; MESSA, SILVIO: *Smoke Movement in a Double-Decker Coach*. 13th International Congress on Fire and Materials, San Francisco, 2013
- [216] UIC 564-2: *Vorschriften über Brandverhütung und Feuerbekämpfung für die im internationalen Verkehr eingesetzten Schienenfahrzeuge, in denen Reisende befördert oder die der Reisezugwagenbauart zugeordnet werden*. Internationaler Eisenbahnverband, 1991
- [217] VEENKER, KLAUS: *Vergleich zwischen Ergebnissen eines Realbrandversuchs und einer FDS-Simulation eines Brandes in einem Stadtbahnwagen*. 1. Anwendertreffen der FDS Usergroup, Berlin, 2008
- [218] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRСУNTERNEHMEN (Hrsg.): *Brandschutz in Fahrzeugen und Tunneln des ÖPNV*. Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, Düsseldorf, 2005
- [219] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Hrsg.): *VDI-WÄRMEATLAS*. 11. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin, 2013
- [220] VEREIN ZUR FÖRDERUNG DES DEUTSCHEN BRANDSCHUTZES E.V. (Hrsg.): *Methodischer Leitfaden zur Brandursachenermittlung*. 2. Auflage, VdS-Verlag, Köln, 2013
- [221] VISCHER, ANDREAS: *Entwicklung eines numerischen Sub-Modells zur Berechnung der instationären dreidimensionalen Wärmeübertragung in Bauteilen bei Brandsimulationen*. Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2009
- [222] WHITE, NATHAN: *Fire Development in Passenger Trains*. Master Thesis an der Victoria University, Centre for Environment Safety and Risk Engineering, Australia, 2010
- [223] WICHMANN, TOLGA: *Almost One Year with EN 45545 – What Has Changed?* Conference on Fire Protection of Rolling Stock, Berlin, 2014
- [224] WIECZOREK, CHRISTOPHER J.; DEMBSEY, NICHOLAS, A.: *Human Va-*

Literaturverzeichnis

- riability Correction Factors for Use with Simplified Engineering Tools for Predicting Pain and Second Degree Burns.* Journal of Fire Protection Engineering, Volume 2, 2001
- [225] WILK, ERHARDT: *Teilbericht zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate an Schienenfahrzeugen des Personennahverkehrs.* Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, 2007
- [226] WILK, ERHARDT: *Bemessungsbrände für Schienenfahrzeuge unter besonderer Berücksichtigung des Bemessungsbrandes »Gemischter Reisezugverkehr« der DB Station&Service AG.* VDI-Fachtagung Baulicher und gebäudetechnischer Brandschutz, VDI-Berichte 2126, 2011
- [227] WILK, ERHARDT: *Diverse Unterlagen zu Zünd- und Brandversuchen »Reisegepäck«.* Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft mbH Leipzig, DVD vom 13.11.2012
- [228] WILK, ERHARDT; WIESE, JÜRGEN; TAVAKKOL-KHAH: *Ergebnisbericht zur Beurteilung von Bränden an Schienenfahrzeugen als Bemessungsbrände zur brandschutztechnischen Auslegung von oberirdischen Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG.* Frankfurt, 2000
- [229] YURDAKUL, OKTAY: *Technische Regeln für Straßenbahnen – Brandschutz – Zündinitial für Bemessungsbrand.* Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt der Stadt Berlin – Leiter der AG »Überarbeitung TR Strab Brandschutz«, E-Mail-Verkehr zwischen dem 02.07.2014 und dem 14.07.2014

Anhang A

Ergänzende Experimentaldaten

A.1 Versuchsbedingungen

- Die Gepäckstücke werden in Anlehnung an DIN EN 13238 [77] für 48 h konditioniert und dem Klimaraum erst unmittelbar vor dem Versuch entnommen.
- Sämtliche Messeinrichtungen werden im Vorfeld der Untersuchung, entsprechend der normativen Anforderungen kalibriert (vgl. Abschnitt 5.2.2).
- Im Vorfeld findet eine Messung der individuellen Ansprechzeiten der einzelnen Detektoren statt, um diese in der Auswertung synchronisieren zu können.
- Die Lufttemperatur im Raum beträgt 14 °C infolge jahreszeitlicher Gegebenheiten. Eine Beheizung ist aufgrund des großen Luftwechsels nicht darstellbar.

A.2 Wärmefreisetzung eines Papierkissens nach DIN 54341

Abbildung A.1 zeigt die Wärmefreisetzung eines Papierkissens nach DIN 54341 [67], das im Kontext der Vorversuche als Zündinitial verwendet wird .

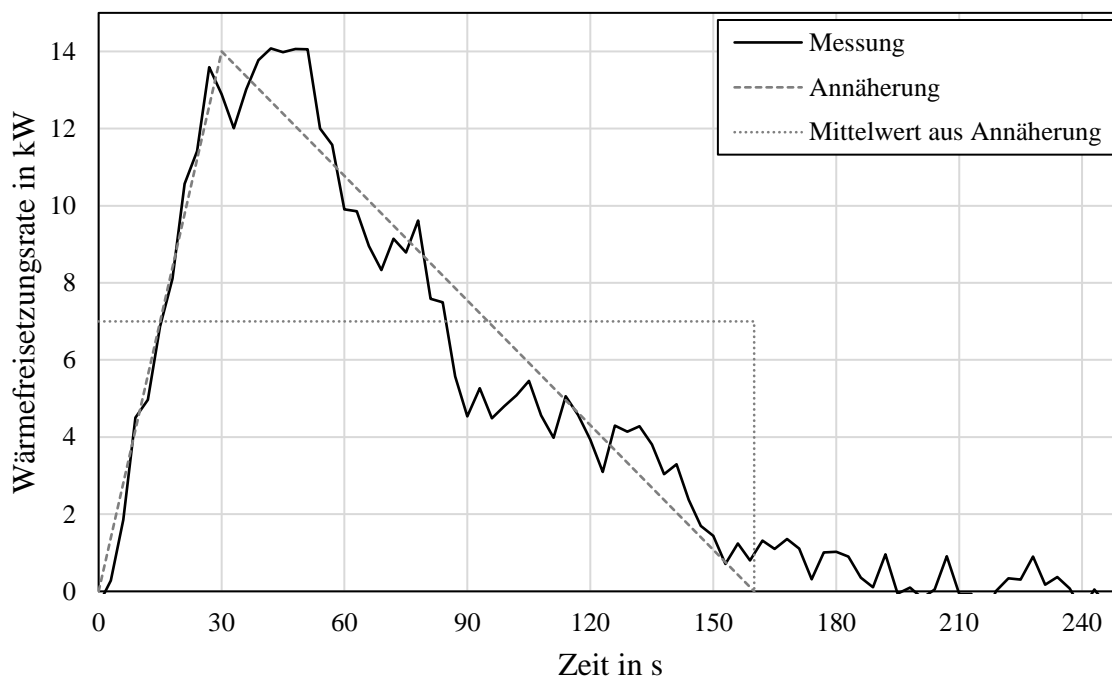


Abbildung A.1: Wärmefreisetzungsrates eines Papierkissens nach DIN 54341

A.3 Gepäckstücke der Vorversuche

Tabelle A.1: Vorversuch 1 – »Reisetasche C«

Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Kissen	1	Obermaterial: 40 % Polyester, 30 % Leinen, 30 % Viskose, Füllung: 100 % Polyester	387,6
Socken	3	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	168,7
Decke	1	100 % Polyester	485,7
T-Shirt	3	100 % Baumwolle	573,0
Oberhemd, gestreift	1	100 % Baumwolle	237,6
Oberhemd, unifarben	1	100 % Baumwolle	223,9
Nachthemd	1	100 % Baumwolle	208,1
Jogginghose	1	53 % Baumwolle, 35 % Polyester, 12 % Viskose	366,6
Regenhose	1	Obermaterial, Futter: 100 % Polyester, Beschichtung: 100 % Polyurethan	312,0
Reisetasche	1	100 % Polyester	794,6
Summe	14		3757,8

Tabelle A.2: Vorversuch 2 – »Reisetasche E«

Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Kissen	1	Obermaterial: 40 % Polyester, 30 % Leinen, 30 % Viskose, Füllung: 100 % Polyester	388,2
Socken	3	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	168,6
Decke	1	100 % Polyester	477,0
T-Shirt	3	100 % Baumwolle	551,6
Oberhemd, gestreift	1	100 % Baumwolle	237,5
Oberhemd, unifarben	1	100 % Baumwolle	224,1
Nachthemd	1	100 % Baumwolle	212,0
Jogginghose	1	53 % Baumwolle, 35 % Polyester, 12 % Viskose	390,6
Regenhose	1	Obermaterial, Futter: 100 % Polyester, Beschichtung: 100 % Polyurethan	309,4
Reisetasche	1	100 % Polyester	795,5
Summe	14		3754,5

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.3: Vorversuch 3 – »Reisetasche B«

Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Kissen	1	Obermaterial: 40 % Polyester, 30 % Leinen, 30 % Viskose, Füllung: 100 % Polyester	387,4
Socken	3	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	168,7
Decke	1	100 % Polyester	483,7
T-Shirt	3	100 % Baumwolle	554,4
Oberhemd, gestreift	1	100 % Baumwolle	237,2
Oberhemd, unifarben	1	100 % Baumwolle	224,9
Nachthemd	1	100 % Baumwolle	206,2
Jogginghose	1	53 % Baumwolle, 35 % Polyester, 12 % Viskose	388,6
Regenhose	1	Obermaterial, Futter: 100 % Polyester, Beschichtung: 100 % Polyurethan	311,7
Reisetasche	1	100 % Polyester	781,7
Summe	14		3744,5

Tabelle A.4: Vorversuch 4 – »Reisetasche A«

Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Kissen	1	Obermaterial: 40 % Polyester, 30 % Leinen, 30 % Viskose, Füllung: 100 % Polyester	387,1
Socken	3	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	169,6
Decke	1	100 % Polyester	479,3
T-Shirt	3	100 % Baumwolle	570,1
Oberhemd, gestreift	1	100 % Baumwolle	237,7
Oberhemd, unifarben	1	100 % Baumwolle	223,7
Nachthemd	1	100 % Baumwolle	203,2
Jogginghose	1	53 % Baumwolle, 35 % Polyester, 12 % Viskose	409,2
Regenhose	1	Obermaterial, Futter: 100 % Polyester, Beschichtung: 100 % Polyurethan	321,7
Reisetasche	1	100 % Polyester	800,0
Summe	14		3801,6

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.5: Vorversuch 5 – »Reisetasche D«

Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Kissen	1	Obermaterial: 40 % Polyester, 30 % Leinen, 30 % Viskose, Füllung: 100 % Polyester	388,4
Socken	3	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	168,8
Decke	1	100 % Polyester	523,3
T-Shirt	3	100 % Baumwolle	558,8
Oberhemd, gestreift	1	100 % Baumwolle	236,7
Oberhemd, unifarben	1	100 % Baumwolle	225,2
Nachthemd	1	100 % Baumwolle	204,5
Jogginghose	1	53 % Baumwolle, 35 % Polyester, 12 % Viskose	385,1
Regenhose	1	Obermaterial, Futter: 100 % Polyester, Beschichtung: 100 % Polyurethan	328,8
Reisetasche	1	100 % Polyester	796,9
Summe	14		3815,3

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

A.4 Gepäckstücke der Hauptversuche

Tabelle A.6: Hauptversuch 1 – Gepäckstück »Strandurlaub«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Badeschuhe	1	100 % Polyurethan	444,6
	Sneaker	1	Obermaterial: 100 % Polyurethan, Sohle: 100 % Polyvinylchlorid	828,8
Hosen	Sandalen	1	Obermaterial: 100 % Polyvinylchlorid, Sohle: 100 % Ethylenvenylacetat	306,0
	Jeans	1	100 % Baumwolle	724,0
	Stoffhose, weiß	1	98 % Baumwolle, 2 % Elasthan	340,9
	Shorts, weiß/blau	1	100 % Polyester	191,4
	Shorts, grün, unifarben	1	100 % Baumwolle	239,8
	Shorts, grün, kariert	1	100 % Baumwolle	380,3
	Badeshorts	1	100 % Polyester	100,7
	Badehose	1	88 % Polyester, 12 % Spandex	86,4
	Unterhose	1	100 % Baumwolle	46,9
	Unterhose	1	100 % Baumwolle	43,7
Unterwäsche	Unterhose	1	93 % Baumwolle, 7 % Spandex	49,9
	Unterhose	1	93 % Baumwolle, 7 % Spandex	60,5
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	48,1
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	70,8
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	68,7
	Oberhemd	1	100 % Baumwolle	193,6
	Oberhemd	1	100 % Baumwolle	299,3
	Oberhemd	1	100 % Baumwolle	201,6
	Poloshirt, weiß	1	65 % Polyester, 35 % Baumwolle	210,2
	T-Shirt, grau	1	90 % Baumwolle, 10 % Polyester	148,2
T-Shirts	T-Shirt, blau	1	90 % Baumwolle, 10 % Polyester	180,5
	T-Shirt, hellgrau	1	100 % Baumwolle	151,6
	T-Shirt, blau, ärmellos	1	100 % Baumwolle	123,3
	T-Shirt, gelb	1	100 % Baumwolle	137,2

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.6: Hauptversuch 1 - Gepäckstück "Strandurlaub" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Pullover	T-Shirt, rot	1	100 % Baumwolle	154,4
	Sweatjacke	1	70 % Baumwolle, 30 % Polyester	886,0
Socken	Pulloverjacke	1	100 % Baumwolle	368,3
	Socken	7	100 % Baumwolle	196,6
Jacken	Sommerjacke	1	100 % Baumwolle	571,6
	Regenjacke	1	100 % Polyamid, Futter: 100 % Baumwolle	572,2
Taschen	Tragetasche	1	100 % Baumwolle	67,5
	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	11,2
Hygieneartikel	Tasche	1	100 % Polyester	408,2
	Waschtasche	1	100 % Polyester	47,8
Sonstiges	Zahnbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	11,5
	Zahnpasta	1		31,8
Koffer	Sonnenmilch	1		220,9
	Styling-Gel	1		204,8
Koffer	Nassrasierer	1		44,5
	Insektenspray	1		116,1
Koffer	Handtuch	1	100 % Baumwolle	604,8
	Geschirrhandtuch	1	100 % Baumwolle	98,1
Koffer	Gürtel	1	Leder	200,9
	Sonnenbrille	1	100 % Polypropylen	30,9
Koffer	Strandmatte	2	Cellulose	375,2
	Feuerzeug	1		15,7
Koffer	Buch	1	Cellulose	857,6
	Trolley, schwarz	1	Polyester, Abmessungen: 74 cm x 46 cm x 28 cm	3.694,0
Summe				15.467,6

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.7: Hauptversuch 2 – Gepäckstück »Reisender Herr«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Sneaker, braun	1	Leder, Kunststoff	745,9
	Sneaker, schwarz	1	Leder, Kunststoff	867,2
Hosen	Jeans	1	79 % Baumwolle, 21 % Polyester	678,8
	Stoffhose, beige	1	99 % Baumwolle, 1 % Elasthan	397,4
	Trainingshose	1	100 % Polyester	378,7
	Stoffhose, weiß	1	100 % Baumwolle	528,4
	Unterhose, blau	1	93 % Baumwolle, 7 % Spandex	57,3
Unterwäsche	Unterhose, orange	1	93 % Baumwolle, 7 % Spandex	50,3
	Unterhose, schwarz	1	93 % Baumwolle, 7 % Spandex	55,7
	Unterhose, schwarz	1	93 % Baumwolle, 7 % Spandex	50,9
	Unterhose, schwarz/blau	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	69,2
	Unterhose, blau/grau	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	68,7
	Unterhose, grün	1	95 % Baumwolle, 5 % Lycra	66,2
	Oberhemd, rot kariert	1	100 % Baumwolle	195,2
	Oberhemd, weiß/grün kariert	1	100 % Baumwolle	176,0
	Oberhemd, weiß	1	97 % Baumwolle, 3 % Elasthan	231,7
	Oberhemd, blau gestreift	1	100 % Baumwolle	208,3
T-Shirts	grau	1	100 % Baumwolle	116,1
	grün	1	100 % Baumwolle	138,9
	dunkelgrün	1	100 % Baumwolle	168,0
	braun	1	100 % Baumwolle	211,2
	lila	1	100 % Baumwolle	154,4
	schwarz	1	100 % Baumwolle	185,0
	schwarz	1	95 % Viskose, 5 % Elasthan	207,7
	Polo-Shirt, blau	1	100 % Baumwolle	242,2
	Kapuzenjacke	1	80 % Baumwolle, 20 % Polyester	504,9
	Kapuzenpullover	1	74 % Baumwolle, 26 % Polyester	668,5
Socken	7	100 % Baumwolle	413,3	

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.7: Hauptversuch 2 - Gepäckstück "Reisender Herr" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Jacke	Lederjacke	1	57 % Viskose, 43 % Polyester	521,1
Taschen	Rucksack	1	100 % Polyester	296,7
	Rucksackregenschutz	1	100 % Polyamid	89,1
	Plastiktüten	1	100 % Polyethylen	93,8
	Stoffbeutel	1	100 % Baumwolle	41,2
Hygieneartikel	Waschtasche	1	100 % Polyester, Futter: 100 % Nylon	105,5
	Zahnbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	26,0
	Hautcreme	1		85,7
	Feuerzeug	1		15,3
	Deodorant Axe	1		90,5
Sonstiges	Gürtel, blau	1	Textilgewebe	66,4
	Gürtel, schwarz	1	Leder	132,7
	Tischdecke	1	100 % Baumwolle	91,0
	Handtuch, groß	1	100 % Baumwolle	347,5
	Handtuch, klein	1	100 % Baumwolle	246,3
	Buch »Pädagogische Psychologie II«	1	Cellulose	1.106,8
	Kamera Photosmart	1		217,4
Koffer	Reisetasche mit Rollen, schwarz	1	Polyester, Abmessungen: 65 cm x 30 cm x 35 cm	1.940,0
Summe				13.349,1

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.8: Hauptversuch 3 – Gepäckstück » Geschäftsreise«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Lederschuhe, braun	1	Leder, Gummi	631,6
	Herrenschuhe, schwarz	1	Leder, Gummi	1.080,7
Hosen	Stoffhose, beige	1	100 % Baumwolle	598,2
	Anzughose, Nadelstreifen	1	65 % Polyester, 35 % Viskose	365,2
	Anzughose, blau	1	50 % Polyester, 50 % Schurwolle	392,5
	Anzughose, schwarz	1	100 % reine Schurwolle, 100 % Viskose	757,7
	Anzughose, schwarz	1	100 % reine Schurwolle, 100 % Polyester	390,4
	Anzughose, schwarz	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	63,6
Unterwäsche	Unterhose, blau	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	62,0
	Unterhose, grau	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	60,9
	Unterhose, dunkelblau	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	61,2
	Unterhose, hellblau	1	90 % Baumwolle, 10 % Elasthan	67,4
	Unterhose, grau	1	93 % Baumwolle, 7 % Elasthan	58,5
	Oberhemd, weiß/rot gestreift	1	70 % Baumwolle, 30 % Elasthan	179,8
	Oberhemd, weiß gestreift	1	100 % Baumwolle	187,1
	Oberhemd, flieder	1	100 % Baumwolle	236,6
	Oberhemd, blau/weiß gestreift	1	65 % Polyester, 35 % Baumwolle	117,6
	Oberhemd, blau/weiß gestreift	1	100 % Baumwolle	139,3
T-Shirts	blau/weiß/gelb gestreift	1	50 % Polyester, 50 % Viskose	156,7
	weiß/blau	1	100 % Baumwolle	185,3
	T-Shirt, weiß	1	100 % Baumwolle	154,6
	T-Shirt, weiß	1	100 % Baumwolle	177,5
	T-Shirt, weiß	1	100 % Baumwolle	188,7
	T-Shirt, weiß	1	100 % Baumwolle	129,4
	T-Shirt, weiß	1	100 % Baumwolle	147,8
	T-Shirt, langarm	1	100 % Baumwolle	169,2
	T-Shirt, blau	1	100 % Baumwolle	113,6
	Socken	1	100 % Baumwolle	45,9

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.8: Hauptversuch 3 - Gepäckstück "Geschäftsreise" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Jacke	Sportsocken, weiß	6	100 % Baumwolle	296,8
	Jackett	1	100 % Schurwolle, 100 % Polyester	793,5
	Jacke, beige	1	100 % Nylon, 100 % Polyester	632,4
	Jackett, schwarz	1	100 % reine Schurwolle, 100 % Polyester	607,8
Taschen	Jackett, rot	1	75 % Polyester, 25 % Viskose, 100 % Polyester	522,7
	Schuhbeutel	1	100 % Baumwolle	40,4
	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	14,7
	Dose mit Rasierschaum	1		369,1
Hygieneartikel	Waschtasche, schwarz	1	87 % Polyester, 13 % Nylon	104,6
	elektrische Zahnbürste	1		103,2
	Zahnbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	13,7
	Zahnpasta	1		73,6
	Fa Duschgel	1		176,6
	Feuerzeug	1		20,1
	Nivea Creme	1		146,5
	Haarbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	53,0
	Nassrasierer, Klängen	1		60,0
	Tempo Taschentücher	1	Cellulose	23,1
	Gard Styling-Gel	1		91,8
	Sonstiges	Deodorant Dose »Axe Anarchy«	1	
Handtuch, braun		1	100 % Baumwolle	175,5
Handtuch, weiß		1	100 % Baumwolle	148,0
Funkwecker		1		87,6
Krawatte		1	100 % Seide	46,3
Krawatte		1	100 % Seide	60,2
Schal		1	100 % Polyacryl	105,6
Gürtel		1	Leder	82,2
Feuerzeug		1		16,0

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.8: Hauptversuch 3 - Gepäckstück "Geschäftsreise" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
	Papers	1	Cellulose	3,7
	Cigarette Maker	1	100 % Polypropylen	73,9
	Tabak	1		24,4
	Pocket PC	1		155,2
	Pocket PC Tasche	1		38,2
	Mobiltelefon	1		80,9
	Notebook	1		2.747,8
	Buch Windows NT-4	1	Cellulose	1.564,9
Koffer	Koffer, dunkelblau	1	Polyester, Abmessungen: 53 cm x 40 cm x 25 cm	2.316
Summe				18.923,6

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.9: Hauptversuch 4 – Gepäckstück »Winterurlaub«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Badeschuhe	1	Sohle: 100 % Ethylenvenylacetat, 100 % Elasthan	223,4
	Wanderstiefel	1	Gummi, Leder	2.134,6
Hosen	Jeans	1	100 % Baumwolle	719,3
	Cordhose	1	100 % Baumwolle	669,8
Unterwäsche	Traininghose	1	80 % Baumwolle, 20 % Polyester	522,4
	Jeans, blau	1	100 % Baumwolle	758,7
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	69,4
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	57,2
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	61,0
	Unterhose	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	50,1
	Unterhose	1	93 % Baumwolle, 7 % Elasthan	52,1
	Unterhose	1	93 % Baumwolle, 7 % Elasthan	62,6
	Unterhose	1	100 % Baumwolle	43,8
	Unterhose	1	100 % Baumwolle	251,3
Hemden	Oberhemd, blau	1	100 % Baumwolle	245,4
	Oberhemd, grau	1	100 % Baumwolle	208,7
T-Shirts	Oberhemd, rot	1	100 % Baumwolle	285,1
	langarm	1	100 % Baumwolle	186,2
	kurz	1	100 % Baumwolle	211,9
	kurz	1	100 % Baumwolle	219,5
	grau	1	85 % Baumwolle, 15 %Viskose	278,0
	blau	1	52 % Polyester, 48 % Baumwolle	224,9
Pullover	schwarz	1	90 % Baumwolle, 10 %Viskose	500,2
	Pullover, schwarz	1	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	485,9
Socken	Fleecepulli, hellblau	1	100 % Polyester	170,3
	Socken	3	65 % Baumwolle, 22 % Polyester, 13 % Polyacryl	289,1
Jacke	Socken	5	100 % Baumwolle	219,7
	Wollsocken	3	80 % Schurwolle, 20 % Baumwolle	1.680,1
	Winterjacke	1	100 % Baumwolle, Futter: 100 %Polyester	

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.9: Hauptversuch 4 - Gepäckstück »Winterurlaub« (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Taschen	Daunenjacke, blau	1	100 % Polyamid, 50 % Daunen, 50 % Federn	1.000,4
	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	26,2
	Tasche	1	100 % Polyester	149,8
Hygieneartikel	Waschtasche	1	100 % Polyester	19,2
	Zahnbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	23,7
	Haarbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	45,2
Sonstiges	Einwegrasierer	3		28,1
	Taschentücher	1	Cellulose	16,0
	Handtuch	1	100 % Baumwolle	331,9
	Gürtel	1	Leder	199,3
	Mütze	1	100 % Polyacryl	43,5
	Stulpen	1	82 % Polyacryl, 18 % Polyester	75,9
	Schal	1	100 % Schurwolle	80,9
Koffer	Schlafsack	1	Außenmaterial: 100 % Nylon, Innenmaterial: 100 % Polyester	868,7
	Buch »pädagogische Psychologie«	1	Cellulose	849,1
	Feuerzeug ¹	±		17,3
	Body-Butter	±		81,6
	Deespray	±		66,0
	Kamera-Komica	±		179,2
	Trolley, dunkelblau, Jümpeng	1	Polyester, Abmessungen: 72 cm x 30 cm x 50 cm	4.726
	Summe			19.364,6

¹ Aufgrund einer Verpuffung in HV3 (vgl. Abschnitt 6.2.2) wurden potentiell gefährliche Gegenstände bei den Folgeversuchen extrahiert

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.10: Hauptversuch 5 – Gepäckstück »Reisende Seniorin«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Halbschuhe	1		609,5
	Schnürschuhe	1		222,6
Hosen	Hose, blau	1	95 % Polyester, 5 % Spandex	409,1
	Hose, orange	1	95 % Polyester, 5 % Spandex	314,8
	Rock, zartrosa	1	100 % Seide	134,5
	Schlafanzug hose, lang	1	60 % Baumwolle, 40 % Polyester	139,4
	Schlafanzug hose, kurz	1	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	73,3
Unterwäsche	Sport hose	1	92 % Polyester, 8 % Elasthan	321,0
	Unterhose, pink	1	85 % Baumwolle, 15 % Elasthan	37,6
	Unterhose, schwarz	1	85 % Baumwolle, 15 % Elasthan	30,2
	Unterhose, weiß	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	35,9
	Unterhose, weiß	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	48,2
	BH, Leopardennmuster	1	80 % Polyamid, 20 % Elasthan	58,1
	BH, schwarz	1	76 % Polyester, 20 % Polyamid, 4 % Elasthan	49,3
	Negligée	1	90 % Polyamid, 10 % Elasthan	113,6
	Bikinioberteil, schwarz/weiß	1	82 % Nylon, 18 % Elasthan	108,4
	Nachthemd	1	100 % Polyester	78,6
Blusen	Unterhemd, weiß	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	201,5
	Unterhemd, pink	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	122,3
	Unterhemd, schwarz	1	92 % Viskose, 8 % Elasthan	119,2
	Unterhemd, schwarz	1	100 % Baumwolle	80,8
	Unterhemd, schwarz	1	100 % Baumwolle	123,3
	Bluse, schwarz/weiß	1	55 % Baumwolle, 45 % Polyester	142,6
	Bluse, bunt	1	100 % Polyester	96,1
	Bluse, grau	1	100 % Polyester	118,4
	schwarz	1	100 % Baumwolle	131,4
	schwarz, langarm	1	100 % Baumwolle	226,9
T-Shirts	rot	1	100 % Baumwolle	206,4

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.10: Hauptversuch 5 - Gepäckstück "Reisende Seniorin" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
	weinrot	1	100 % Baumwolle	167,7
	blau	1	100 % Baumwolle	135,1
	hellblau	1	100 % Baumwolle	128,7
Pullover	Pullover, lila	1	100 % Polyacryl	177,2
	Pullover, rosa	1	100 % Polyacryl	246,1
	Pullover, blau/weiß	1	50 % Baumwolle, 50 % Polyacryl	444,1
Socken	Socken	7	100 % Baumwolle	311,8
	Damensocken, braun, Seitenfach	7	100 % Nylon	47,8
Jacke	Blazer, grün	1	52 % Leinen, 37 % Viskose, 11 % Nylon	307,7
Taschen	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	19,2
	Handtasche, schwarz	1	100 % Polyurethan	293,1
	Handtasche, weiß	1	100 % Polyurethan	280,6
	Waschtasche	1	100 % Polyester	172,1
Hygieneartikel	Zahnbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	21,1
	Zahnpasta	±		±55,±
	Handcreme	±		±01,6
	Damenbinde	2		13,2
	Haarbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	86,9
	elektrischer Lockenstab	±		±42,7
	Mildes Blütenwasser	±		±23,5
	Dose, pink	1	100 % Polyethylen	42,9
	Feuchtigkeitsmaske	1		13,3
	Erfrischungstuch	1		7,2
	Pflegespülmittel	±		±12,3
	Shampoo	±		±52,0
Lebensmittel	Pfefferminztee	1		72,4
	Rooibostee	1		77,3
Sonstiges	Küchenschürze	1	100 % Baumwolle	129,5

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.10: Hauptversuch 5 - Gepäckstück "Reisende Seniorin" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
	Gürtel	1		26,5
	Tuch	1	100 % Baumwolle	118,0
	Zeitschrift »InTouch«	1	Cellulose	166,3
	Zeitschrift »Freundin«	1	Cellulose	392,7
	Buch »Europe on a shoestring«	1	Cellulose	1.050,7
	Mobiltelefon	4		314,5
Koffer	Trolley, blau, Raute »Edwards«	1	Polyester, Abmessungen: 58 cm x 33 cm x 27 cm	3.142
Summe				12.444,2

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.11: Hauptversuch 6 – Gepäckstück »Reisendes Kind«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Sneaker, Nike	1	Gummi, Leder, Baumwolle	810,0
	Sandalen	1	Gummi, Polyester	442,3
	Strandsandalen	1		435,0
Hosen	Schuhschoner	1		192,2
	Gummistiefel	1	Gummi, Synthetik	1.530,4
	Stoffhose, grau	1	100 % Baumwolle	303,3
	Jeans	1	100 % Baumwolle	382,3
	Jeans kurz	1	100 % Baumwolle	422,4
	Badeshorts	1	100 % Polyester	91,6
	Badehose, schwarz	1	80 % Polyamid, 20 % Elasthan	59,4
	Schlafanzughose	1	60 % Baumwolle, 40 % Viskose	109,8
	Boxershorts »Simpsons«	1	100 % Polyester	69,1
	grau, grüner Bund	1	85 % Baumwolle, 15 % Viskose	35,6
Unterwäsche	grau, roter Bund	1	85 % Baumwolle, 15 % Elasthan	36,7
	rot	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	38,1
	schwarz	1	85 % Baumwolle, 15 % Elasthan	27,3
	Boxershorts, rot	1	85 % Baumwolle, 15 % Elasthan	95,8
	Unterhose, »Hello Kitty«	1	92 % Polyamid, 8 % Elasthan	36,0
	Unterhemd, »Hello Kitty«	1	92 % Polyamid, 8 % Elasthan	76,5
	Unterhemd, gelb	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	79,1
	Unterhemd, schwarz	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	121,3
	Unterhemd, blau	1	95 % Viskose, 5 % Elasthan	91,6
	Unterhemd, grau	1	94 % Polyamid, 6 % Elasthan	96,6
T-Shirts	pink	1	100 % Baumwolle	90,3
	weinrot, langarm	1	100 % Baumwolle	173,8
	blau	1	100 % Baumwolle	112,4
	grau/gelb geringelt	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	112,7
	lila	1	92 % Baumwolle, 8 % Elasthan	99,4

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.11: Hauptversuch 6 - Gepäckstück "Reisendes Kind" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
	rot	1	100 % Baumwolle	141,0
	türkis	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	140,1
	Schlafanzughemd, langarm	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	193,6
Socken	Socken	7	100 % Baumwolle	118,9
	Neoprensocken	1	100 % Polychloropren	108,7
Spielzeug	Bauchtragetasche, »Puppe«	1	100 % Polyester	105,1
	Handtasche, »Hello Kitty«	1	100 % Nylon	125,4
Jacke	Regenjacke, orange	1	100 % Polyamid	415,0
Taschen	Tasche, rot	1	100 % Polyurethan	265,5
	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	28,7
	Aufbewahrungsdose	1	100 % Polyethylen	49,2
Sonstiges	Eimer, blau	2	100 % Polypropylen	163,1
	Trichter	1	100 % Polypropylen	12,4
	Schmuller	1	100 % Polyethylen, 100 % Polysiloxane	9,1
	Handtuch	1	100 % Baumwolle	433,7
	Geschirrhandtuch	1	100 % Baumwolle	85,7
	Waschlappen	1	100 % Baumwolle	30,1
	Paar Stulpen	1	100 % Polyacryl	46,5
	Haustuch, schwarz	1	100 % Baumwolle	51,5
	Sonnenschutz-Cap	1	100 % Baumwolle, Kunststoff-Schirm	56,0
	Taschenbuch	1	Cellulose	312,3
	Multivitamin-Brausetabletten	2		183,3
	Clear-Action-Reinigungsfluid	1		29,0
	Coffein-Shampoo	1		13,8
	Styling-Gel	1		?
	Zeekenspray	1		?
Koffer	Trolley, schwarz, Kik	1	100 % Polyester, Abmessungen: 66 cm x 35 cm x 19 cm	2.173
Summe				11.235,6

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.12: Hauptversuch 7 – Gepäckstück »Reisende Dame«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Lederstiefel	1	Leder	869,4
	Sneaker, rosa	1	Sohle: 100 % Polyvinylchlorid, 100 % Polyurethan	381,5
Hosen	Jeans	1	69 % Baumwolle, 25 % Polyester, 6 % Elasthan	433,2
	Jeans	1	100 % Baumwolle	559,4
	Stoffhose, weiß	1	100 % Baumwolle	321,8
	Stoffhose, grün	1	100 % Baumwolle	158,2
	Jeans, »Hot Pants«	1	70 % Baumwolle, 27 % Polyester, 3 % Elasthan	294,4
	Rock, schwarz	1	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	199,0
	kurze Hose, schwarz	1	96 % Polyester, 4 % Elasthan	267,1
	Strumpfhose, schwarz	1	100 % Nylon	81,0
	Strumpfhose, schwarz	1	100 % Nylon	48,2
	Unterhose, grau	1	90 % Polyamid, 10 % Elasthan	17,0
	Unterhose, weiß/silber	1	90 % Polyamid, 10 % Elasthan	19,4
	Unterhose, silber	1	90 % Polyamid, 10 % Elasthan	40,3
	Unterhose, silber	1	90 % Polyamid, 10 % Elasthan	25,8
	Unterhose, grau	1	96 % Baumwolle, 4 % Elasthan	21,3
Unterwäsche	Unterhose, schwarz	1	77 % Nylon, 23 % Elasthan	10,8
	Unterhose, dunkelgrau	1	90 % Polyamid, 10 % Elasthan	10,6
	Unterhose, weinrot	1	100 % Polyamid	7,4
	Unterhose, gelb	1	85 % Polyamid, 10 % Baumwolle, 5 % Elasthan	49,0
	BH, rot	1	75 % Polyamid, 15 % Polyester, 10 % Elasthan	99,6
	BH, rosa	1	100 % Polyamid	53,0
	Corsage, schwarz	1	86 % Polyamid, 8 % Elasthan, 6 % Polyester	99,6
	Badeanzug	1	78 % Polyamid, 22 % Elasthan	87,4
	Unterhemd, schwarz	1	100 % Baumwolle	144,6
	Unterhemd, schwarz	1	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	79,5
	Unterhemd, schwarz	1	100 % Viskose	146,6
	Unterhemd, blau	1	92 % Polyamid, 8 % Elasthan	70,7

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.12: Hauptversuch 7 - Gepäckstück "Reisende Dame" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Blusen, Tops	Unterhemd, pink	1	95 % Viskose, 5 % Elasthan	186,4
	Unterhemd, weiß	1	95 % MicroModa, 5 % Elasthan	62,8
	Top, weiß	1	100 % Baumwolle	126,3
	Top, weiß	1	100 % Baumwolle	77,7
	Top, weiß	1	100 % Baumwolle	134,3
	Top, schwarz	1	65 % Polyester, 35 % Viskose	168,3
	Top, lila	1	100 % Baumwolle	60,5
Pullover	Top, lila	1	95 % Baumwolle, 5 % Polyester	185,3
	Bluse	1	100 % Baumwolle	100,9
	Pullover, hellgrau	1	60 % Baumwolle, 30 % Nylon, 10 % Wolle	392,5
	Pullover, dunkelgrau	1	96 % Polyacryl, 4 % Polyester	224,0
Socken	Kapuzenjacke, rosa	1	100 % Baumwolle	238,3
	Socken	7	100 % Baumwolle	302,6
Jacke	Damensocken, mehrfarbig	7	100 % Nylon	34,6
	Blazer, rosa	1	45 % Wolle, 45 % Polyacryl, 10 % Polyester	677,1
Taschen	Clutch	1		234,5
	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	10,6
Hygieneartikel	Tampons	1		73,6
	Slip einlagen	1		115,0
	Wattestäbchen Packung	1		20,3
	Druckstellenpflaster	1		22,8
	Taschentücher	1	Cellulose	23,3
	Waschtasche, durchsichtig	1	100 % Polyester	24,5
	Fönaufsatz (Tülle)	1	100 % Polypropylen	14,5
	Adapter	2		53,8
	Kamm und Bürste	1		37,5
	Make-Up-Kit	4		558,0
Gesichtswasser	4		53,9	

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.12: Hauptversuch 7 - Gepäckstück "Reisende Dame" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
	elektrische Zahnbürste	±		115,2
	Zahnpasta	±		108,1
	Duschgel	±		148,3
	Deo LACOSTE	±		40,9
	Haarkur	±		227,8
	Nagelhack	±		48,2
	Make-Up-Entferner	±		35,3
	Reisefön	±		334,9
Sonstiges	Handtuch	1	100 % Baumwolle	393,9
	Gürtel, schwarz	1		51,3
	Gürtel, schwarz	1		48,6
	Gürtel, schwarz	1		67,2
	Portmonaie	1		113,0
	Zigaretten, Packung	1		21,4
	Zeitschrift »In Touch«	1	Cellulose	166,6
	Zeitschrift »Freundin«	1	Cellulose	392,1
	Buch »Lernziel Leben«	1	Cellulose	341,3
	Feuerzeug	±		58,7
Koffer	Trolley, rot, Modern Times	1	Polyester, Abmessungen: 65 cm x 28 cm x 42 cm	3.170
Summe				12.963,2

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.13: Hauptversuch 8 – Gepäckstück »Reisender Senior«

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Schuhe	Badeschuhe, schwarz	1		311,0
	Sportschuhe	1		807,8
Hosen	Jeans	1	100 % Baumwolle	782,1
	Stoffhose, blau	1	100 % Baumwolle	427,0
	Sporthose	1	65 % Baumwolle, 35 % Polyester	395,0
	Badehose	1	80 % Polyamid, 20 % Elasthan	87,6
	Unterwäsche	1	100 % Baumwolle	67,4
	Unterhose, olivgrün	1	100 % Baumwolle	53,3
Unterwäsche	Boxershorts	1	100 % Baumwolle	108,5
	Unterhose, grau	1	100 % Baumwolle	52,3
	Unterhose, blau	1	100 % Baumwolle	104,6
	Unterhose, schwarz	1	100 % Baumwolle	85,1
	Unterhose, weiß	1	100 % Baumwolle	64,1
	Unterhose, »Casa blanca«	1	95 % Baumwolle, 5 % Elasthan	55,5
	Unterhemd, schwarz	1	75 % Baumwolle, 25 % Polyester	115,8
	Unterhemd, weiß	1	100 % Baumwolle	90,2
	Unterhemd, weiß	1	100 % Baumwolle	107,0
	Unterhemd, weiß	1	100 % Baumwolle	140,8
Hemden	Unterhemd, weiß	1	100 % Baumwolle	124,2
	T-Shirt, gelb	1	100 % Baumwolle	311,0
	Polo Hemd, schwarz	1	100 % Baumwolle	246,6
	Oberhemd, blau/weiß	1	100 % Baumwolle	222,1
Pullover	Oberhemd, weiß/grün/rot	1	100 % Baumwolle	211,2
	Fleecepullover	1	100 % Polyester	437,0
	Sweatshirt	1	100 % Baumwolle	485,7
Socken	Socken	7	100 % Baumwolle	374,2
	Lederjacke	1	100 % Polyurethan	775,0
Jacke	Regenjacke, schwarz/blau	1	100 % Polyamid	691,2

Anhang A. Ergänzende Experimentaldaten

Tabelle A.13: Hauptversuch 8 - Gepäckstück "Reisender Senior" (fortgesetzt)

Kategorie	Gegenstand	Menge	Material	Masse (in g)
Taschen	Rucksack	1	100 % Polyester	359,5
	Plastiktüte	1	100 % Polyethylen	20,9
Hygieneartikel	Herrenhandsche, schwarz	1		172,6
	Waschtasche	1	Kunstleder	276,8
	Zahnbürste	1	100 % Polyethylen, Borsten: 100 % Nylon	17,0
	Zahnprotese	1		16,9
	Haarbürste	1		72,4
	Mullbinde	1		17,6
	Melkfett	±		263,1
	Stück-Seife	±		90,4
	Cremer, »Gehwehlt«	±		24,5
	Hautereme	±		54,6
Sonstiges	Deutagard Zahnpasta	±		99,2
	Nassrasierer	±		69,2
	Fa-Dusehgel	±		141
	Feuerzeug	±		15,8
	Strepsils	±		105,7
	Tabletten	±		21,7
	Sanff-Wet-Gel	±		143,6
	Handtuch	1	100 % Baumwolle	752,4
	Handschuhe	1	Baumwolle, Leder	56,7
	Hosenträger	1		131,4
Koffer	Gürtel	1	Leder	139,2
	Globetrotter Handbuch	1	Cellulose	1.209,5
	Taschenbuch »Fahrplan«	1	Cellulose	344,2
	Rollkoffer, dunkelgrau, »Hansen«	1	100 % Polyester, Abmessungen: 70 cm x 18 cm x 50 cm	2.716,0
Summe				14.036,4

Anhang B

Ergänzende Simulationsdaten

B.1 Experimentalkonfiguration

Wärmefreisetzungsraten

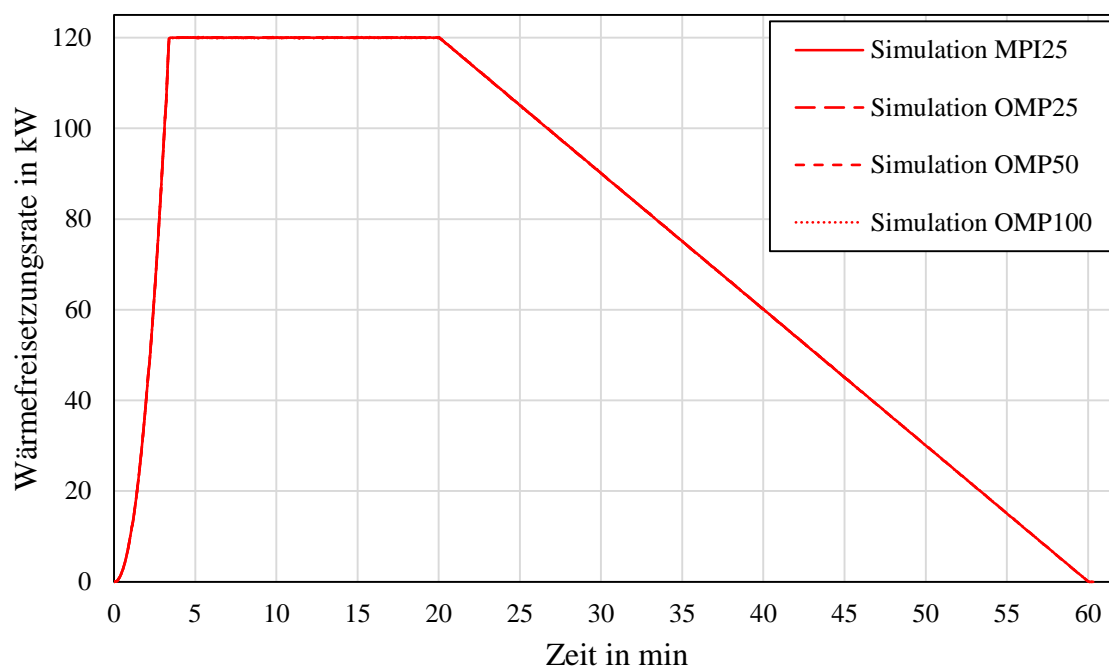


Abbildung B.1: Wärmefreisetzungsraten der Simulationsvarianten

Anhang B. Ergänzende Simulationsdaten

B.2 Schienenfahrzeug - Ergänzende Eingabeparameter

Tabelle B.1: Raumlufttechnische Anlage des Doppelstockwagens

Bereich	Numerische Umsetzung		Ausströmgeschwindigkeit	Volumenstrom	Originaldaten [197] Volumenstrom
	Anzahl · Länge · Breite	Öffnungsfläche			
Vorderes Foyer	$2 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m}$	$= 0,6 \text{ m}^2$	$\cdot 0,15 \text{ m/s}$	$= 324 \text{ m}^3/\text{h}$	$200 \text{ m}^3/\text{h}$
Hinteres Foyer	$2 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m}$	$= 0,6 \text{ m}^2$	$\cdot 0,15 \text{ m/s}$	$= 324 \text{ m}^3/\text{h}$	$200 \text{ m}^3/\text{h}$
Unteres Deck	$2 \cdot 12,4 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m}$	$= 4,96 \text{ m}^2$	$\cdot 0,15 \text{ m/s}$	$= 2678,4 \text{ m}^3/\text{h}$	$2800 \text{ m}^3/\text{h}$
Oberes Deck	$2 \cdot 12,4 \text{ m} \cdot 0,2 \text{ m}$	$= 4,96 \text{ m}^2$	$\cdot 0,15 \text{ m/s}$	$= 2678,4 \text{ m}^3/\text{h}$	$2800 \text{ m}^3/\text{h}$
Summe		$= 11,12 \text{ m}^2$	$\cdot 0,15 \text{ m/s}$	$= 6004,8 \text{ m}^3/\text{h}$	$6000 \text{ m}^3/\text{h}$

B.3 Schienenfahrzeug - Pyrolysemethode »0« (inerte Materialien)

B.3.1 Zündinitial im unteren Deck

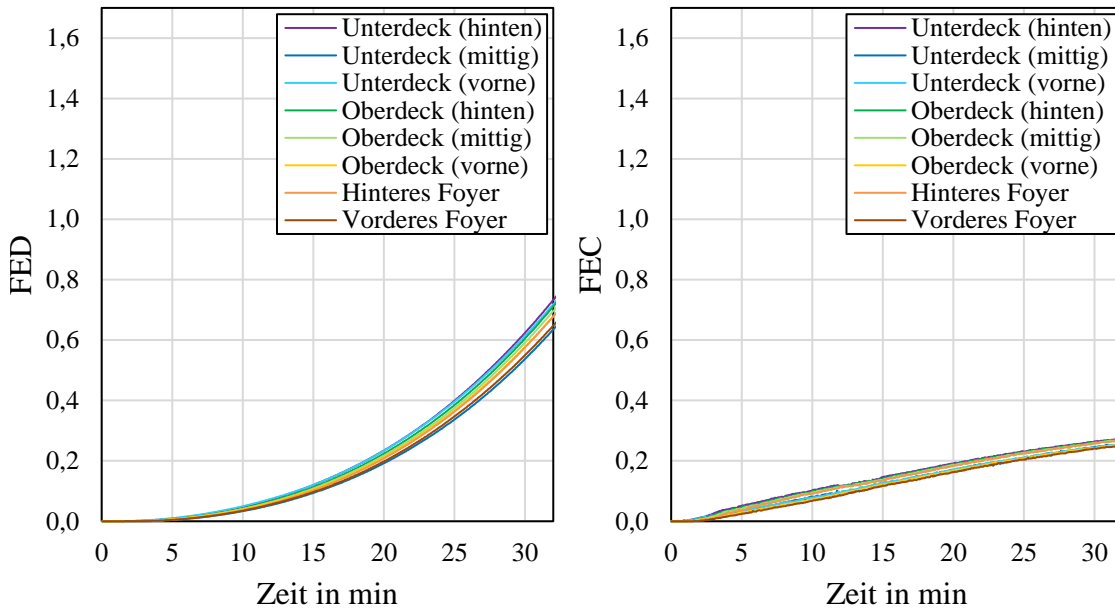


Abbildung B.2: Rauchgastoxizität der Simulation »0LC«

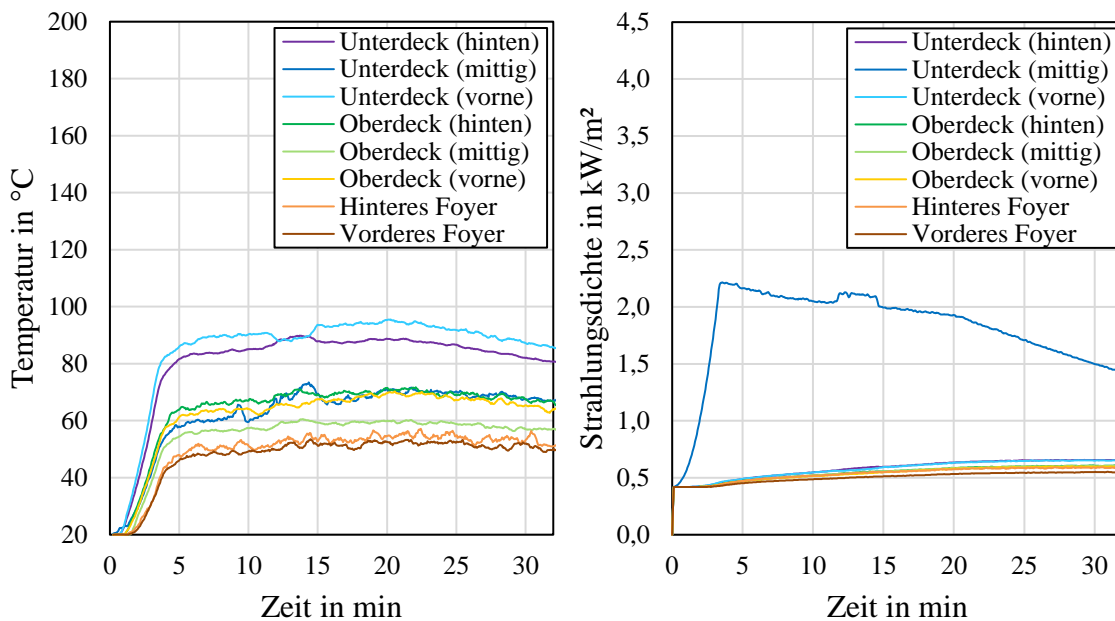


Abbildung B.3: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulation »0LC«

Anhang B. Ergänzende Simulationsdaten

B.3.2 Zündinitial im oberen Deck

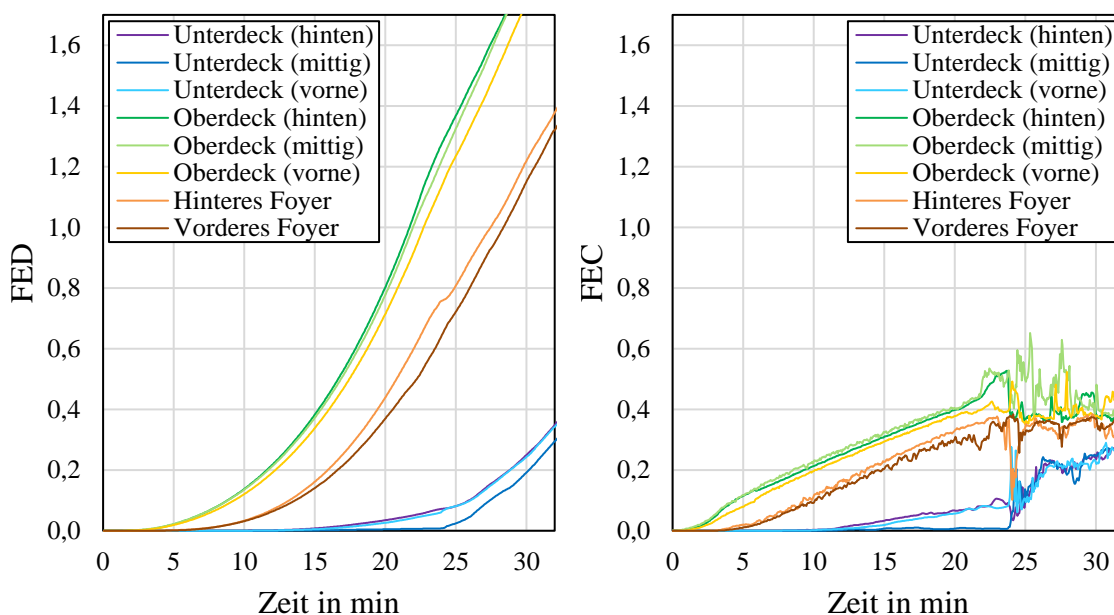


Abbildung B.4: Rauchgastoxizität der Simulation »0UC«

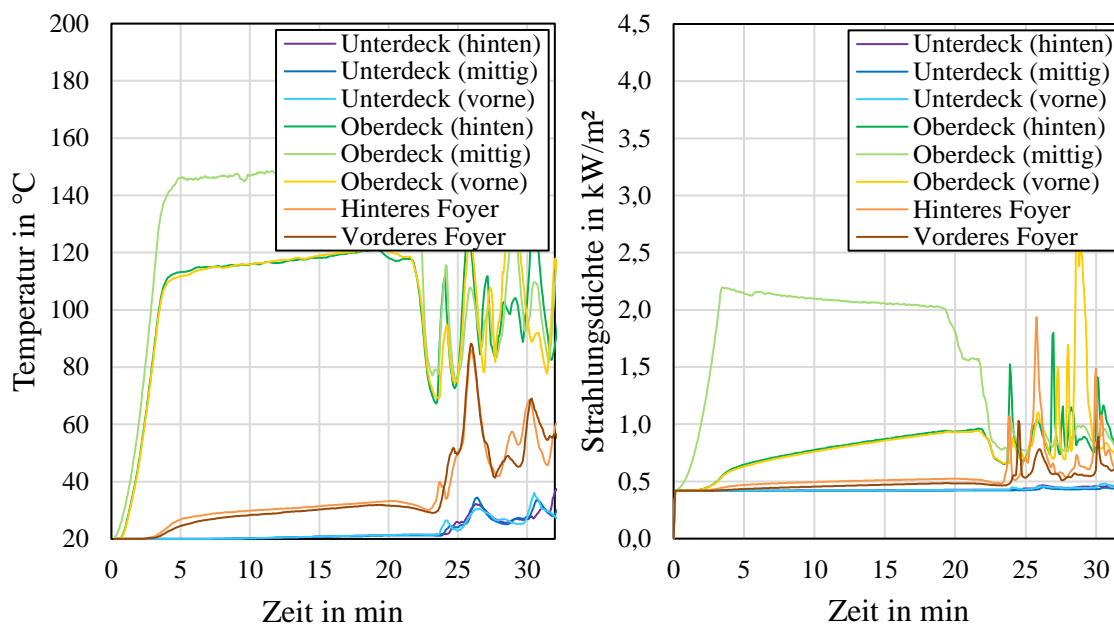


Abbildung B.5: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulation »0UC«

B.3.3 Zündinitial im eingeschossigen Bereich

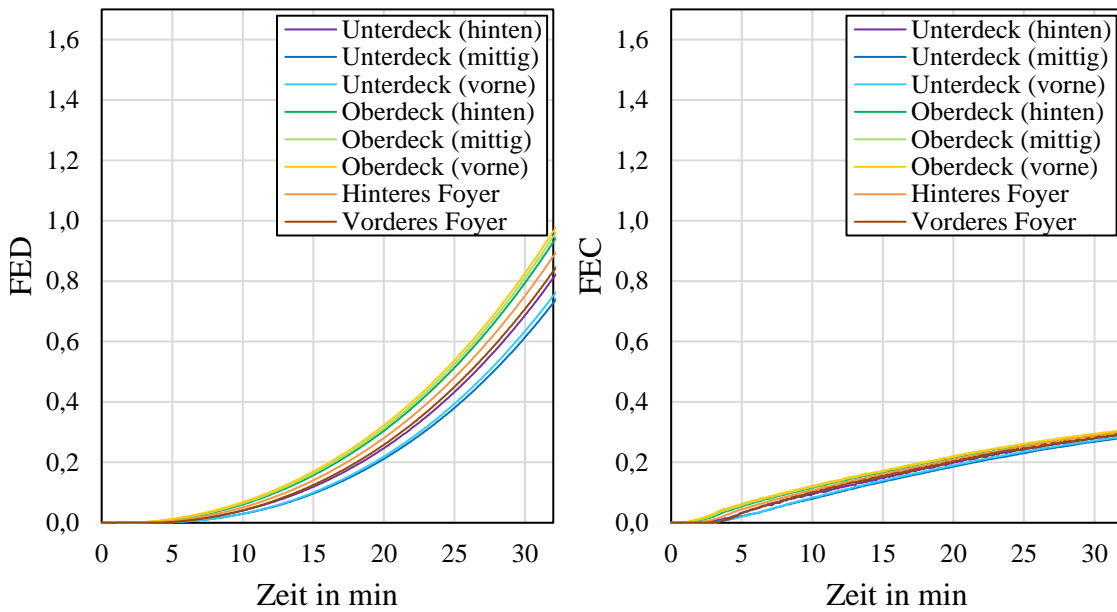


Abbildung B.6: Rauchgastoxizität der Simulation »0FC«

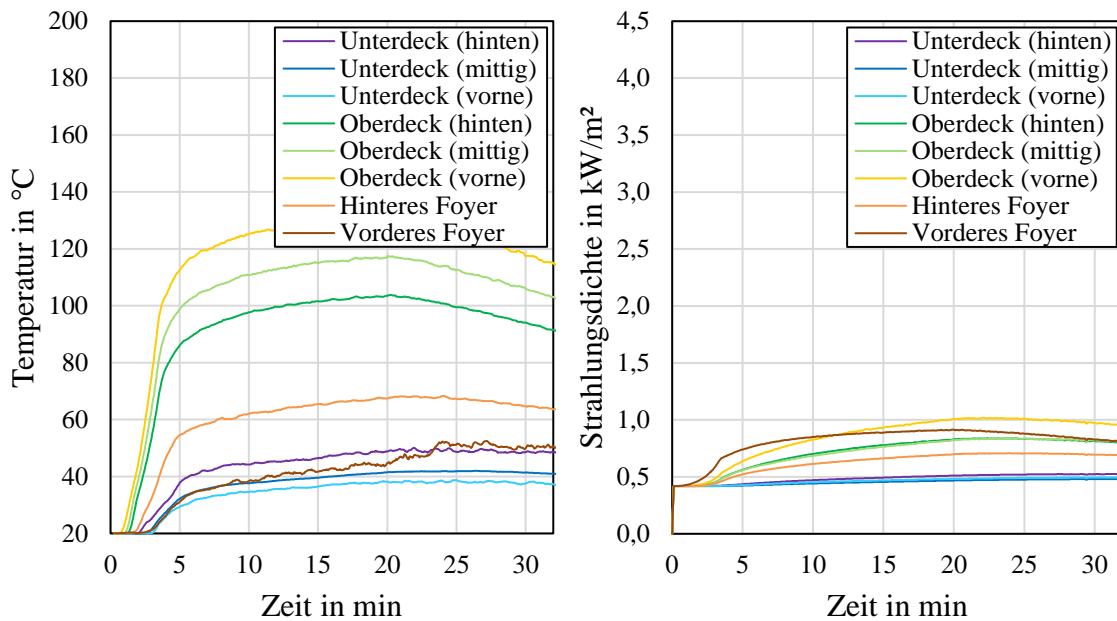


Abbildung B.7: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulation »0FC«

Anhang B. Ergänzende Simulationsdaten

B.4 Schienenfahrzeug – Pyrolysemethode »2«

B.4.1 Zündinitial im unteren Deck

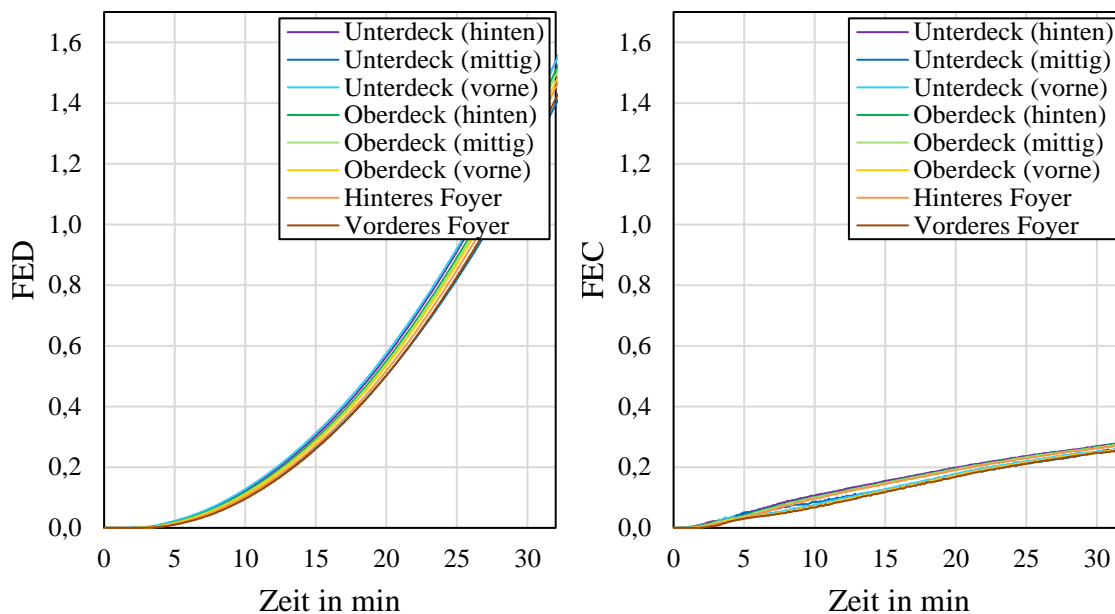


Abbildung B.8: Rauchgastoxizität der Simulation »2LC«

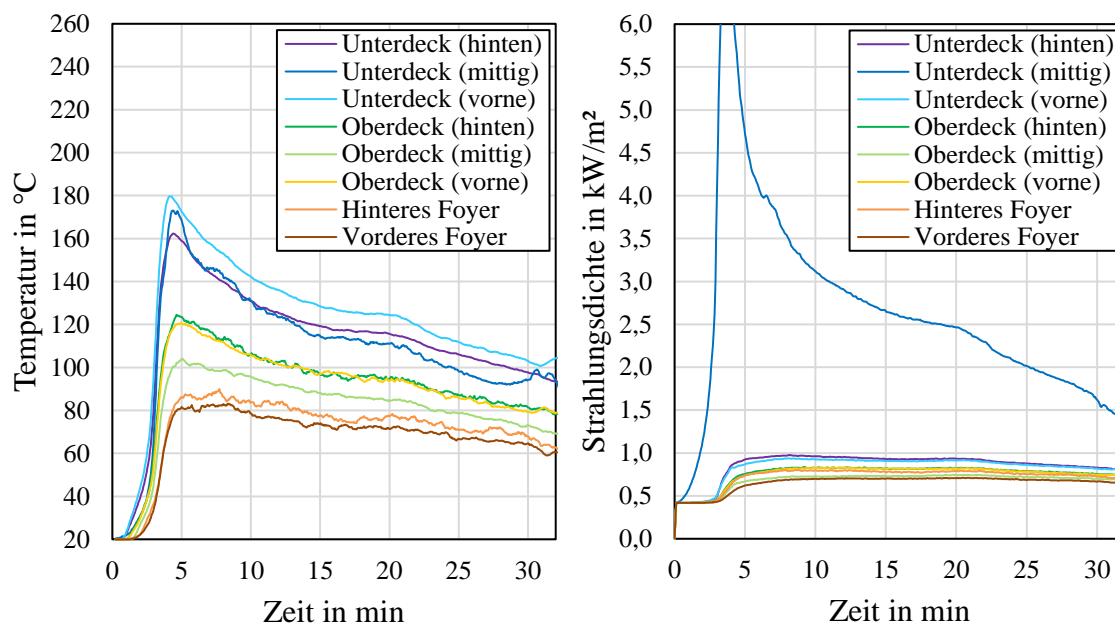


Abbildung B.9: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulation »2LC«

B.4.2 Zündinitial im oberen Deck

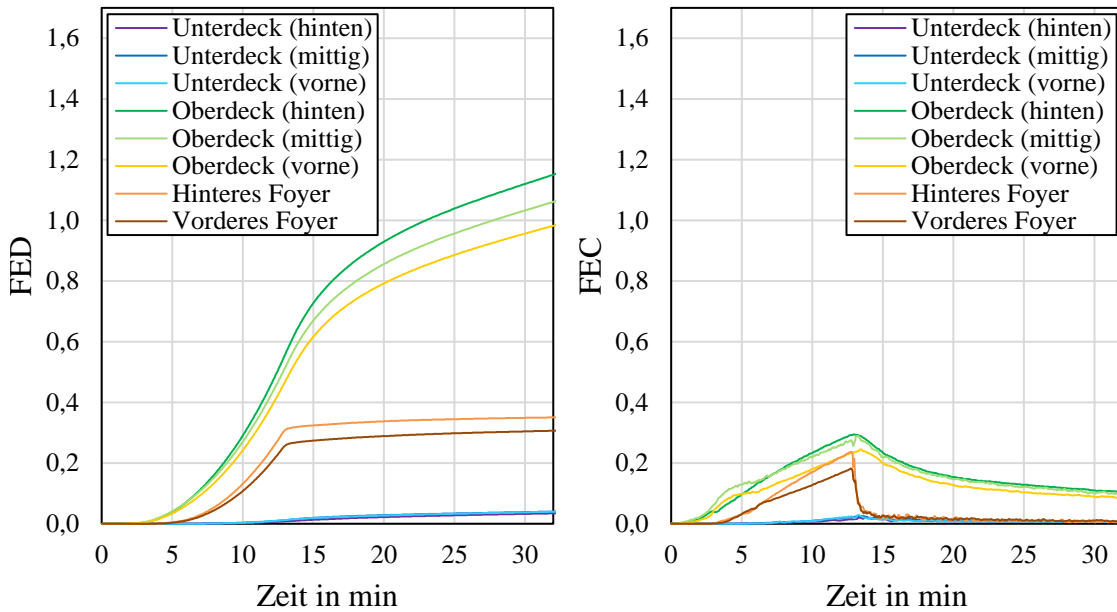


Abbildung B.10: Rauchgastoxizität der Simulation »2UC«

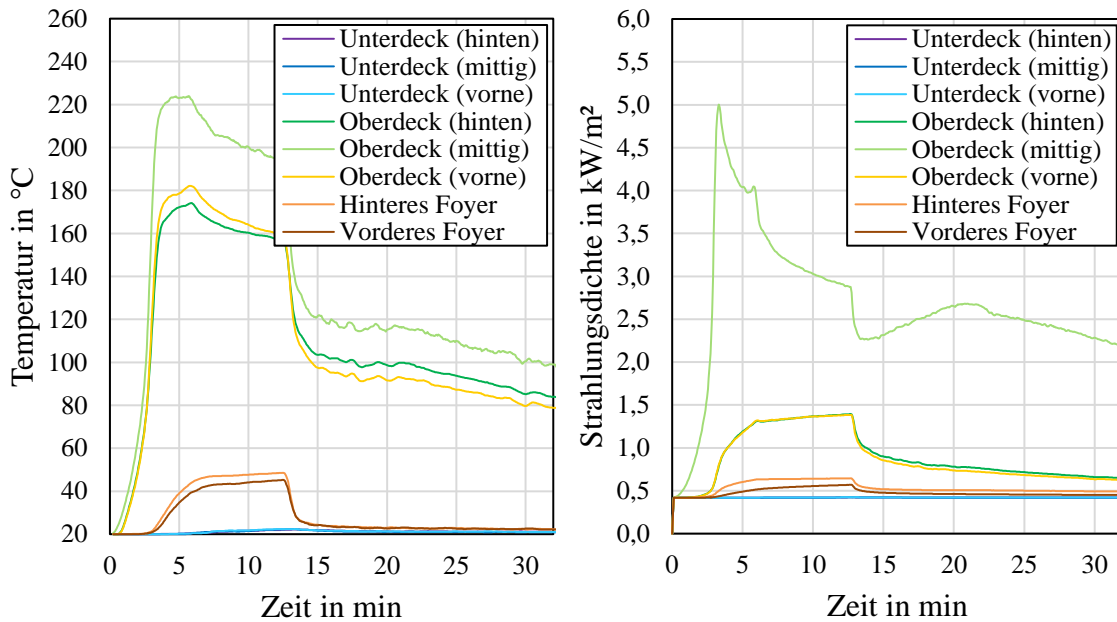


Abbildung B.11: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulation »2UC«

Anhang B. Ergänzende Simulationsdaten

B.4.3 Zündinitial im eingeschossigen Bereich

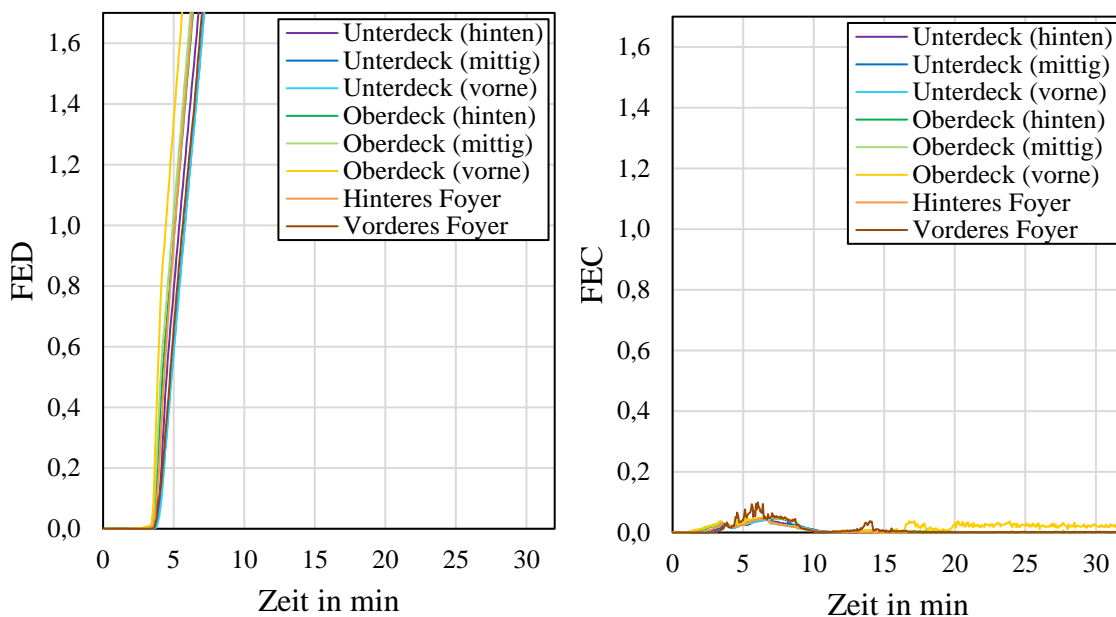


Abbildung B.12: Rauchgastoxizität der Simulation »2FC«

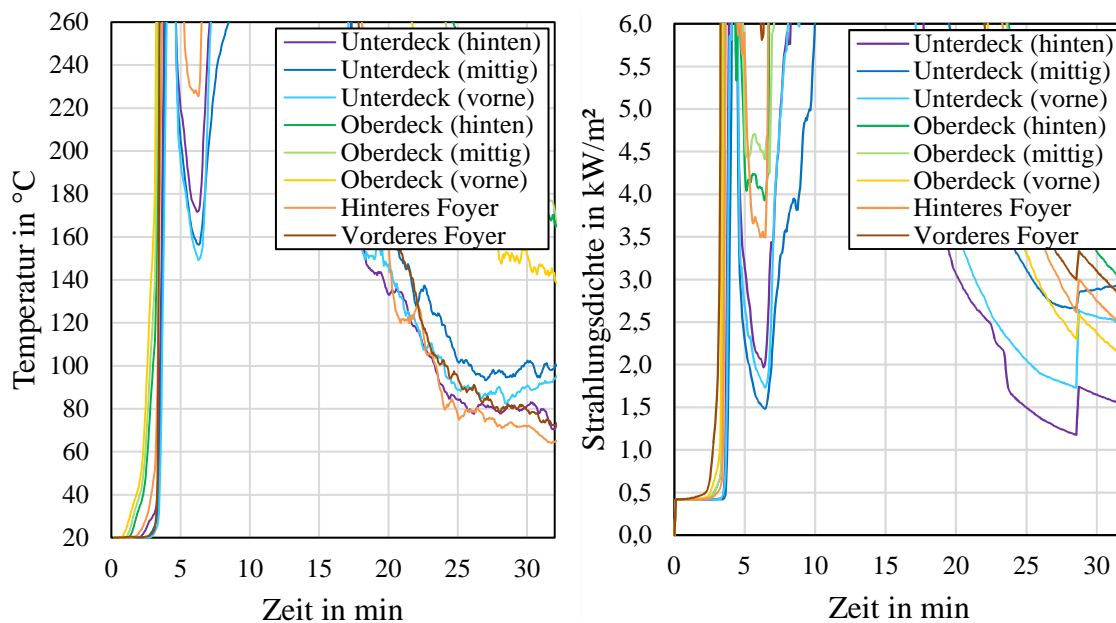


Abbildung B.13: Temperaturen und Strahlungsdichten der Simulation »2FC«

Lebenslauf

– Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten –