

# Ansätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung

Laura Glade



Ingenieure für Brandschutz

# ANSÄTZE ZUR MODELLIERUNG DES GLASBRUCHVERHALTENS BEI BRANDEINWIRKUNG

# **MODELLING APPROACHES OF GLASS BREAKAGE IN FIRES**

# MASTERARBEIT

In Kooperation mit

hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH

Bearbeiterin:

Laura Glade, B. Sc.

Matrikelnummer:

Betreuerin:

Externer Betreuer:

Prüfer:

Zweitprüfer:

Lisa Sander, M. Sc. Andreas Kanitz, M. Sc. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß Dr.-Ing. Olaf Riese

Ort, Datum der Einreichung:

Braunschweig, den 25. Juli 2019

# EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Masterarbeit

### Ansätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung

### Modelling approaches of glass breakage in fires

Autorin:

Laura Glade

Matrikelnummer:

Durch meine Unterschrift versichere ich an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit oder Auszüge daraus haben noch nicht in gleicher oder ähnlicher Form dieser oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Braunschweig, den 24. Juli 2019

Unterschrift

### KURZFASSUNG

Die vorliegende Masterarbeit gibt einen Überblick über Modellierungsansätze des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung. Dabei wurde zunächst der Baustoff Glas näher betrachtet. Anschließend wurden vorhandene Realbrandversuche, die sich mit der Thematik des Glasbruches bei thermischer Beanspruchung auseinandersetzten, vorgestellt und untersucht. Auf Basis eines ausgewählten Realbrandversuches wurden Modellierungsansätze in Fire Dynamics Simulator (FDS) für Einscheiben-Sicherheitsgläser entwickelt und angewendet. Die intensive Auseinandersetzung mit der vorliegenden Thematik hatte das Ziel, aussagekräftige Erkenntnisse auf dem noch unerforschten Gebiet der Glasbruchsimulation zu gewinnen. Die vorliegende Masterarbeit ist sowohl für Personen des Brandschutzwesens als auch für BenutzerInnen des Computational Fluid Dynamics (CFD) Modells FDS bedeutsam.

### ABSTRACT

This master thesis offers an overview of modelling approaches of glass breakage in fires. The first part takes a close look at building material glass. Next, this thesis investigates existing real fire tests dealing with the topic of glass breakage under thermal stress. Based on a selected real fire trial, modelling approaches for toughened safety glasses were developed by the author and applied in the Fire Dynamics Simulator (FDS). The goal of this intensive examination was to gain meaningful insights in the as-yet unexplored field of glass break simulation. The results of this thesis study are important for persons involved in fire safety as well as users of the Computational Fluid Dynamics (CFD) model FDS.



Technische Universität Braunschweig | iBMB | FG Brandschutz Beethovenstraße 52 | 38106 Braunschweig | Deutschland

Aufgabenstellung für die

### Masterarbeit

von Laura Glade (Matr.-Nr.

zum Thema

### Ansätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung

### Modelling approaches of glass breakage in fires

Die Ventilationsbedingungen im Brandraum sind ein wesentlicher Einflussfaktor für den sich entwickelnden Brandverlauf. Neben planmäßig angesetzten Nachströmöffnungen können auch Öffnungen in den Brandraum entstehen, wenn geschlossene Verglasungen durch Brandeinwirkung versagen, so dass die Ventilation sich verändert. Hierbei verursachen die zusätzliche Sauerstoffzufuhr und die veränderten Strömungsverhältnisse eine auch veränderte Branddynamik. Für eine möglichst realitätsnahe Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung stehen verschiedene vereinfachte Ansätze zur Verfügung, die auf theoretischen Untersuchungen basieren oder aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden [1].

Im Rahmen der Masterarbeit soll das Glasbruchverhalten bei Brandeinwirkung durch eine Literaturrecherche zusammengestellt und der Einfluss eines Glasbruches auf die Branddynamik thematisiert werden. Weitergehend sind Daten von Brandversuchen zu recherchieren, in denen das Glasbruchverhalten unter Brandeinwirkung experimentell untersucht wurde. Im Vordergrund der Recherche sollen hierbei die Festlegung von Versagenskriterien und der Einflussparameter (Glasart, -dicke, Scheibenabmessung, Beanspruchungstemperaturzeitkurve, etc.) stehen. Ferner sollen verschiedene Ansätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens untersucht und weiterentwickelt werden, die sich für eine Anwendung bei CFD-Modellen eignen. Auf deren Grundlage sind Brandsimulationen mit dem CFD-Modell Fire Dynamics Simulator (FDS) unter Berücksichtigung der getroffenen Modellierungsansätze für einen Glasbruch durchzuführen. Anhand der Ergebnisse können im Vergleich zu den Realbrandversuchen Einschätzungen der Anwendbarkeit der gewählten Modellierungsansätze erfolgen und Empfehlungen für die Praxis gegeben werden.



Technische Universität Braunschweig Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Fachgebiet Brandschutz

Beethovenstraße 52 38106 Braunschweig

Univ. Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß



Ansprechpartner: L. Sander, M. Sc.

Datum: 11. März 2019

Unser Zeichen: LSA\_8



### Im Rahmen der Masterarbeit sollen folgende Aufgabenschwerpunkte bearbeitet werden:

- 1. Recherche von Realbrandversuchen zur Ermittlung des Glasbruches unter Brandeinwirkung in einer Literaturstudie.
- 2. Festlegung von Versagenskriterien und Einflussparameters zum Glasbruch bei Brandeinwirkungen anhand der Literaturstudie und Untersuchung der Auswirkungen des Versagens von Verglasungen auf die Branddynamik.
- 3. Untersuchung und Weiterentwicklung von verschiedenen Ansätzen zur Modellierung von Glasbruch zur Anwendung im CFD-Modell FDS.
- 4. Durchführung von Brandsimulationen mit FDS unter Berücksichtigung der verschiedenen Modellierungsansätze des Glasbruchverhaltens sowie eine vergleichende Betrachtung der Simulationsergebnisse mit experimentellen Daten von ausgewählten Realbrandversuchen in enger Abstimmung mit den Betreuern.
- 5. Darstellung und Bewertung der Ergebnisse. Erworbene Erkenntnisse sind kritisch zu hinterfragen ebenso wie die Stärken und Schwächen der gewählten Ansätze und des verwendeten CFD- Programms.

### Sonstiges

Alle Ergebnisse sind nachvollziehbar zu dokumentieren. Während der Bearbeitung ist Kontakt mit den Betreuern zu halten, um z.B. den Bearbeitungsumfang abzusprechen. Die Arbeitsergebnisse sind in schriftlicher und digitaler Form einzureichen. Der Text der Arbeit und sämtliche digitalen Arbeitsmittel (z. B. verwendete Gesetzestexte, digitale (open access) Literatur, Zeichnungen, Berechnungen etc.) sind auf einem Datenträger beizufügen.

Sämtliche vom Fachgebiet Brandschutz bereitgestellten Unterlagen, die zur Bearbeitung dieser Arbeit ausgegeben werden, dürfen nur mit Zustimmung des Fachgebietes Brandschutz vervielfältigt, veröffentlicht oder weitergegeben werden. Dies gilt auch für Auszüge hieraus. Ferner muss vor der Kontaktaufnahme mit Dritten eine Rücksprache mit den Betreuern erfolgen.

### Literatur

- [1] Babrauskas, V.: Glass breakage in fires, Fire Science and Technology Inc., 2016.
- [2] Hietaniemi, V.: Probabilistic simulation of glass fracture and fallout in fire, VTT Technical Research Centre of Finland, 2005.
- [3] Kunkelmann, J.: Feuerwehreinsatztechnische Problemstellung bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise. Forschungsbericht Nr. 164, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik, 2013.

Technische Universität Braunschweig Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Fachgebiet Brandschutz



Betreuerin:

Lisa Sander, M. Sc.

Externer Betreuer:

Andreas Kanitz, M. Sc.

Als Zweitprüfer benenne ich Dr.-Ing. O. Riese.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß

ausgegeben am:

abzugeben am:

verlängert bis:

abgegeben am:

Seite 3 von 3

# II INHALTSVERZEICHNIS

I	Auf	fgabenstellung	IV
11	Inha	naltsverzeichnis	VII
II	l Syn	mbole	x
	111.1	Griechische Symbole	X
	.	Lateinische Symbole	x
١١	/ Beg	griffe und Abkürzungen	XI
	IV.I	Begriffe	XI
	IV.II	Abkürzungen	XI
v	Abb	bildungsverzeichnis	xıı
v	I Tab	bellenverzeichnis	xv
1	Einl	leitung	1
2	Bet	trachtung ausgewählter Glasarten	3
	2.1	Allgemeines	
	2.1	1.1 Herstellung und Glasstruktur (Floatglas)	3
	2.1	L.2 Basis- und Funktionsgläser	6
	2.2	Auswirkungen des Versagens von Verglasungen auf die Branddynan	nik 9
3	Ver	rsagenskriterien und Einflussparameter	10
	3.1	Allgemeines zum Versagensmechanismus	
	3.2	Rissbild und Bruchverhalten ausgewählter Verglasungen	
	3.3	Stand der Forschung	16
	3.3	8.1 Modellbildung von Hietaniemi	16
	3.3	8.2 Realbrandversuche von Xie et al	
	3.3	8.3 Realbrandversuche von Kunkelmann	

	3.3.4	4 Babrauskas	23
	3.3.5	5 Realbrandversuche von Harada et al.	24
	3.3.6	6 Versuche von Chen et al	24
	3.4	Zusammenfassung	26
4	Ansä	ätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens	32
	4.1	Allgemeines	32
	4.2	Modellierungsansätze von Glasbruch	32
5	Bran	ndsimulationen mit dem CFD-Modell FDS	38
	5.1	Allgemeines über ,Fire Dynamics Simulator' (FDS)	38
	5.2	Zielsetzung	38
	5.3	Referenzbrand	39
	5.4	Testraum	40
	5.4.1	1 Raumgeometrie und Materialeigenschaften	40
	5.4.2	2 Zellgitter	44
	5.4.3	3 Wärmefreisetzungsrate	46
	5.4.4	4 Auswerteebenen	51
	5.4.5	5 Simulationsdurchläufe	54
6	Simu	ulationsergebnisse	56
	6.1	Übersicht	56
	6.2	Auswertung	57
7	Opti	imierung des Simulationsansatzes	61
	7.1	Herausforderungen	61
	7.2	Änderungen	62
	7.2.2	1 Anzahl und Art der Messelemente	62
	7.2.2	2 Aufbau der Fenster	64
	7.2.3	3 Anzahl der Simulationen	71
8	Simu	ulationsergebnisse des optimierten Ansatzes	72
	8.1	Übersicht	72

:	8.2	Auswertung	3
:	8.3	Stärken und Schwächen des finalen Simulationsansatzes	3
9	Fazit	t und Ausblick9	1
VII	Liter	raturverzeichnis I)	<
VII	I Anh	angX\	/
,	VIII.I	Bestimmung der EingangsparameterXV	/
,	VIII.II	Ergebnisse der Brandsimulationen 1XV	I
,	VIII.III	Ergebnisse der Brandsimulationen 2 (Testsimulation)XXV	/
,	VIII.IV	Ergebnisse der Brandsimulationen 3 (optimiert)XXVII	I
,	VIII.V	FDS QuellcodeXXXIV	/

# III SYMBOLE

### III.I GRIECHISCHE SYMBOLE

$\alpha_T$	[K <sup>-1</sup> ]	Temperaturausdehnungskoeffizient
$\Delta H_c$	[kJ/kg]	Vollständige Verbrennungswärme
$\Delta H_{c,eff}$	[kJ/kg]	Effektive Verbrennungswärme
kβ	[m <sup>-1</sup> ]	Materialkonstante für flüssige Brennstoffe
λ	[W/(m·K)]	Wärmeleitfähigkeit
$\Delta T$	[K]	Temperaturdifferenz
$\Delta T_{crit}$	[K]	Kritische Temperaturdifferenz
χ	[-]	Verbrennungseffektivität

### III.II LATEINISCHE SYMBOLE

Α	[m²]	Querschnittsfläche
$A_f$	[m²]	Fläche der Brandquelle
D	[m]	Durchmesser der Brandquelle
ṁ″	[kg/(m²·s]	Verlustrate der freien Kraftstoffverbrennungsrate
$\dot{m}_{\infty}^{\prime\prime}$	[kg/(m²·s]	Maximale Verlustrate der freien Kraftstoffverbrennungsrate
Ż	[kW]	Wärmefreisetzungsrate
Т	[°C]	Temperatur
t	[s]	Zeit
$U_g$	[W/(m²⋅K]	Wärmedurchgangskoeffizient
$U_w$	[W/(m²⋅K]	Wärmedurchgangswert

# IV BEGRIFFE UND ABKÜRZUNGEN

### IV.I BEGRIFFE

Adiabatic Surface	[-]	Ideale Oberflächentemperatur, die unter Berücksichtigung der
Temperature		radiativen und konvektiven Anteile des Nettowärmestroms ver-
		einfacht die thermische Einwirkung auf die Bauteile beschreibt
Pool Brand	[-]	Ein turbulentes Diffusionsfeuer, bei dem verdunstendes Mate-
		rial aus einer Flüssigkeitsschicht am Boden des Feuers ver-
		brannt wird
Ventilation	[kg/s]	Masse der in einem Brandabschnitt oder Brandbekämpfungs-
		abschnitt pro Zeiteinheit zu- oder abströmender Rauchgase und
		Luftmengen

### IV.II ABKÜRZUNGEN

AST	Adiabatic Surface Temperature
CFD	Computational Fluid Dynamics
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
FDS	Fire Dynamics Simulator
FOK	Fußboden Oberkante
HRR(PUA)	Heat Release Rate Wärmefreisetzungsrate) (pro Flächeneinheit)
ISO	International Organization for Standardisation
NIST	National Institute of Standards and Technology
PVB	Polyvinylbutyral
PVC	Polyvinylchlorid
OKFF	Oberkante Fertigfußboden
VSG	Verbundsicherheitsglas

# V ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Herstellungsprozess von Floatglas 4
Abbildung 2-2: Dreidimensionale Darstellung des SiO <sub>4</sub> -Tetraeders
Abbildung 2-3: ESG7
Abbildung 2-4: VSG7
Abbildung 2-5: Isolierglas7
Abbildung 3-1: Unterschiedliche Temperaturextreme innerhalb von Glasscheiben
Abbildung 3-2: Belastungen einer in der Ebene ringsum gehaltenen Scheibe durch
Temperatureinwirkung
Abbildung 3-3: Kantenbrüche durch thermische Erwärmung von Floatglas
Abbildung 3-4: Bruchbilder von Einscheiben-Sicherheitsglas14
Abbildung 3-5: Bruchbild von Verbundsicherheitsglas infolge mechanischer Einwirkung 14
Abbildung 3-6: Glasbruch einer 3-fach Isolierverglasung infolge Temperatur- und
Luftdruckänderung15
Abbildung 3-7: Temperaturkurven der Heißgasschicht von a) 4 mm und b) 6 mm dickem Glas 17
Abbildung 3-8: Rissmuster der untersuchten Glasscheiben (Leichtbauweise)
Abbildung 3-9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von Xie et al. nach der ISO 9705
Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von Kunkelmann
Abbildung 3-11: Brandverhalten einer 2-fach Verglasung (äußere Scheibe aus VSG) in einem
PVC-Rahmen
Abbildung 3-12: Versuchsaufbau von Chen et al
Abbildung 3-13: Prozess der Rissausbildung
Abbildung 3-14: Bodentiefe Fenster inklusive Tür in Fassade
Abbildung 3-15: Rechteckige Fenster
Abbildung 3-16: Verglaste Fassade, Frankfurt
Abbildung 3-17: Ausbildung der Heiß- und Kaltgaszone in einem Brandraum mit
Vertikalverglasungen
Abbildung 5-1: In FDS erstellter Testraum in Anlehnung an die ISO 9705
Abbildung 5-2: Frontansicht des Testraumes inkl. Nummerierung der Glasscheiben
Abbildung 5-3: Fensteraufbau, Schnitt durch Fenster 1 (grün: Schnittfläche)
Abbildung 5-4: Frontansicht mit Darstellung der Vermaßung [mm]
Abbildung 5-5: Versuchsaufbau Thomas et al. (2007) – Brand mittig (links), Brand außerhalb
(rechts)

Abbildung 5-6: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der HRR für Dieselöl im Testraum nach
ISO 9705
Abbildung 5-7: Berechnung des Faktors für außen- und innenbefindliche Brände
Abbildung 5-8: Verlauf der Wärmefreisetzungsraten von Ethanol und Dieselöl
Abbildung 5-9: Anordnung der Temperatur-Messelemente für die Verglasung
Abbildung 5-10: Darstellung der AST und Slice-Files im Testraum
Abbildung 6-1: ΔT der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell 57
Abbildung 6-2: ΔT der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 540 x 540 mm, numerisch
(Simulation 1)
Abbildung 6-3: ΔT der Glasscheibe 2 (6 mm), Pool Brand 540 x 540 mm, numerisch
(Simulation 1)
Abbildung 6-4: ΔT der Glasscheibe 3 (6 mm), Pool Brand 540 x 540 mm, numerisch
(Simulation 1)
Abbildung 7-1: Definition der Temperaturdifferenzen nach Xie et al
Abbildung 7-2: Modifizierter ISO-Raum zum Testen unterschiedlicher Fensteraufbauten (links:
Frontansicht; rechts: rechte Seitenansicht) 65
Abbildung 7-3: Fensteraufbau Variante 1, Schnitt (grün: Schnittfläche)
Abbildung 7-4: Anordnung der Messelemente der Variante 1 in FDS
Abbildung 7-5: Fensteraufbau Variante 2, Schnitt (grün: Schnittfläche)
Abbildung 7-6: Anordnung der Messelemente der Variante 2 in FDS
Abbildung 7-7: Fensteraufbau Variante 3, Schnitt (grün: Schnittfläche)
Abbildung 7-8: Anordnung der Messelemente der Variante 3 in FDS
Abbildung 8-1: ΔT der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-2: ΔT der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell
Abbildung 8-3: ΔT der Glasscheibe 2 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-4: ΔT der Glasscheibe 2 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell
Abbildung 8-5: Simulation 3-1: ,WALL TEMPERATURE' in der 91. Sekunde (Auszug: Smokeview)
Abbildung 8-6: Simulation 3-1: ,WALL TEMPERATURE' in der 221. Sekunde
(Auszug: Smokeview)
Abbildung 8-7: Simulation 3-1: ,WALL TEMPERATURE' in der 224. Sekunde mit
herausgefallener Glasscheibe 1 (Auszug: Smokeview)78

Abbildung 8-8: ΔT der Glasscheibe 3 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-9: ΔT der Glasscheibe 3 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell
Abbildung 8-10: Oberflächentemperatur T = 200,4 °C (schwarz) zu unterschiedlichen Zeiten
(Auszug Smokeview)
Abbildung 8-11: Simulation 3-1: Rauchentwicklung in der 36. Sekunde (Auszug: Smokeview). 81
Abbildung 8-12: $\Delta T$ der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-13: ΔT der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell 83
Abbildung 8-14: $\Delta T$ der Glasscheibe 1 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-15: ΔT der Glasscheibe 1 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, experimentell 84
Abbildung 8-16: $\Delta T$ der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-17: ΔT der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, experimentell 86
Abbildung 8-18: $\Delta$ T der Glasscheibe 3 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, numerisch
(Simulation 3)
Abbildung 8-19: ΔT der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, experimentell 88

# **VI TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 2-1: Charakteristische (Mindest-)Biegezugfestigkeit von Floatglas, ESG, VSG und
Isolierglas 8
Tabelle 3-1: Übersicht der einzelnen Versagenskriterien und Einflussparameter
Tabelle 4-1: Modellierungsansätze für die Versagensmechanismen der Glasscheibe
Tabelle 5-1: Bewertung der Versuche aus Kapitel 3.3 hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den
FDS-Ergebnissen
Tabelle 5-2: Eingangsparameter f
Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der beiden Testdurchläufe unterschiedlicher Zellgröße 45
Tabelle 5-4: Wärmefreisetzungsraten von Dieselöl in Abhängigkeit der Fläche der Brandquelle
mit Angebe der Wannenhöhe 50
Tabelle 5-5: Nummerierung der Simulationen55
Tabelle 6-1: Berücksichtigung der Versagenskriterien und Einflussparameter (Simulation 1) 56
Tabelle 7-1: Nummerierung der optimierten Simulationen
Tabelle 8-1: Berücksichtigung der Versagenskriterien und Einflussparameter (Simulation 3) 72
Tabelle 8-2: Stärken und Schwächen des gewählten Ansatzes der Brandsimulation

### 1 EINLEITUNG

Findet ein Raumbrand statt, wird der Brandverlauf von verschiedenen Parametern bestimmt. Als elementarer Einflussfaktor sind die Ventilationsbedingungen aufzuführen, die unter anderem durch Öffnungen in der Gebäudestruktur hervorgerufen werden. Dabei ist zwischen regulär vorgesehenen Öffnungen und Öffnungen, die durch ein plötzliches Versagen verschlossener Verglasungen entstehen, zu unterscheiden. Letzteres führt wiederum zu einer ungewollten und nicht einzuschätzenden Veränderung der Ventilation und damit zu einer zusätzlichen Zufuhr von Sauerstoff. Die Konsequenz ist eine Änderung der Branddynamik. Bis heute wurden lediglich vereinfachte Ansätze zum Glasbruchverhalten veröffentlicht, die auf experimentellen und theoretischen Untersuchungen basieren. Aus diesem Grund kommt die Frage nach einer realitätsnahen Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung auf. Diese Fragestellung wird in der vorliegenden Arbeit mithilfe unterschiedlicher Ansätze auf Grundlage vorhandener Realbrandversuche untersucht. Gegliedert ist die Arbeit in einen theoretischen und einen praktischen Teil.

Im theoretischen Teil findet eine Literaturrecherche statt, mittels derer der Baustoff Glas mit seinen Materialeigenschaften kurz vorgestellt wird und bereits vorhandene Realbrandversuche zur Ermittlung des Glasbruches unter Brandeinwirkung zusammengestellt werden. Im Einzelnen werden hierfür sowohl der Einfluss eines Glasbruches auf die Branddynamik als auch die Versagenskriterien und Einflussparameter untersucht. Danach folgt die Beschreibung unterschiedlicher Ansätze zur Modellierung von Glasbruch, bevor das CFD-Modell FDS kurz vorgestellt wird.

Im praktischen Teil der Arbeit wird die zuvor beschriebene Theorie in Brandsimulationen mit FDS angewendet. Hierfür wird ein eigens erstellter Testraum modelliert. Dieser dient einer vergleichenden Betrachtung der erzielten Simulationsergebnisse mit den aus der Literaturrecherche vorgestellten Realbrandversuchen. Die Gegenüberstellung findet im Anschluss an die Brandsimulationen statt und wird mithilfe verschiedenster Diagramme individuell ausgewertet.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Ansätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung vorzustellen und dessen Aussagekraft kritisch zu hinterfragen. Die einzelnen Schwächen und Stärken der gewählten Ansätze sowie des verwendeten CFD-Modells FDS sollen dabei beleuchtet werden. Sollte sich herausstellen, dass ein oder mehrere der gewählten Modellierungsansätze zum gewünschten Ergebnis führen, bestünden reelle Chancen, dass die Ansätze in weiterführenden Untersuchungen ausgearbeitet und in der Praxis Anwendung finden könnten. Die Auswirkungen auf das Brandschutzwesen wären enorm, da das Glasbruchverhalten bei Brandeinwirkung deutlich realitätsnaher abgebildet und prognostiziert werden könnte.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Literatur bisher keine Unterteilung und Gegenüberstellung der verschiedenen Verglasungsarten bei der Untersuchung des Glasbruchverhaltens unternommen hat. Da das Versagen je nach Typ der Verglasung jedoch differiert, wird in Abstimmung mit den Betreuern von der ursprünglichen Aufgabenstellung geringfügig abgewichen. Die Brandsimulationen beschränken sich auf ausgewählte Verglasungen, dessen Versagenskriterien, Eingangsparameter und Ergebnisse ausschließlich auf diese Art von Verglasung optimiert sind.

Inwiefern die Ansätze zur Modellierung von Glasbruch Anwendung finden und welche Rückschlüsse aus den gewonnenen Erkenntnissen getroffen werden können, wird in einem abschließenden Fazit und Ausblick erläutert.

# 2 BETRACHTUNG AUSGEWÄHLTER GLASARTEN

### 2.1 ALLGEMEINES

In dieser Arbeit sollen Ansätze zum Glasbruchverhalten bei Brandeinwirkung modelliert werden. Um den Hintergrund des Glasbruchverhaltens besser verstehen zu können, dient dieses Kapitel als Übersicht über allgemeine Informationen zu dem Werkstoff Glas. Dafür werden zunächst die Glasherstellung sowie die Struktur und die einhergehende chemische Zusammensetzung kurz erläutert. Danach werden ausgewählte Veredelungsprozesse von Gläsern im Bauwesen beschrieben. Abschließend wird der Einfluss des Herausfallens auf die Branddynamik dargelegt.

Um Missverständnisse von Beginn an zu vermeiden, wird angemerkt, dass zwischen den Begriffen ,Fenster' und ,Verglasung' unterschieden wird. Als Verglasung (auch Glasscheibe) versteht sich in dieser Arbeit die tatsächlich eingebaute Glasscheibe. Als Fenster ist die Glasscheibe inklusive Rahmen zu verstehen, also die gesamte Konstruktion.

### 2.1.1 HERSTELLUNG UND GLASSTRUKTUR (FLOATGLAS)

Der Begriff Glas wird im täglichen Sprachgebrauch als Oberbegriff gebraucht. Gemäß DIN 1259-1 wird er als "anorganisches Schmelzprodukt, das im Wesentlichen ohne Kristallisation erstarrt" [1] verstanden. Kalk-Natron-Silikatglas ist das am häufigsten verwendete Glas im Bauwesen. Es setzt sich aus drei Hauptbestandteilen, den Rohstoffen [2] [3]:

- 1. Siliziumdioxid (SiO<sub>2</sub>),
- 2. Natriumcarbonat (Soda) (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) und
- 3. Kalk (CaCO<sub>3</sub>)

und zu einem geringen Anteil aus anderen Zuschlagsstoffen (*MgO*, *Al*<sub>2</sub>*O*<sub>3</sub>) zusammen. Für die Herstellung von Fensterglas (Flachglas) ist ein aufwändiges Verfahren, das sogenannte ,Floatverfahren' notwendig (siehe Abbildung 2-1). Im Gemengelager werden die Bestandteile zunächst in Mischern vermengt. Bei der industriellen Herstellung von Bauglas werden dem Gemisch Glasscherben aus der Floatglas-Produktion beigemischt. Im Anschluss wird das vollständige Gemisch mithilfe von Einlegemaschinen in die Schmelzwanne geschoben. [2] [3] [4]



Abbildung 2-1: Herstellungsprozess von Floatglas [2]

Der Schmelzpunkt von Siliziumdioxid liegt ursprünglich bei etwa 1860 °C. Durch die Zugabe von Soda und Kalk wird dieser beträchtlich reduziert. So beginnt das Schmelzen dieser drei Rohstoffe in Kombination bei Temperaturen von 800 bis 900 °C. Anders als bei Kristallen erfolgt das Schmelzen bei Glas kontinuierlich und nicht spontan. Dieser Bereich wird als Transformationsbereich bezeichnet. In der Schmelzwanne wird das Gemisch auf bis zu 1500 °C erhitzt und dabei ständig in Bewegung gehalten, um Temperaturdifferenzen in der Wanne zu vermeiden. Ist die gewünschte Viskosität erreicht, wird die zähflüssige Glasschmelze langsam auf 1100 °C heruntergekühlt. Je mehr das Material abkühlt, desto viskoser wird es. Es wird nach der Schmelze gleichmäßig über ein flüssiges Zinnbad ausgebreitet, auch als 'floaten' bezeichnet. Das Zinnbad bewirkt aufgrund seiner höheren Dichte gegenüber Glas, das bei Kontakt keine Vermischung stattfindet, sondern eine glatte Trennschicht die Folge ist. Eine gleichmäßige Abkühlung der Glasschmelze auf ca. 600 °C erfolgt dann bis zum Ende des Floatbades. Nach Abnahme des Floatglases vom Zinnbad wird dieses in einen Rollenkühlofen geführt, wo es spannungsfrei und kontrolliert auf 100 °C erneut abgekühlt wird (Kühlbereich). Danach wird es auf offenen Rollen schließlich auf Zimmertemperatur gekühlt. Das Endprodukt Floatglas (Festkörper) ist damit fertiggestellt und kann für die weitere Verarbeitung entsprechend zugeschnitten werden. [2] [3] [4]

Die Besonderheit von Glas besteht darin, dass es auf mikroskopischer Ebene keine kristalline Struktur besitzt, wie es bei vielen Festkörpern der Fall ist. Seine Moleküle weisen bei Raumtemperatur eine inhomogene und anisotrope Struktur dreidimensionaler Größe auf. Diese Festkörper besitzen eine sogenannte amorphe Struktur (Glas). Das Glasinnere unterscheidet sich dabei von der Glasoberfläche in ihren Eigenschaften. [2] [5] Der Grund hierfür liegt in der speziellen Abkühlung sowie an der Viskosität der Schmelze. Ein kristalliner Festkörper bildet sich dann, wenn die Moleküle ausreichend Zeit haben, die energetisch günstigste Position im Kristallgitter zu besetzen. Bei rasanter Abkühlung wird die molekulare Aktivität verlangsamt und eine Kristallisation wird folglich verhindert. Letztlich erstarrt die unterkühlte Flüssigkeit in einem ungeordneten Zustand. Die Netzwerkbildung von Glas wird durch das Ausgangsprodukt Quarzsand (SiO<sub>2</sub>) erzielt. Das Siliziumion geht eine Doppelbildung mit Sauerstoffionen ein. Das Ergebnis sind SiO<sub>4</sub>-Tetraederstrukturen (siehe Abbildung 2-2), die die Viskosität der Schmelze enorm erhöhen. Diese Strukturen weisen eine lokale Regelmäßigkeit auf, reichen jedoch nicht bis in die makroskopische Ebene. Die hohe Festigkeit der Atombindung bewirkt eine Überlegenheit der sogenannten Nahordnung gegenüber der Fernordnung. Die Verbindung regelmäßiger SiO<sub>4</sub>-Tetraeder mit unregelmäßigen Bindungswinkeln und Abständen führt letztlich zur Netzwerkbildung von Glas. Das Ergebnis ist die markante Transparenz, die der Festkörper Glas aufweist. [2] [4] [6]



Abbildung 2-2: Dreidimensionale Darstellung des SiO<sub>4</sub>-Tetraeders [2]

Während bei Kalk-Natron-Silikatgläsern Quarzsand als Netzwerkbildner fungiert, wird für Brandschutzverglasungen Bortrioxid (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) eingesetzt. Das dann als Borosilikatglas bezeichnete Glas verfügt im Vergleich zu Kalk-Natron-Silikatglas über eine bessere chemische Beständigkeit und einen geringeren Temperaturausdehnungskoeffizienten mit  $\alpha_T = 4,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$  (Kalk-Natron-Silikatglas:  $\alpha_T = 9,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ). Ein geringer Temperaturausdehnungskoeffizient bedeutet, dass sich das Material bei Temperaturerhöhung weniger stark ausdehnt als bei Materialien, die einen höheren Temperaturausdehnungskoeffizient besitzen. Bei Glas wird dabei zwischen Weichgläsern ( $\alpha_T > 6,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) und Hartgläsern ( $\alpha_T < 6,0 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ) unterschieden. [2] [3]

#### 2.1.2 BASIS- UND FUNKTIONSGLÄSER

Glas kann durch einen Veredelungsprozess äußerst widerstandsfähig gemacht werden. Dieser Prozess wird auch als Härtung oder Vorspannung bezeichnet. Durch unterschiedliche Veredelungsprozesse können am Ende unterschiedliche Funktionsgläser mit verbesserten Eigenschaften für mehrere Einsatzgebiete hergestellt werden. [7] Da der Werkstoff Glas im Bauwesen in vielfältiger Art und Weise Gebrauch findet, wird an dieser Stelle eine Einschränkung vorgenommen. Im Rahmen dieser Arbeit werden in Absprache mit den Betreuern vier Gläser (Glasarten) ausgewählt, die gleichzeitig auch relevant in Hinblick auf die Untersuchung des Themas der Arbeit (Glasbruchverhalten bei Brandeinwirkung) sind. Neben dem einfachen Floatglas (Basisglas), welches bereits in Kapitel 2.1.1 vorgestellt wurde, sind dies folgende Funktionsgläser [7]:

- das Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG),
- das Verbundsicherheitsglas (VSG) und
- das Isolierglas.

Brandschutzverglasungen sind nicht Teil der vorliegenden Untersuchung. Auf den ersten Blick scheint es nahe zu liegen, auch Brandschutzverglasungen hinsichtlich seines Glasbruchverhaltens zu untersuchen. Sie können für Feuerwiderstandsdauern von 30, 60, 90 und 120 Minuten sowohl als G-Verglasung (Widerstand gegen Feuer) als auch F-Verglasung (Widerstand gegen Feuer und Wärmestrahlung) ausgeführt werden [8]. In Absprache mit den Betreuern wird auf die Untersuchung des Glasbruchverhaltens von Brandschutzverglasungen verzichtet. Der Umfang dieser Arbeit soll in einem gewissen Rahmen gehalten werden. Darüber hinaus sind die Feuerwiderstandsdauern dieses Glastyps von Beginn an bekannt, weshalb kein unerwartetes Brandrisiko innerhalb dieser Dauer zu erkennen ist.



Abbildung 2-3: ESG [9]

Abbildung 2-4: VSG [10]

Abbildung 2-5: Isolierglas [11]

#### **Einscheiben-Sicherheitsglas**

Zur Herstellung von dem sogenannten Einscheiben-Sicherheitsglas (siehe Abbildung 2-3) wird i. d. R. Floatglas zunächst auf bis zu 600 °C gleichmäßig erwärmt. Aufgrund der Temperaturerhöhung dehnt sich das Glas aus, wodurch seine Struktur weich und verformbar gemacht wird. Anschließend wird von außen kalte Luft auf die Glasoberfläche geblasen, wodurch der oberflächennahe Bereich schlagartig erstarrt, während der Kern zunächst heiß bleibt. Durch dessen Abkühlung treten Spannungen auf, da der bereits erstarrte und erhärtete Bereich den inneren Kern am Abkühlen und dem damit verbundenen Zusammenziehen hindert. Die Oberfläche steht nun unter Druckspannung, der Kern unter Zugspannung. Das aufgetretene Spannungsgefüge bewirkt ein deutlich stabileres Glas. [5] [7]

#### Verbundsicherheitsglas

Für die Herstellung von Verbundsicherheitsglas können verschiedene Gläser verwendet werden. Dies sind i. d. R. ESG oder Teilvorgespanntes Glas (TVG). Zweiteres ähnelt dem ESG, besitzt aufgrund langsamerer Abkühlung jedoch eine geringere Vorspannung. TVG wird überwiegend nur als Verbundsicherheitsglas eingesetzt [3]. Die Besonderheit des Verbundsicherheitsglases liegt im Aufbau. Mindestens zwei Flachglasscheiben werden mit einer reißfesten und dehnbaren Hochpolymerfolie verbunden. Die Bauregelliste A Teil 1 sieht bisher vor, dass ausschließlich Polyvinylbutyral (PVB) als Zwischenfolie verwendet werden darf. Dieser Kunststoff besitzt die Eigenschaften hoher Reißfestigkeit und splitterbindender Wirkung [12]. In einem ersten Schritt werden die Ausgangsmaterialien (Flachglas und PVB-Folie) entsprechend geschichtet. Danach wird in einem Hauptverbundprozess unter Druck (12 bar bis 14 bar) und erhöhter Temperatur von ca. 140 °C der dauerhafte Verbund zwischen den Gläsern und der Folie hergestellt. Die verwendeten Zwischenschichten (PVB-Folie) besitzen Stärken von mindestens 0,38 mm bzw. ein Vielfaches von 0,38 mm. [2]

#### Isolierglas

Das Isolierglas (siehe Abbildung 2-5) zeichnet sich durch die Anordnung von mindestens zwei Glasscheiben und einem jeweils dazwischen liegenden Luftraum (i. d. R. 8 bis 16 mm) aus, der als Wärmeisolierschicht fungiert. Den Zusammenhalt erhält das Isolierglas lediglich durch einen Randverbund. Dabei ist auch mehrschichtiges Isolierglas möglich (3-fach Isolierverglasung). Als Glasscheiben können neben Floatglas beispielsweise auch ESG oder VSG verwendet werden. [5] [7]

Die Festigkeit von Glas wird durch die Biegezugfestigkeit bestimmt, da Glas eine deutlich größere Druckfestigkeit besitzt. Zudem ist die Oberfläche von Glas besonders kerbempfindlich, weshalb die charakteristische Biegezugfestigkeit nicht als konstanter Materialkennwert verstanden werden kann. Nichtsdestotrotz gilt sie als "[...] Qualitätsmerkmal für die Oberflächenbeschaffenheit von fabrikneuen Glasproben [...]" [13]. Die nachfolgende Tabelle zeigt eine Übersicht über die jeweilige charakteristische (Mindest-)Biegezugfestigkeit der vorgestellten Produktgläser. [13]

Charakteristische (Mindest-)Biegezugfestigkeit		
Floatglas	45 N/mm²	
Einscheibensicherheitsglas	120 N/mm²	
Verbundsicherheitsglas*	45 N/mm²	
Isolierglas*	45 N/mm²	

Tabelle 2-1: Charakteristische (Mindest-)Biegezugfestigkeit von Floatglas [13], ESG [14], VSG [15] und Isolierglas

\* Abhängig von dem verwendeten Glas (hier für Floatglas)

### 2.2 AUSWIRKUNGEN DES VERSAGENS VON VERGLASUNGEN AUF DIE BRANDDYNAMIK

Kommt es in einem Raum zu einem Brand, sorgen verschlossene Öffnungen dafür, dass das Feuer mit der Zeit mehr Sauerstoff verbrennt als Sauerstoff zugeführt werden kann. Während die Temperatur im Brandraum weiter ansteigen kann, nimmt die Konzentration des Sauerstoffs ab und die Flammen werden infolge dessen kleiner. [16] Zusätzliche Öffnungen haben je nach Brandraumgeometrie und Brandlast unterschiedliche Auswirkungen auf die Branddynamik. In aller Regel bewirken sie einen Abzug der heißen Rauchgase und der Wärme, weshalb der Verdacht einer entlastenden Wirkung auf einen ungewollten Brand aufkommt. Gleichzeitig wird dem Brandraum jedoch schnell und bei großen Öffnungen viel Sauerstoff zugeführt und der unterventilierte Brand erfährt eine rasche Ventilation. [17] Die Ventilation wird gemäß DIN 18 230-4 (Entwurf Okt. 2010) als "Masse der in einem Brandabschnitt oder Brandbekämpfungsabschnitt pro Zeiteinheit zu- oder abströmender Rauchgase und Luftmengen in kg/s" [18] definiert. Im ungünstigsten Fall kann es zu einer Rauchgasexplosion (Backdraft) kommen. Dieser Effekt tritt ein, wenn bei einer Verbrennung viele brennbare Rauchgase entstehen, ein Unterdruck im Brandraum herrscht und dann schlagartig Sauerstoff zugeführt wird. Der Unterdruck entsteht durch die Abkühlung und dem mit ihr einhergehenden Zusammenziehen der heißen Rauchgase. Beim Aufeinandertreffen von dem zugeführten Sauerstoff und den brennbaren Gasen im Brandraum bildet sich dann ein explosives Gemisch. [16] Im Falle eines ventilationsgesteuerten Brandes bewirken zusätzliche Öffnungen eine Zunahme der Wärmefreisetzungsrate und eine rasante Ausbreitung des Feuers. [19]

Des Weiteren ist die Gefahr eines Feuerüberschlags gegeben, wenn Verglasungen in einer Fassade herausfallen. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass durch die dann ungeschützten Öffnungen in der Außenwand hochschlagende Flammen den Brand in ein darüber liegendes Geschoss weiterleiten können. [20]

Zusätzliche, plötzlich auftretende Öffnungen haben folglich eine enorme Auswirkung auf die Branddynamik und den weiteren Brandverlauf. Sie stellen darüber hinaus ein erhöhtes Risiko hinsichtlich der Personensicherheit (oberstes Schutzziel) dar.

9

## **3** VERSAGENSKRITERIEN UND EINFLUSSPARAMETER

### **3.1** Allgemeines zum Versagensmechanismus

Kapitel 3 dient der eingehenden Auseinandersetzung mit den Versagensmechanismen/-kriterien und Einflussparametern von Glasbruch. Für die in dieser Arbeit zu erarbeitenden Modellierungsansätze zum Verhalten von Glasbruch gilt es zunächst den Mechanismus hinter dem Bruchverhalten von Glas näher zu betrachten und wichtige Kenngrößen aufzuführen. Nachdem das Rissbild und Bruchverhalten ausgewählter Verglasungen auf Grundlage von Richtlinien und Normen erläutert wird, wird im Anschluss der Stand der Forschung zum Thema Glasbruchverhalten vorgestellt. Die Ergebnisse bereits durchgeführter Realbrandversuche und Modelle, die sich mit der Thematik und der Fragestellung weiterführend beschäftigt haben, werden erläutert. Mithilfe dessen können die bisherigen Erkenntnisse zu eingebautem Glas (Fenster-/Türglas) bei Brandeinwirkung vertieft werden, wobei die Kernaussagen der besseren Übersicht dienend eingerückt sind. Eine übersichtliche Zusammenfassung der einzelnen Versagenskriterien und Einflussparametern werden am Ende dieses Kapitels dann zusammengetragen und abschließend festgelegt.

Da Glas eine amorphe Struktur besitzt und die Moleküle äußerst fest untereinander verbunden sind, sind die Molekülketten einwirkendem Druck unmittelbar ausgesetzt. Ein Ausweichen ist im Gegensatz zu kristallinen Feststoffen nicht möglich. Das molekulare Gefüge von Glas kann nur zwei Formen annehmen: Entweder verbleibt es in seiner bisherigen erhärteten Form oder es versagt spröde. [21] Die ,Temperaturwechselbeständigkeit' des Glases, also die Widerstandsfähigkeit gegen schlagartige Temperaturwechsel sowie Temperaturunterschiede im Glas, spielt dabei eine erhebliche Rolle. [22]

In diesem Zuge ist zum einen der Wärmedurchgangskoeffizient U<sub>g</sub> und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  zu nennen. Ersterer gilt dem mittleren Teil der Verglasung und ist ein Maß dafür, "wieviel Wärmeenergie pro Zeit bei einem Kelvin Temperaturunterschied zwischen innen und außen durch einen Quadratmeter der Fläche der Gebäudehülle fließt" [23]. [24] Er wird in der Einheit W/(m<sup>2</sup>K) angegeben. Für das Fenster (also inklusive Rahmenkonstruktion) wird der Wärmedurchgangswert als U<sub>w</sub> bezeichnet. Je kleiner die U-Werte sind, desto weniger Wärmeverluste sind durch das Bauteil zu verzeichnen. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist ein ähnliches Maß wie der

10

Wärmedurchgangskoeffizient, mit dem Unterschied, dass sie sich auf eine 1 m dicke Schicht eines Materials bezieht. Sie besitzt entsprechend die Einheit W/(mK). [23] Da Glas eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt kann es sich lokal aufheizen. Dies führt wiederum zu einer lokalen Ausdehnung und in Folge dessen zu lokalen Zugspannungen, die mit wachsenden Temperaturunterschieden innerhalb des Glases zunehmen. Jedoch ist hierbei zu erwähnen, dass "die Lage der Temperaturextreme innerhalb der Scheibe [...] entscheidender für einen Glasbruch [ist] als die Höhe der Temperaturdifferenz" [22], wie Abbildung 3-1 verdeutlicht. Ein thermischer Glasbruch ist bei der rechten Glasscheibe deutlich wahrscheinlicher, da die Temperaturextreme trotz gleicher Temperaturdifferenz immens stärker voneinander abgrenzen. [22]



Abbildung 3-1: Unterschiedliche Temperaturextreme innerhalb von Glasscheiben [22]

Infolge der Temperaturdifferenzen bilden sich wie bereits bekannt Zugspannungen aus. Überschreiten die Zugspannungen eine kritische Grenze, bricht das Glas. Die örtliche Glaserwärmung wird je nach Art der Verglasung unterschiedlich sein. Isolierglas verhält sich bei thermischer Einwirkung beispielsweise anders als Einscheiben-Sicherheitsglas. Darüber hinaus absorbiert getöntes Glas mehr Wärme als normales Floatglas, was einen Glasbruch begünstigt. [25] Für eingebautes Glas in Form von Fenstern und Türen gilt, dass es bei einer Temperaturänderung zusätzlichen Spannungen durch seine Rahmenkonstruktion ausgesetzt ist. Abbildung 3-2 zeigt die in einer eingebauten Glasscheibe bei thermischer Beanspruchung auftretende Belastung und die gleichzeitige Behinderung der Materialausdehnung infolge der Lagerung. Das Glas kann sich in einem umlaufend haltenden Rahmen innerhalb der Ebene nicht ausdehnen. Zusätzliche Spannungen sind die Folge. Kommt es zu einem Riss, tritt dieser für gewöhnlich an der geschwächten Glaskante – durch Schleifen oder Brechen hervorgerufen – auf. Im rechten Winkel zur Glaskante ausgehend verlängern sich die Risse in Richtung Scheibeninneres. [26]



Abbildung 3-2: Belastungen einer in der Ebene ringsum gehaltenen Scheibe durch Temperatureinwirkung [26]

Das Rissbild ist für die weiteren Untersuchungen von Bedeutung. Ein Riss induziert noch kein Versagen der Glasscheibe. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass das Rissbild über den späteren Versagensmechanismus entscheidet.

Bevor im Folgenden auf die in dieser Arbeit betrachteten Gläser näher eingegangen wird, ist zuvor anzumerken, dass nicht nur thermische Einwirkungen zu einem Glasbruch führen können. Auch mechanische Einflüsse bewirken bruchauslösende Zugspannungen. Ausgangspunkt können u. a. Wind-, Schnee- oder Stoßlasten (z. B. Einschüsse) sein. Durch die industrielle Herstellung und die hohen Sicherheitsstandards in Deutschland werden fehlerhafte Gläser bei der Produktion bereits aussortiert. Daher kann davon ausgegangen und vorausgesetzt werden, dass die Gläser keine Oberflächenfehler aufweisen und nicht infolge Eigenspannungen brechen. [25] [27]

### **3.2** RISSBILD UND BRUCHVERHALTEN AUSGEWÄHLTER VERGLASUNGEN

Nachstehend wird das Rissbild sowie das Bruchverhalten der vier Gläser (Floatglas, ESG, VSG, Isolierglas) beschrieben, welches hauptsächlich aus gängigen Normen und Richtlinien hervorgeht bzw. abzuleiten ist. Generell hängt das Bruchbild (Struktur und Größe der Bruchstücke) von der im Glas gespeicherten Energie ab. Allgemein kann festgehalten werden: Je größer die Energie, also je größer die induzierte Vorspannung im Glas ist, desto kleiner sind die Bruchstückgrößen. [28] Das Bruchbild wird darüber hinaus mit zunehmender Scheibendicke gröber [29].

### **Floatglas**

Das Floatglas erfährt keine besondere Vorspannung. Diese fällt mit ca. -5 bis -10 N/mm<sup>2</sup> ziemlich gering aus, weshalb auch die Bruchstücke entsprechend groß sind. [28] Zudem besitzt Floatglas eine Temperaturwechselbeständigkeit von lediglich 40 K. Das bedeutet wiederum, dass es deutlich anfälliger für einen Glasbruch ist im Vergleich zu z. B. ESG. [30] Abbildung 3-3 zeigt mögliche Kantenbrüche bei Floatglas, die infolge thermischer Erwärmung hervorgerufen werden. Es fällt auf, dass die Risse von den Glaskanten in Richtung Scheibeninneres bzw. zur benachbarten Glaskante verlaufen.



Abbildung 3-3: Kantenbrüche durch thermische Erwärmung von Floatglas [26]

#### Einscheiben-Sicherheitsglas

Für die Verwendung von Einscheiben-Sicherheitsglas muss nach DIN EN 12150-1 (Abschnitt 8) eine Bruchstrukturprüfung durchgeführt werden. Da die Glasscheibe im nicht eingebauten Zustand dieser Prüfung unterzogen wird, kann die Bruchstruktur von eingespannten ESG-Scheiben von der Bruchstruktur aus der Bruchstrukturprüfung abweichen. Dies ist auf die differenzierten auftretenden Spannungen zurückzuführen. Eingebautes Glas (Fensterglas) bricht anders als eine reine Glasscheibe. Darüber hinaus ist die Oberflächendruckspannung für das Bruchbild ausschlaggebend, wobei kein größentechnischer Zusammenhang zum Bruchbild besteht. [14] ESG besitzt in jedem Fall eine besondere Bruchstruktur. Der Eigenspannungszustand ist besonders groß. Die in ihr enthaltende Energie führt bei einem Bruch zu einem Zerspringen des Glases in stumpfkantige, zahlreiche Einzelteile mit einer Größe < 1 cm<sup>2</sup> (siehe Abbildung 3-4). [5] [7] Bei einem Bruch dickerer ESG-Scheiben, die auf der vollen Fläche emailliert (mit Schmelz überzogen) sind, können laut einer Schweizer Richtlinie größere (zusammenhängende) Teile herausbrechen. Die Temperaturwechselbeständigkeit von ESG liegt aufgrund der Vorspannung bei ca. 200 K. [31]



Abbildung 3-4: Bruchbilder von Einscheiben-Sicherheitsglas [5] [7]

### Verbundsicherheitsglas

Der Einsatz von Verbundsicherheitsglas findet überwiegend dort statt, wo mechanische Einwirkungen wie Aufprälle stattfinden. Als Beispiel hierfür sind bodentiefe Fenster, die für Gebäudefassaden verwendet werden oder horizontale Verglasungen zu nennen. Das bei einer mechanischen Einwirkung einhergehende Bruchbild gleicht dann einer schmetterlings- bzw. spinnennetzartigen Struktur (siehe Abbildung 3-5). [32] Mit großer Wahrscheinlichkeit ist ein anderes Bruchbild zu erwarten, wenn das VSG thermischen Belastungen (Brand) ausgesetzt ist und infolge dessen bricht. Dies wird damit begründet, dass ein punktueller Impuls ausbleibt und Risse an anderer Stelle ihren Ursprung erfahren.



Abbildung 3-5: Bruchbild von Verbundsicherheitsglas infolge mechanischer Einwirkung [32]

Wie in Kapitel 2.1.2 bereits erwähnt, besitzt die PVB-Folie eine splitterbindende Wirkung und hohe Reißfestigkeit. Die Glasscherben werden am Herausfallen gehindert. [12] Durch diese Eigenschaft gilt es zu prüfen, inwieweit die Betrachtung von VSG in dieser Arbeit relevant ist. Ist davon auszugehen, dass innerhalb der ersten 90 Minuten nach Brandeintritt aufgrund der PVB-Folie kein Herausfallen der Glasscheibe zu erwarten ist, wird das Verbundsicherheitsglas für die Modellierungsansätze sowie die Brandsimulationen nicht näher betrachtet. Die PVB-Folie hat die Eigenschaft, dass sie ab 60 °C beginnt zu erweichen [33]. Inwieweit sich dies bei Brandeinwirkung auf das Bruchverhalten ausübt und ob ein Herausfallen die Folge sein kann, wird in der Literaturrecherche in Kapitel 3 näher untersucht. Die Temperaturwechselbeständigkeit hängt von den verwendeten Gläsern ab (vgl. Tabelle 2-1). Wird einfaches Floatglas eingesetzt, darf der in der Scheibenfläche auftretende Temperaturgradient maximal 40 K sein, um die Eigenschaften von Verbundsicherheitsglases beizubehalten. [15]

#### Isolierglas

Isolierglas wird i. d. R. aus zwei oder drei Gläsern (2-fach bzw. 3-fach Isolierung) hergestellt. Bei 3-fach Isolierglas ist es günstig, die mittlere Scheibe aus vorgespannten Glas einzusetzen. Laut Schweizer Experten bricht diese bei hohen Temperaturdifferenzen meist als erste, da sie die höchste thermische Beanspruchung erfährt. [25] Ein mögliches Rissbild eines 3-fach Isolierglases zeigt Abbildung 3-6. Die Risse verlaufen von den Ecken ausgehend in Richtung dem Inneren der Scheibe.



Abbildung 3-6: Glasbruch einer 3-fach Isolierverglasung infolge Temperatur- und Luftdruckänderung [26]

### **3.3 STAND DER FORSCHUNG**

In der Vergangenheit beschäftigen sich bereits einige Personen mit der Untersuchung, wann erste Risse im Glas aufgrund der Erwärmung infolge eines Brandes auftreten. Dies waren zum Beispiel Keski-Rahkonen im Jahre 1988 bzw. 1991, Joshi und Pagni in den Jahren 1990 bis 1994 sowie Cuzillo und Pagni im Jahre 1998. [34] Gemäß Hietaniemi sowie Babrauskas konnten die in diesen theoretischen Studien entwickelten Modelle und Programme jedoch nur vorhersagen, wann bei einem Brand aufgrund der entstandenen Wärmeinwirkung der erste Riss in der Fensterscheibe auftritt. Auch wenn diese Vorhersage ziemlich genau ist und sich mit den Ergebnissen aus Realbrandversuchen deckt, wurde keine Aussage zu dem Herausfallen der Glasscheibe selbst gemacht. Zu welchem Zeitpunkt und unter welchen Voraussetzungen eine eingebaute Glasscheibe bei einem Brand zerspringt und herausfällt ist jedoch die entscheidende Frage. [34] [35]

#### 3.3.1 MODELLBILDUNG VON HIETANIEMI

Hietaniemi hat im Jahre 2005 verschiedene experimentelle Studien, die sich mit dem Glasbruchverhalten bei thermischer Beanspruchung befassen, näher untersucht. So habe Pagni im Jahre 2003 bereits festgestellt, dass das Herausfallen von Glas durch mehrere Risse entstehe. Gleichzeitig sei es mit Eintritt des ersten Risses schwieriger, genaue Aussagen über das Verhalten der Glasscheibe auf Temperaturveränderungen zu treffen. Hietaniemi hat aufgrund dessen ein eigenes Modell mithilfe des Monte Carlo BREAK 1 Programms (von Pagni & Joshi) entwickelt: Zur Vereinfachung hat er eingangs festgelegt, dass der Einfluss direkter Wärmeeinstrahlung vernachlässigt wird und lediglich die Temperatur der Heißgasschicht zu einer Erwärmung der Glasscheibe führt. [34]

Das völlige Versagen und Herausfallen des Glases solle dabei stets nach einer bestimmten Rissanzahl stattfinden [34].

Untersucht hat Hietaniemi einfache Kalk-Natron-Silikatscheiben (Floatglas-Scheiben) der Stärken 3 mm und 6 mm, mit der Begründung, dass auch die im Brandschutz relevanten Glasscheiben dünn seien (i. d. R. zwischen 3 mm und 6 mm). Mit dem Modell wurden anschließend bereits vorhandene Experimente analysiert, um letztlich herauszufinden, welche Anzahl an Rissen notwendig ist, damit eine Glasscheibe herausfällt und eine Änderung der Ventilationsbedingun-

16

gen im Brandraum verursacht. [34] Nachfolgend werden auszugsweise zwei untersuchte Versuchsreihen vorgestellt: die von Hassani und die des Loss Prevention Council (LPC). Für eine weitere Auseinandersetzung mit den übrigen Versuchsreihen wird auf die Literatur verwiesen.

Aussagekräftige Ergebnisse lieferten Vergleiche zu den Untersuchungen von Hassani aus dem Jahre 1994/1995. In seinen Versuchen wurde die Hälfte eines Zimmers mit den Abmessungen 170,5 mm x 152,5 mm x 118,0 mm (Länge x Breite Höhe) untersucht, wobei drei unterschiedliche Wandbauten in Massivbau-, Normalbau- (Gipskarton) und Leichtbauweise betrachtet wurden. Hietaniemi wählte für seine Analyse die Leichtbauweise aus, da zu ihr die entsprechenden Graphen der Heißgasschichttemperatur vorlagen. Untersucht wurden einfach-verglaste Fensterscheiben der Stärken 4 mm und 6 mm mit den Abmessungen von 90 cm x 160 cm. [34]

Das Ergebnis des Berechnungsmodells von Hietaniemi war, dass die Glasscheiben mit Eintritt des fünften Risses herausfielen [34].

50 % der 6 mm dicken Scheibe fiel bei ca. 15 Minuten heraus, während die 4 mm dicke Glasscheibe mit nur vier Rissen in der Konstruktion verblieb und nicht versagte. Abbildung 3-7 zeigt die Temperaturzeitkurven der Heißgasschicht bei Verwendung der jeweiligen Glasscheiben (a) blaue Kurve: 4 mm; b) rote Kurve: 6 mm). [34]



Abbildung 3-7: Temperaturkurven der Heißgasschicht von a) 4 mm und b) 6 mm dickem Glas [34]

17

Die Abbildung lässt erkennen, dass die Folge einer neuen Öffnung die Ventilation dahingehend beeinflusst, dass die Temperatur der Heißgasschicht rasant zunimmt, nachdem dem Brandherd Sauerstoff hinzugeführt wird [34].

Innerhalb von etwas weniger als zwei Minuten stieg sie von ca. 550 °C auf 800 °C an, was einem Temperaturanstieg von ungefähr 2,5 °C pro Sekunde entspricht. Die durchschnittliche Temperatur der Glasoberfläche lag zum Zeitpunkt des fünften Risses währenddessen bei etwa 410 -430 °C. Die gleichen Untersuchungen wurden mit 2-fach Isolierglas durchgeführt. Hier verblieben die Scheiben nach dem vierten oder fünften Riss jedoch in der Konstruktion, ohne herauszufallen. [34]

Die dokumentierten Rissmuster zeigt Abbildung 3-8. Auf welcher Höhe sich die Heißgasschicht zu dem Zeitpunkt der Rissdokumentation befand, wird nicht erwähnt. Es ist ersichtlich, dass die ersten Risse stets an der oberen Glaskante beginnen. Sie verlängern sich für ein kurzes Stück in das Glasinnere und verlaufen dann parallel zur Glaskante. Dabei verzweigen vom Rissursprung meist zwei Risse. Bei der Einfachverglasung tritt der vierte Riss inmitten der Scheibe auf und verläuft parallel zu den längeren Glaskanten. Das Rissbild der Doppelverglasung weist lediglich Risse auf, dessen Ursprung sich am Scheibenrand befindet. Die Verlängerungen verlaufen dabei ineinander.



Abbildung 3-8: Rissmuster der untersuchten Glasscheiben (Leichtbauweise) [34]

Darüber hinaus wurde für den Loss Prevention Council (LPC) 1999 eine Studie durchgeführt, die die Ausbreitung des Feuers vor einer verglasten Fassade mit Vorhangfassaden zu untersuchte. Das Augenmerk lag hier auch auf dem Versagen und Herausfallen der Glasscheiben. Als Brandlast diente zum einen eine Holzkrippe (Szenario 1) und zum anderen ein voll möbliertes Büro (Szenario 2). Die Ergebnisse wurden von Hietaniemi mithilfe seines Modells analysiert. Im Fall der Holzkrippe versagte das Glas nach 13 Minuten, was der achten Rissbildung im Glas entspricht. Die Temperatur der Heißgasschicht aus dem Experiment betrug im Mittel ca. 800 °C, was der berechneten Heißgasschichttemperatur beim Auftreten des achten Risses entspricht. Die Temperatur der Glasoberfläche wurde zu 620 – 650 °C ermittelt. Die Glasscheiben des voll möblierten Büros fielen schon nach fünf Minuten heraus, was wiederum der siebten Rissbildung im Glas gleichkommt. Die berechnete Temperatur der Heißgasschichttemperatur der Heißgasschicht stimmte mit durchschnittlichen 750 °C auch hier wieder mit der gemessenen Heißgasschichttemperatur überein. Die gemittelte Oberflächentemperatur des Glases berechnete sich zu ca. 560 °C. [34]

Das Modell von Hietaniemi bewies sich als zuverlässig in Hinblick auf die anhand der Rissanzahl getroffenen Vorhersage des Glasbruchverhaltens. Es berücksichtigte jedoch nicht die Einwirkung der Wärmestrahlung [34].

### **3.3.2** REALBRANDVERSUCHE VON XIE ET AL.

2008 wurde ein Bericht von Xie et al. veröffentlicht, in dem sie ihre umfassende experimentelle Studie hinsichtlich der Rissbildung und dem Herausfallen von Einscheiben-Sicherheitsglas verschiedener Dicken (6 mm und 10 mm) beschreiben. Ihre Untersuchungen führten sie in dem in Abbildung 3-9 gezeigten Testraum nach der ISO 9705 durch, wobei sie die Dimension des Feuers, welches immer in der Mitte des Versuchsraumes positioniert war, variierten. Die thermische Belastung, die auf Fenster einwirkte, setzte sich zum einen aus der Temperatur der Heißgasschicht (schwarzer heißer Rauch) und zum anderen aus der der Wärmestrahlung des Feuers zusammen. [36] Bei seinen Auswertungen kamen sie zu folgenden Feststellungen:

Bei thermischer Brandeinwirkung (Poolfeuer von 900 mm Durchmesser) reißt die gesamte ESG-Scheibe und fällt vollständig heraus [36].

Dadurch entstünden im Vergleich zu anderen Verglasungen relativ große neue Öffnungen, die eine enorme Auswirkung auf die Branddynamik bedeuten würden. Ein Versagen der Verglasungen trat jedoch nicht bei der Versuchsdurchführung auf, wo die Abmessungen des Brandherdes kleiner 900 mm Durchmesser betrugen. Außerdem konnten Xie et al. die kritische Temperaturdifferenz, die zu einem Versagen der Glasscheibe führte, sowohl für die 6 mm als auch 10 mm

19

dicke Glasscheibe beziffern. Sie lag zwischen ca. 330 und 380 °C (6 mm) bzw. 470 bis 590 °C (10 mm). [36]

Daraus wird suggeriert, dass bei dickeren ESG-Glasscheiben eine vergleichsweise größere Temperaturdifferenz notwendig ist, damit die Verglasung zu Bruch geht. Zudem besitzt einfaches Floatglas eine niedrigere Temperaturwechselbeständigkeit als Einscheiben-Sicherheitsglas. [36]





#### **3.3.3 REALBRANDVERSUCHE VON KUNKELMANN**

Kunkelmann hat acht Jahre nach Hietaniemi, im Jahre 2013, einen Forschungsbericht veröffentlicht, in dem er unter anderem das Verhalten von Verglasungen bei thermischer Beanspruchung auf theoretischer und experimenteller Ebene untersuchte. Der Fokus galt Gebäuden moderner Bauweise wie beispielsweise sogenannten Passiv- und Niedrigenergiehäusern. In Bezug auf Literatur von Wagner hat Kunkelmann einen Zusammenhang zwischen der Belastungsdauer und Widerstandsdauer festgestellt. [17]

Langanhaltenden Belastungen kann Glas demnach schlechter widerstehen als kurzfristig auftretenden Belastungen [17].

Darüber hinaus hat Kunkelmann in seiner Literaturrecherche herausgefunden, dass Verglasungen durch die Aufheizphase eines Brandes zuerst lediglich in der Scheibenmitte erhitzt werden. Dies sei damit begründet, dass der Fensterrahmen den Scheibenrand abdeckt und diesen zunächst kalt bleiben lässt. Die ungleichmäßige Erhitzung hat wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt zur Folge, dass das Scheibeninnere bestrebt ist sich auszudehnen. Der noch kalte Scheibenrand lässt diese Ausdehnung jedoch nicht zu und Druckspannungen im Scheibeninneren und Zugspannungen im Randbereich sind die Folge. [17]
Die Temperaturdifferenz ∆T, die zwischen Scheibenrand und -mitte besteht und letztlich zum Bruch des Glases führt, hängt gemäß Kunkelmann dabei zum einen von der Breite der Rahmenabdeckung und zum anderen von der Aufheizgeschwindigkeit des Brandraumes ab [17].

Dabei erfährt der Rahmenbereich stets die größten Temperaturgradienten, unabhängig davon, welchen Glaseinstand (Auflagertiefe eines Glases) das Fenster besitzt. In experimentellen Untersuchungen von Shields wurden Doppelverglasungen aus Floatglas mit einer Scheibendicke von jeweils 6 mm in einem Versuchsraum (1,70 m Höhe, 1,50 m Breite und 1,60 m Tiefe) mithilfe einer Brandquelle bestehend aus einer Holzkrippe thermischen Belastungen ausgesetzt. Der Ort der Brandquelle sowie die Zuluftöffnungen variierten. Kunkelmann beschrieb in seiner Literaturauswertung, dass die durchschnittliche Temperaturdifferenz ΔT unabhängig von der Größe der Verglasung bei rund 160 K lag. Die These, dass sich aufgrund der absorbierten Wärmestrahlung das Scheibeninnere (mittlerer Teil der Scheibe) am schnellsten und stärksten aufwärmt, wurde bestätigt. Shields' Versuche haben zudem bewiesen, dass die Stabilität der äußeren Scheiben bei einem Brand kaum beeinträchtigt wird und weitestgehend intakt bleibt. [17]

Kunkelmann hat darüber hinaus Versuche von Klassen et al. vorgestellt, die sich mit Dreifachverglasungen befassten [17].

Die erforderlichen Temperaturdifferenzen  $\Delta T$  in der Scheibenebene, die die Verglasungen zum Zerspringen brachten, nahmen mit der Größe der Glasfläche zu ( $\Delta T$  = 200 K bei 30,5 cm x 30,5 cm;  $\Delta T$  = 300 K bei 60,9 cm x 121,9 cm). [17]

Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass das Versagen bei kleineren Glasscheiben früher auftritt als bei größeren.

Wie Hietaniemi hat auch Kunkelmann mithilfe der gewonnen Erkenntnisse seine eigenen Versuche durchgeführt und hinterher verglichen. Dafür hat er den in Abbildung 3-10 gezeigten Versuchsaufbau entwickelt, der die Untersuchung unterschiedlicher Aufbauten zulässt. Es wurden Fenster der Abmessungen von 73,0 cm x 73,0 cm und 75,0 cm x 75,0 cm mit Rahmen geprüft, die sich bei der Durchführung zur Hälfte in der Heißgasschicht befanden und ungleichmäßigen thermalen Belastungen ausgesetzt wurden. [17]

21



Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus von Kunkelmann [17]

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die erste Rissbildung beschleunigt wird, wenn die Wärmebelastung erhöht wird. Dem ersten Riss soll jedoch nicht so viel Bedeutung geschenkt werden, da er in keinem Zusammenhang zu dem Verbleib im Risszustand und dem damit einhergehenden vorhandenen Raumabschluss steht. [17]

Das vollständige Versagen und Herausfallen der Glasscheiben hänge auf der einen Seite von den Werkstoffkenngrößen des Glases ab. Auf der anderen Seite seien die Wechselwirkungen zwischen der Einbausituation und den Rahmeneigenschaften, wie beispielsweise der Größe, dem Material oder den Dichtungen dafür verantwortlich. [17]

Kunkelmanns Versuche zeigten außerdem, das VSG-Verglasungen, die in einem PVC-Rahmen (Polyvinylchlorid-Rahmen) eingefasst waren, deutlich schneller als andere Verglasungen zerstört wurden. Ihre PVB-Folie löste sich und es entstanden nach wenigen Minuten Wärmeeinwirkung zunächst Bläschen zwischen den Glasscheiben, die sich im weiteren Verlauf in ihrer Form änderten und letztlich ganz auflösten, während die Risse sich gelb-bräunlich verfärbten (Abbildung 3-11, links). Mit zunehmender Brandbeanspruchung traten anfänglich Flammen aus den Rissen hervor (Abbildung 3-11, mittig), die kurz darauf die Scheibenmitte erreichten, die Rahmenkonstruktion in Brand setzten und infolge dessen die Scheibe durch die Rußbildung schwarz färbte (Abbildung 3-11, rechts). [17]



Abbildung 3-11: Brandverhalten einer 2-fach Verglasung (äußere Scheibe aus VSG) in einem PVC-Rahmen [17]

Die Außenscheiben von 2- bzw. 3-fach Isolierverglasungen in Holzrahmen konnten hohen Temperaturbeanspruchungen dagegen äußerst gut standhalten. Dies ist auf die Pyrolyse von Holz zurückzuführen. Der Holzrahmen, an dem partiell entstandene verkohlte Stellen auftreten, behält seine Stabilität im Vergleich zu PVC-Rahmen, die bei Brandeinwirkung stark deformieren, besser bei. Darüber hinaus bildet Holz durch seine verkohlte Schicht eine gewisse Schutzfunktion. [17]

Zusätzlich bewirkt die geringe Wärmeleitfähigkeit von Holz abgeschwächte Festigkeitseinbußen, weshalb Holzrahmen gegenüber PVC-Rahmen insgesamt ein deutlich minimiertes Risiko für das Herausfallen von Glasscheiben bei Brandeinwirkung bedeuten. [17]

#### 3.3.4 BABRAUSKAS

Im darauffolgenden Jahr (2016) veröffentlichte Babrauskas den Bericht "Glass breakage in fires" [35]. Er nahm in seiner theoretischen Auseinandersetzung mit dem Thema Glasriss/-bruch bei Brandeinwirkung auf dieselben bisherigen Veröffentlichungen (Pagni, Shields, etc.) Bezug, wie auch Hietaniemi es tat. Darüber hinaus stellte er die Versuche und Ergebnisse des Building Research Institute (BRI) aus Japan vor, die Einfachglas der Stärke 3 mm untersuchten. Die zum Bruch führende gemittelte Gastemperatur betrug 360 °C mit einer Standardabweichung von 50 °C, während die Oberflächentemperatur der Glasscheibe 240 °C mit einer Standardabweichung von ebenfalls 50 °C betrug. Bei Untersuchungen des Loss Prevention Council of the UK von Zweifach-Verglasungen (je 6 mm Stärke), wurde der Glasbruch bei 600 °C verzeichnet. Allerdings ist hinzuzufügen, dass diese Temperatur für mindestens acht bis zehn Minuten anhalten musste, damit die Verglasung zu Bruch ging und herausfiel. [35] Zudem erwähnte Babrauskas abschließend, dass viele Parameter, wie beispielsweise die Größe der Verglasung, die Art des Rahmens oder auch die Glasdicke einen Einfluss auf das Herausfallen von Glas bei Brandeinwirkung haben können. [35]

#### **3.3.5** REALBRANDVERSUCHE VON HARADA ET AL.

Harada et al. haben im Jahre 2017 ein Buch herausgebracht, welches u. a. das Zusammenspiel von Winddruck und Hitze auf das Glasbruchverhalten untersucht. Die Auswirkung der Windverhältnisse ist für diese Arbeit nicht von Bedeutung. Jedoch wurden auch Versuche ohne die Einwirkung von Wind mit einem einfachen 6 mm starken Floatglas durchgeführt. [37]

Dabei kam die Gruppe der Forscher zu dem Ergebnis, dass die Rissbildung immer infolge eines Temperaturunterschiedes passierte. Der größte Temperaturunterschied trat dabei stets zwischen der freiliegenden, ungeschützten und der geschützten Fläche auf. [37]

Anders ausgedrückt verhalf der Fensterrahmen dazu, dass sich die Glasoberfläche im Randbereich weniger schnell erhitzte. Die maximal gemessene Temperaturdifferenz, die das Glas zum Reißen brachte, betrug ca. 110 K. [37]

#### **3.3.6** VERSUCHE VON CHEN ET AL.

Im gleichen Jahr (2017) wurde der Forschungsartikel "Crack evolution process of window glass under radiant heating" [38] von Chen et al. herausgebracht, in dem der Prozess der Rissentwicklung von Fensterglas (Floatglas) unter einwirkender Strahlungswärme untersucht wurde. Dafür wurden u. a. mehrere Experimente durchgeführt, in denen 6 mm starkes Floatglas mit den Abmessungen von 600 mm x 600 mm, eingespannt in einer Aluminium-Rahmenkonstruktion, untersucht wurde. Die Verglasung wurde aus unterschiedlichen Entfernungen über die komplette Scheibenfläche mit einer dreidimensionalen Heizbox ähnlicher Abmessungen und Höhe thermal belastet (siehe Abbildung 3-12). [38]

Die Ergebnisse zeigten, dass ein Glasbruch durch die Aufheizgeschwindigkeit der Strahlungsquelle stark beeinflusst wurde. Je größer diese war, desto schneller erfolgte die durchschnittliche Zeit bis zum ersten, zweiten und dritten Hauptbruch. [38] Floatglas hielt im Mittel eine Bruchspannung von ca. 71 MPa aus, bis dieses den ersten Hauptbruch erfuhr. Der erste Hauptbruch war in der Regel dadurch gekennzeichnet, dass vom oberen Rand zwei oder mehr Risse entstanden (Abbildung 3-13 (A)), die sich in entgegengesetzte Richtungen ausbildeten. Eine ähnliche Rissstruktur wurde auch bei Hietaniemi festgestellt (vgl. Abbildung 3-8). Im Zuge der weiterführenden thermischen Belastung bilden sich weitere kleine Risse aus, bis es zum zweiten Hauptbruch kommt (Abbildung 3-13 (C)). Die kleineren Risse setzen sich mit vorherigen Rissen zusammen und bilden sogenannte Glasinseln. [38]

Es stellte sich heraus, dass rissige Glasinseln die Voraussetzung für ein Herausfallen der Verglasung waren [38].

Dies war mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die reduzierten Zwänge der Inseln und des labilen Zustandes zurückzuführen. Dabei stellten sich größere rissige Glasinseln in der Scheibenmitte und kleinere in Nähe der Scheibenkante ein. [38]



Abbildung 3-12: Versuchsaufbau von Chen et al. [38]

Abbildung 3-13: Prozess der Rissausbildung [38]

Neben den experimentellen Untersuchungen beinhaltete der Forschungsartikel von Chen it. al. ebenfalls eine Literaturrecherche. So wurde das Risswachstum unterschiedlicher Verglasungen bei unterschiedlichen Brandlasten aufgeführt. [38]

Die ersten Risse stellten sich bei Einscheiben-Sicherheitsglas infolge eines Bürobrandes erst über die gesamte Glasscheibe ein, bevor die Verglasung kurz darauf nach weiteren Rissen komplett herausfiel. [38]

## **3.4 ZUSAMMENFASSUNG**

Aus den gewonnenen Erkenntnisse lässt sich nun eine zusammenfassende Übersicht der einzelnen Versagenskriterien, die einen Glasbruch bei Brandeinwirkung bewirken, sowie dessen Einflussparameter aufstellen. Diese ist Tabelle 3-1 zu entnehmen. Jedes Versagenskriterium und jeder Einflussparameter werden zudem noch einmal kurz erläutert. Dabei werden Attribute, die nicht aus der thermischen Belastung (Heißgasschicht, Wärmestrahlung) hervorgehen, außer Betracht gelassen (z. B. Windverhältnisse, die von außen auf die Scheibe einwirken können).

Versagenskriterien	Einflussparameter
Temperaturunterschiede	Scheibenabmessungen (-einstand)
Lage der Temperaturextreme	Fensteranordnung im Raum
Dauer der thermischen Belastung	<ul> <li>Glasart (Thermische Vorspannung, Tempe- raturwechselbeständigkeit)</li> </ul>
Rissanzahl/Glasinsel	Glasstärke (-dicke)
	Rahmenkonstruktion/Einbausituation
	Umfassungsbauteile
	<ul> <li>Aufheizgeschwindigkeit (Brandquelle, Be- anspruchungstemperaturzeitkurve)</li> </ul>

Tabelle 3-1: Übersicht der einzelnen V	/ersagenskriterien ι	Ind Einflussparameter
--	----------------------	-----------------------

### Versagenskriterium 1: Temperaturunterschiede [21] [25] [36] [37]

Thermische Glasbrüche werden im Allgemeinen durch Temperaturunterschiede in der Ebene des Glases hervorgerufen. Temperaturunterschiede in der Glasebene sind auf lokale Erwärmungen oder zu große Scheibeneinstände im Rahmen zurückzuführen. [25] Da Glas eine amorphe Struktur besitzt und die Moleküle äußerst fest untereinander verbunden sind, sind die Molekülketten einwirkendem Druck unmittelbar ausgesetzt. Ein Ausweichen ist im Gegensatz zu kristallinen Feststoffen nicht möglich, weshalb ab einer Grenzspannung, die durch Temperaturunterschiede hervorgerufen wird, Glas spröde versagt. [21]

#### Versagenskriterium 2: Lage der Temperaturextreme [22]

Gemäß der Literaturrecherche [22] ist neben den Temperaturunterschieden vielmehr die Lage der Temperaturextreme von Bedeutung. Ist der Randbereich sehr kalt und das Scheibeninnere sehr heiß, ist die Wahrscheinlichkeit eines Glasbruches deutlich größer im Vergleich zu einer gleichmäßen Verteilung der unterschiedlichen Temperaturen innerhalb der gesamten Scheibenfläche (vgl. Abbildung 3-1). [22]

#### Versagenskriterium 3: Dauer der thermischen Belastung [17]

In Realbrandversuchen von Kunkelmann stellte sich ein Zusammenhang zwischen der Dauer der thermischen Belastung und der Widerstandsdauer der Glasscheibe heraus. Langanhaltenden Belastungen kann Glas demnach schlechter widerstehen als kurzfristig auftretenden Belastungen. [17]

#### Versagenskriterium 4: Rissanzahl/Glasinsel [34] [38]

Durch die bei thermischer Belastung auftretenden Spannungen im Glas sind bei Überschreiten der Grenzspannung Risse die unmittelbare Folge. Die aufzunehmende Spannung erfährt sein Maximum und wird durch die Risse abgebaut. Je nach Art der Verglasung ist nach einer bestimmten Anzahl von Rissen ein (teilweises) Herausfallen der Glasscheibe zu verzeichnen, das wiederum durch sogenannte Glasinseln hervorgerufen wird. Diese entstehen durch das Zusammensetzen mehrerer kleiner Risse mit vorherigen (Haupt-)Rissen. [38] Das völlige Versagen und Herausfallen des Glases findet also stets nach einer bestimmten Rissanzahl statt. [34]

#### Einflussparameter 1: Scheibenabmessungen (-einstand) [17] [35]

Als erster Einflussparameter ist die Abmessung der Glasscheibe zu nennen. Verglasungen können sich über unterschiedliche Höhen und Breiten erstrecken sowie unterschiedliche Geometrien aufweisen. Die gängigste Geometrie ist wahrscheinlich die klassische Rechteckform. Seltener werden Verglasungen auch mit Rundungen in Form von Kreisen oder Halbkreisen eingebaut. Darüber hinaus können Verglasungen die (komplette) Wandbreite/-höhe einnehmen. Sie werden neben Fenstern auch in Türen eingebaut oder erstrecken sich über die gesamte Fassade/Wand. In den beschriebenen Realbrandversuchen variierten die gewählten Scheibenabmessungen. Je nach Größe wurden unterschiedliche Ergebnisse verzeichnet ( [17] [34] [35]). Die bei den Realbrandversuchen ermittelten Temperaturdifferenzen ΔT, die die Verglasungen zum Zerspringen brachten, nahmen mit der Größe der Glasfläche zu. Dies bedeutet anders ausgedrückt, dass kleinere Glasscheiben im Vergleich zu größeren Abmessungen bei geringeren Temperaturdifferenzen versagen. [17]







Abbildung 3-14: Bodentiefe Fenster inklusive Tür in Fassade [39]

Abbildung 3-15: Rechteckige Fenster [40]

Abbildung 3-16: Verglaste Fassade, Frankfurt [41]

#### Einflussparameter 2: Fensteranordnung im Raum

Aus den Versagenskriterien geht hervor, dass die Temperatur der Heißgasschicht sowie die Wärmestrahlung eine Erwärmung der Fensterscheibe hervorbringt. Da heiße Luft eine geringere Dichte als kalte Luft besitzt und deshalb leichter ist, steigt sie auf. [42] Bei einem Brand steigen die heißen Rauchgase also nach oben, es bildet sich im oberen Teil des Raumes direkt unter der Decke die Heißgasschicht (Hot Zone) aus. Im bodennahen Bereich bildet sich hingegen die Kaltgasschicht (Cold Zone) aus (siehe Abbildung 3-17). Je nach Fensteranordnung erfahren die Verglasungen unterschiedliche thermische Belastungen. Es lässt sich ableiten, dass bei einem Brand bodennah angeordnete Fenster einer geringeren thermischen Belastung ausgesetzt sind als Verglasungen, die sich in Deckennähe befinden. Enorme Unterschiede sind außerdem zwischen Horizontal- und Vertikalverglasungen zu erwarten. Zur Begrenzung des Umfangs dieser Arbeit und aufgrund der bisher vorgestellten Realbrandversuche, wird in Absprache mit den Betreuern der Fokus auf die Vertikalverglasungen gerichtet.



Abbildung 3-17: Ausbildung der Heiß- und Kaltgaszone in einem Brandraum mit Vertikalverglasungen [43]

# **Einflussparameter 3**: Glasart (Thermische Vorspannung, Temperaturwechselbeständigkeit) [28] Die thermische Belastung bei einem Brand führt je nach eingebauter Verglasung zu verschiedenen Temperaturunterschieden/-extremen innerhalb der Scheibe. Generell hängt das Bruchbild (Struktur und Größe der Bruchstücke) von der im Glas gespeicherten Energie ab: Je größer die Energie, also je größer die induzierte Vorspannung im Glas ist, desto kleiner sind die Bruchstück-

größen. [28]

### Einflussparameter 4: Glasstärke (-dicke) [29] [35]

Das Bruchbild wird mit zunehmender Scheibendicke gröber [29]. Das bedeutet wiederum, dass die Ventilationsöffnung je nach verwendeter Glasstärke bei einem teilweisen Herausfallen unterschiedlich groß ausfallen können und die Branddynamik infolge dessen unterschiedlich stark beeinflusst wird.

### Einflussparameter 5: Rahmenkonstruktion/Einbausituation [17] [26] [35]

Die Literaturrecherche ergab, dass der Randbereich bei Scheiben unter thermischer Belastung im Vergleich zum Scheibeninneren deutlich kühler bleibt. Dies führt wiederum zu Zugspannungen im Randbereich und Druckspannungen in der Mitte der Scheibe. Die geringere Temperatur ist auf die Rahmenkonstruktion zurückzuführen, weshalb die Glasscheibe bei einem Bruch auch die ersten Risse im Randbereich erfährt. [17] Die durch die Rahmenkonstruktion hervorgerufenen zusätzlichen Zugspannungen und die gleichzeitige Behinderung der Materialausdehnung, die durch die Einspannung zu verzeichnen ist, führen bei eingebauten Glasscheiben (Fensterglas) deutlich schneller zu einem Glasbruch als bei Glasscheiben im nicht eingebauten Zustand. [26]

Da die Rahmenkonstruktion die Glasscheibe im Randbereich kühler bleiben lässt, haben die Wechselwirkungen zwischen der Einbausituation und den Rahmeneigenschaften, wie beispielsweise der Größe, dem Material oder den Dichtungen einen Einfluss auf das Glasbruchverhalten. Holzrahmen besitzen beispielsweise eine geringere Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Kunststoffrahmen. Der Randbereich wird im Brandfall entsprechend unterschiedlich stark kühl gehalten. Darüber hinaus erfahren Rahmenkonstruktionen mit geringerer Wärmeleitfähigkeit verminderte Festigkeitseinbußen, was sich wiederum günstig auf den Erhalt der Glasscheibe auswirkt. [17]

#### Einflussparameter 6: Umfassungsbauteile [18] [34]

Die Wärmeleitfähigkeit bzw. die Wärmedämmung der Umfassungsbauteile haben Einfluss auf die Temperaturentwicklung bei einem Brand und somit auch auf die Erwärmung der Glasflächen. Verglasungen geben beispielsweise viel Wärme ab, während Holz und Leichtbeton einen geringen Wärmeabfluss zu verzeichnen haben. [18] Das bedeutet, dass die durch das Feuer entstehende und aufsteigende Wärme im Raum von den Baustoffen der tragenden Bauteile abhängt. Sie bestimmen in erster Linie, wieviel Wärme nach außen abgegeben und wie schnell der Brandraum aufgeheizt wird. [34]

## **Einflussparameter 7**: Aufheizgeschwindigkeit (Brandquelle, Beanspruchungstemperaturzeitkurve) [17] [36]

Schließlich ist noch die Aufheizgeschwindigkeit im Brandraum als Einflussparameter zu nennen, die die Glasscheibe durch Wärmestrahlung thermisch belastet und dessen Tragfähigkeit je nach einwirkender Dauer unterschiedlich stark beeinträchtigt wird. Langanhaltenden Belastungen kann Glas schlechter widerstehen als kurzfristig auftretenden [17]. Die Aufheizgeschwindigkeit ist zu einem großen Teil von der Brandquelle abhängig. Je größer die Dimensionen des Brandherds sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Glasscheibe. [36] Zugleich spielt die Größe des Brandraumes eine Rolle. Je kleiner der Brandraum ist, desto schneller bildet sich eine dicke Heißgasschicht aus, die wiederum schneller die Scheibenfläche einnehmen kann. Für die Simulation kann je nach verwendeter Beanspruchungstemperaturzeitkurve die Aufheizgeschwindigkeit im Brandraum variieren. Im Gegensatz zur Einheitstemperaturzeitkurven (ETK), dessen Temperaturverlauf stetig zunimmt und somit keinen realen Brandverlauf abbildet, wird bei Naturbrandkurven die Brandquelle individuell berücksichtigt. Die Aufheizgeschwindigkeit im Brandraum wird hier realitätsnah abgebildet. [44]

## **4** ANSÄTZE ZUR MODELLIERUNG DES GLASBRUCHVERHALTENS

## 4.1 ALLGEMEINES

Im nächsten Schritt dieser Arbeit gilt es die für die Brandsimulation notwendigen Modellierungsansätze kennenzulernen. Das Herausfallen der Verglasung infolge Brandeinwirkung kann auf unterschiedliche Arten modelliert werden. Damit ein für diese Arbeit geeigneter Modellierungsansatz gewählt werden kann, soll dieses Kapitel vorab fundamentale Fragestellungen, die eine Simulation allgemein umfassend nachhaltig beeinflussen, diskutieren:

- Wie kann das Herausfallen einer Verglasung infolge Brandeinwirkung möglichst realitätsnah abgebildet werden?
- Wie sollten die Verglasung bzw. das Fenster beim Herausfallen in verschwindende Elemente unterteilt werden?
- Welche Auswirkungen hat eine detailgetreue Simulation des Brandversuches auf den Programmier- und Rechenaufwand sowie auf die Auswertung? Wie lässt sich dieser minimieren bei gleichzeitiger Berücksichtigung essenzieller Parameter? Welche Parameter sollen wo gemessen werden?
- Was sind mögliche Gründe numerischer Instabilitäten? Welche Maßnahmen können getroffen werden, um diese zu vermeiden?

Die Beantwortung der Fragen wird in dem nachfolgenden Kapitel 4.2 vorgestellt. Abschließend wird ein bereits durchgeführter Modellierungsansatz kurz vorgestellt und hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für diese Arbeit bewertet.

## 4.2 MODELLIERUNGSANSÄTZE VON GLASBRUCH

#### Realitätsnahe Abbildung

Um das Herausfallen einer Verglasung infolge Brandeinwirkung möglichst realitätsnah abbilden zu können, sollten möglichst viele Eingangsgrößen, die die Glasscheibe, den Brandverlauf und die Umgebungsbedingungen definieren, im Voraus festgelegt werden. Bei der Modellierung von Verglasungen können verschiedene Eigenschaften (geometrisch, thermophysikalisch) dafür hinterlegt werden. Je detailgetreuer die Modellierung jedoch aufgebaut wird, desto größer ist folglich auch der Aufwand hinsichtlich der Programmierung, der Berechnung und der Auswertung. An dieser Stelle wird auf die Versagenskriterien und Einflussparameter aus Kapitel 3.4 verwiesen. Auf sie sollte bei einer Modellierung möglichst nicht verzichtet werden, da sie die Ergebnisse der Simulation nachhaltig beeinflussen. Es bedarf dementsprechend einer vorherigen Abwägung, welchen Eingangsgrößen in Abhängigkeit der individuellen Situation ein besonderer Stellenwert zugeschrieben werden soll und auf welche Details ggf. verzichtet werden sollte.

#### Herausfallen/Versagensmechanismus

Der Mechanismus des Herausfallens selbst ist von der Art der Verglasung abhängig. Einscheiben-Sicherheitsglas zerfällt beispielsweise immer in viele einzelne kleine Scherben und versagt dadurch komplett über seine gesamten Abmessungen. [5] [7] Bei der Modellierung würde hier eine verschlossene Öffnung in eine freie Öffnung direkt übergehen. Auch wenn sich die durch Brandbeanspruchung induzierten Risse zuerst im Randbereich der Fensterscheibe bilden, ist die Scheibenmitte als schwächster Bereich anzusehen. Aus diesem Grund fallen üblicherweise auch in Scheibenmitte die ersten Teile der Verglasung heraus, während der Randbereich seine Tragfähigkeit weitestgehend behält und von der Rahmenkonstruktion gehalten wird. Beim Floatglas treten zunächst rissige Glasinseln auf, die beim Lösen aus der Fensterfläche den Versagensbeginn der Verglasung einleiten. Die größten Rissinseln treten dabei mittig der Glasscheibe auf. [38] Fallen sie heraus, erfährt die Branddynamik ihre größte Änderung. Im Vergleich zu ESG muss das Herausfallen von Floatglas entsprechend anders abgebildet werden. Hier würde die Umwandlung einzelner benachbarter Zellen in Öffnungen eine realitätsnähere Abbildung liefern. Je nach Detaillierungsgrad kann der Versagensmechanismus auf die in Tabelle 4-1 aufgezeigten Weisen modelliert werden.

Versagensmechanismus		Vorteile	Nachteile		
es Herausfallen	- 1 - Ab einer vom Benutzer defi- nierten kritischen Tempera- turdifferenz an der Glasober- fläche versagt die Verglasung bei dessen Überschreiten voll- ständig, d. h. die Verglasung bricht und fällt komplett her- aus.	<ul> <li>Realitätsnahe Abbildung von Einscheiben-Sicher- heitsglas</li> <li>Das Versagenskriterium ,Temperaturdifferenz' wird berücksichtigt</li> </ul>	<ul> <li>In der Realität entstehen zunächst Risse (kein soforti- ges Herausfallen)</li> </ul>		
Komplett	- 2 - Das Fensterglas bricht ent- sprechend ab einem vom Be- nutzer angegebenen Tempe- raturwert der Heißgasschicht und fällt komplett heraus. [45]	<ul> <li>Einfache und schnelle Im- plementierung</li> <li>Geringerer Rechenaufwand</li> </ul>	<ul> <li>Berücksichtigt weder das Versagenskriterium ,Tem- peraturdifferenz' noch die Oberflächentemperatur der Verglasung → sehr vereinfachte An- nahme</li> </ul>		
ises Herausfallen	- 3 - Das Fensterglas wird vertikal unterteilt. Es bricht und fällt in mehreren Schritten (z. B. gedrittelt und von oben be- ginnend) bei Überschreiten der kritischen Temperaturdif- ferenz an der Glasoberfläche in dem jeweiligen Bereich her- aus.	<ul> <li>Detailliertere, realitätsnähere Betrachtung</li> <li>Das Versagenskriterium ,Temperaturdifferenz' wird berücksichtigt</li> </ul>	<ul> <li>Aufwendigere Implementierung</li> <li>Erhöhter Rechenaufwand</li> <li>Für ESG zu aufwendig (versagt stets komplett über die gesamte Fläche)</li> <li>→ gesamtheitliche Betrachtung der Glasscheibe statt Unterteilung</li> </ul>		
Stückwe	- <b>4</b> - Jede Zelle bricht und fällt ein- zeln bei Überschreiten des vom Benutzer vorgegebenen Temperaturwertes an der Glasoberfläche heraus.	<ul> <li>Gute Abbildung für Ver- bundsicherheitsglas         <ul> <li>→ die im VSG verwendete</li> <li>PVB-Folie löst sich ab einer</li> <li>bestimmten Temperatur</li> <li>und bewirkt ein späteres</li> <li>Herausfallen von Glasteilen</li> </ul> </li> </ul>	<ul> <li>Berücksichtigt nicht das Versagenskriterium ,Tem- peraturdifferenz' → vereinfachte Annahme</li> <li>Aufwendigere Implementie- rung</li> <li>Erhöhter Rechenaufwand</li> </ul>		

Tabelle 4-1: Modellierungsansätze für die Versagensmechanismen der Glasscheibe

4. Ansätze zur Modellierung des Glasbruchverhaltens

Versagensmechanismus		Vorteile	Nachteile	
Stückweises Herausfallen	- 5 - Jede Zelle bricht und fällt ein- zeln bei Überschreiten be- stimmter vom Benutzer vor- gegebenen Werte der Heiß- gasschicht heraus. [45]		<ul> <li>Berücksichtigt weder das Versagenskriterium ,Tem- peraturdifferenz' noch die Oberflächentemperatur der Verglasung → sehr vereinfachte An- nahme</li> <li>Aufwendigere Implementie- rung</li> <li>Erhöhter Rechenaufwand</li> </ul>	

Es ist zu erkennen, dass die Modellierung eines kompletten Herausfallens für Einscheiben-Sicherheitsglas eine realitätsnahe Abbildung bildet. Dies sollte auf Grundlage von Temperaturdifferenzen geschehen (Versagensmechanismus 1). Das stückweise Herausfallen in Form von vertikaler Unterteilungen stellt wiederum für andere Verglasungen, wie einfaches Floatglas oder das in 2-fach Isolierverglasungen verwendete Floatglas, eine geeignete Modellierung dar. Auch hier sollten Temperaturdifferenzen an der Glasoberfläche der ausschlaggebende Faktor sein (Versagensmechanismus 3). Da Verbundsicherheitsglas bei einem Bruch nicht direkt aus der Rahmenkonstruktion fällt, ist hier das Augenmerk auf die PVB-Folie zu legen, die die Glasscheiben zusammenhält. Aufgrund dessen kann für die Modellierung vereinfacht eine kritische Grenztemperatur an der Oberfläche der Scheibe festgelegt werden, die repräsentativ für das Verbundversagen von Folie und Scheibe steht und bei Überschreiten ein Herausfallen bewirkt (Versagensmechanismus 4).

#### **Programmier- und Rechenaufwand**

Brandsimulationen können auf Grundlage von Feldmodellen stattfinden. Diese werden üblicherweise mithilfe von einem dreidimensionalen Rechengitter mit rechtwinkliger Gitterstruktur erstellt. Das abzubildende Gebäude oder der zu untersuchende Brandraum werden in ihm konstruiert. [46] Die Anzahl der Rechenzellen und die mit ihr einhergehende Zellgröße beeinflussen die Rechenzeit erheblich. Je kleiner die Zellgröße ist, desto mehr Rechenzellen bilden den Brandraum bzw. das abzubildende Gebäude ab und desto detailgetreuer kann der Brandverlauf hinsichtlich Strömungsverhältnissen und Temperaturgradienten berechnet werden. Durch eine beschränkte Dateiausgabe der physikalischen Größen wie beispielsweise der Temperatur, der Strömungsverhältnisse oder der Rußkonzentration kann der Rechenaufwand ebenfalls minimiert werden. [47]

#### Adiabatic Surface Temperature

Die Temperaturerwärmung in Glasscheiben findet aufgrund von Konvektion und Strahlung (aus Heißgasschicht und Flamme) statt. Die Adiabatic Surface Temperature, kurz AST (deutsch: adiabatische Oberflächentemperatur), beschreibt die thermische Belastung einer Oberfläche und berücksichtigt sowohl die konvektiven als auch radiativen Anteile des Nettowärmestroms. Anders formuliert werden die aus einem Brandmodell prognostizierten Wärmeströme in eine effektive Brandtemperatur umgewandelt. So lässt sich ohne größere Änderungen das Brandmodell mit dem thermischen/strukturellen Modell kombinieren, wodurch die Adiabatic Surface Temperature einfach zu bestimmen ist. Numerisch betrachtet eliminiert sie den Nettowärmestrom, der die Oberflächentemperatur beeinflusst. Dadurch kann wiederum der Rechenaufwand minimiert werden, da eine geringere Datenmenge verarbeitet werden muss. Die Wärmestrahlung hat im Bereich der Heißgasschicht kaum einen Einfluss auf die AST. Da die größten Temperaturunterschiede in der Scheibe im oberen schattierten Randbereich auftreten und ein Versagen der Glasscheibe einleiten, kann die AST daher vereinfacht zur Ermittlung der Bauteiltemperatur verwendet werden. [48]

#### Messstellen

Für die Messung der Temperaturen während der Simulation werden Thermoelemente angeordnet. Bei der Fensterscheibe kann eine vertikale Unterteilung in zwei oder drei Bereiche sinnvoll sein. In jedem Teilbereich kann dann wiederum ein Thermoelement mittig angeordnet werden, um die Temperatur in diesem Bereich während des Brandes überwachen zu können. In jedem Fall sollte die Temperatur im oberen Teil der Scheibe kontrolliert werden. Hier sind die heißesten Temperaturen zu verzeichnen. Zudem ist darauf zu achten, die Messstellen möglichst im Randbereich zu positionieren. Die durch die Rahmenkonstruktion hervorgerufenen schattigen Randbereiche vergrößern die Temperaturunterschiede in der Glasscheibe beträchtlich. Je mehr Thermoelemente jedoch angeordnet werden, desto größer ist der Rechenaufwand und desto mehr Ergebnisse werden am Schluss geliefert, die wiederum einer Auswertung unterzogen werden müssen. Ihre Anordnung und Anzahl sollten deshalb sorgfältig überlegt werden.

#### Numerische Instabilitäten

Numerische Instabilitäten können u. a. auftreten, wenn eine ungünstige Gitterstruktur gewählt wurde. Wird das Seitenverhältnis der Zellen von 1:1,5 überschritten, können Programmabstürze oder andere Schwächen bei der Modellierung entstehen. Eine quadratische Gitterstruktur beugt numerischen Instabilitäten vor und wirkt sich darüber hinaus positiv auf den Rechenaufwand aus. [47]

#### Modellierungsansatz von Kang

Da das Herausfallen einer Glasscheibe i. d. R. nach einer bestimmten Rissanzahl geschieht, kann dies bei der Simulation berücksichtigt werden. Kang [19] hat im Jahre 2008 für seine Brandsimulation dafür zuerst die Bruchspannung bestimmt, die bei Überschreiten der maximal zulässigen Bruchspannung zu einem Glasbruch führt. Diese berücksichtigt u. a. die Abmessungen (halbe Höhe und Dicke) der Scheibe. Während der Simulation wird dafür die gemittelte Temperatur der Glasscheibe (über die Vorder- und Rückseite) bestimmt. Die Differenz der gemittelten Glastemperatur und der Umgebungstemperatur wird dann mit der zulässigen Temperaturdifferenz verglichen. Wird die maximal zulässige Temperaturdifferenz überschritten, kommt es zu einem Glasbruch. Mit jedem Glasbruch wird die feste Zelle mit der maximalen Temperatur identifiziert und entfernt. Dies erzeugt eine kleine Öffnung und nähert den Verlust infolge eines Glasbruches an. Überschreitet wiederum die auftretende Rissanzahl die maximal erträgliche Rissanzahl, fällt die gesamte Glasscheibe heraus. [19]

Dieser Modellierungsansatz berücksichtigt zwar eine kritische Temperaturdifferenz, betrachtet diese jedoch nicht innerhalb der Glasscheibe. Da Temperaturextreme in der Verglasung selbst die Ursache für Risse und einem daraus resultierenden Herausfallen sind, wird die Modellierung von Kang als nicht besonders realitätsnah und aussagekräftig eingestuft. Dennoch kann sein Ansatz, die Glasscheibe nach einer bestimmten Rissanzahl versagen zu lassen, für die eigene Brandsimulation in Kapitel 5 adaptiert werden.

## 5 BRANDSIMULATIONEN MIT DEM CFD-MODELL FDS

## 5.1 ALLGEMEINES ÜBER , FIRE DYNAMICS SIMULATOR' (FDS)

Brandsimulationen werden häufig mit Feldmodellen, den sogenannten CFD-Modellen (,Computational Fluid Dynamics') durchgeführt. Im Gegensatz zu Zonenmodellen können die physikalischen Größen (wie beispielsweise die Temperatur) in Feldmodellen beliebig viele Werte über die Höhe des betrachteten Raumes annehmen. Dadurch kann eine deutlich präzisere Abbildung dieser Größen erfolgen. Für die vorliegende Arbeit wird die Software ,Fire Dynamics Simulator', kurz FDS, in der zu diesem Zeitpunkt aktuell neusten verfügbaren Version FDS 6 (Stand: 12.06.2019) verwendet. Dieses Simulationsprogramm wurde vom ,National Institute of Standards and Technology' (NIST) entwickelt und ist auf deren Website frei zugänglich. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es für die Eingabe keine klassische graphische Benutzeroberfläche gibt. Stattdessen dient eine Text-Datei (Quellcode) als Eingabe-Input. Des Weiteren können Geometrien in FDS lediglich in einem kartesischen Koordinatensystem in dreidimensionaler und rechtwinkliger Form simuliert werden. [49] [50] Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die physikalischen Berechnungen durch parallele Zellwände hohen Genauigkeiten unterliegen und die Erhaltungssätze erfüllt werden. [51] Für eine benutzerfreundlichere Modellierung und der einhergehenden Minimierung des Programmieraufwands wird in dieser Arbeit die graphische Benutzeroberfläche ,PyroSim' verwendet.

## 5.2 ZIELSETZUNG

Das primäre Ziel der Brandsimulationen ist es, herauszufinden, inwieweit die Ergebnisse von Xie et al. in einer Simulation reproduziert werden können. Dazu soll eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Realbrandversuche hergestellt werden. Die Berücksichtigung bestimmter Kriterien und Parameter für das Glasbruchverhalten liefert Ergebnisse, welche dann mit denen von Xie et al. verglichen werden. Anschließend erfolgt eine Sensitivitätsanalyse, die den Einfluss der in Kapitel 3.4 aufgestellten Einflussparameter auf die Ergebnisse aufzeigen soll.

In einer ersten Distanz gilt es daher zu prüfen, ob sich die Temperaturen aus den Realbrandversuchen mit den Temperaturen aus der Simulation decken. Ist dies der Fall, ist darüber hinaus folgendes zu untersuchen: Treten die in der Literatur angegebenen kritischen Temperaturdifferenzen (zwischen Rahmenkonstruktion und Verglasung) in gleichem Maße bei den numerischen Versuchen auf? Versagen die gleichen Glasscheiben in den numerischen Versuchen, die im Realbrand aufgrund der thermischen Beanspruchungen herausfielen?

Im Zuge der Auswertung (Kapitel 6) werden bei der Analyse der Simulationsergebnisse diese Fragen geklärt.

## 5.3 REFERENZBRAND

Auf Grundlage der gewonnenen, theoretischen Erkenntnisse aus der Literaturrecherche soll die Brandsimulation nun durchgeführt werden. Dafür ist im Voraus ein geeigneter Testraum für die Simulationen zu erstellen. Dieser sollte zum einen hinsichtlich der geometrischen Parameter möglichst realitätsnah dimensioniert werden und gleichzeitig reproduzierbare Ergebnisse liefern, die wiederum mit den vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur zu vergleichen sind. Die Simulationen werden unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.4 aufgeführten Einflussparameter durchgeführt. So ist neben der Anzahl, Größe, Anordnung und Art der Fenster inklusive Rahmenkonstruktion auch die Brandquelle von großer Bedeutung.

In Tabelle 5-1 werden die vorgestellten Versuche aus Kapitel 3.3 hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der FDS-Simulation (Referenzbrand) bewertet.

Experimentelle Untersuchung	Bewertung		
Hietaniemi (2005)	→ berücksichtigt keine Wärmestrahlung, lediglich die Temperatur der Heißgasschicht		
	→ Durchführung im Testraum nach ISO 9705, daher gute Vergleichbarkeit		
Xie et al. (2008)	<ul> <li>Einscheiben-Sicherheitsglas unterschiedlicher Stärke</li> </ul>		
	Dimension des Poolfeuers variiert		
	• Protokollierte Ergebnisse der Pool Brand Abmes- sungen von 800 x 800 mm sowie 900 x 900 mm		

Tabelle 5-1: Bewertung der Versuche aus Kapitel 3.3 hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit den FDS-Ergebnissen

Experimentelle Untersuchung	Bewertung
	→ Durchführung in keinem verschlossenen Raum, zudem wird als Wärmequelle eine Strahlwand verwendet
Kunkelmann (2013)	→ untersucht u. a. Verbundsicherheitsglas, welches nicht garantiert beim Versagen auch herausfällt und neue Ven- tilationsöffnungen schafft
Babrauskas (2016)	→ führt keine eigenen Versuche durch, zeigt jedoch an- schaulich Einflussparameter auf
Harada et al. (2017)	→ berücksichtigt in seinen Versuchen die Komponente ,Wind', die für diese Arbeit jedoch nicht berücksichtigt wird
Chen et al. (2017)	ightarrow als Wärmequelle dient eine Hitzebox auf Höhe der Verglasung $ ightarrow$ die Brandquelle ist nicht realitätsnah

Als Basis der Brandsimulation wird der Realbrandversuch von Xie et al. (vgl. 3.3.2) dienen. Der Grund hierfür ist die gute Grundlage, die die Realbrandversuche für den späteren Vergleich und die Validierung der Simulation bieten. Die Untersuchungen von Xie et al. wurden in einem Testraum nach der ISO 9705 durchgeführt. Die Eingangswerte sind daher bekannt und können aus der Norm entnommen werden. Die Ergebnisse wurden für die Simulationen mit den beiden größten Pool Brand Abmessungen in Diagrammen protokoliert, wodurch sich die Auswertung der Simulationsergebnisse durch einen direkten Vergleich sehr gut realisieren lässt.

## 5.4 TESTRAUM

### 5.4.1 RAUMGEOMETRIE UND MATERIALEIGENSCHAFTEN

Der Testraum nach der ISO 9705 [52] besitzt eine simple Raumgeometrie mit den lichten Abmessungen 3,60 m x 2,40 m x 2,40 m (L x B x H) und einer 2,00 m hohen und 0,80 m breiten offenen Tür. Für die Brandsimulation werden darüber hinaus – wie auch bei den Realbrandversuchen – drei Fenster auf der von der Tür aus befindlichen linken Wandfläche angeordnet (Abbildung 5-1). Die Verglasungen werden von Holzrahmen gehalten, die durch ihre Einfassung den Randbereich der Glasscheibe verschatten (Abbildung 5-2, orange).



Abbildung 5-1: In FDS erstellter Testraum in Anlehnung an die ISO 9705



Abbildung 5-2: Frontansicht des Testraumes inkl. Nummerierung der Glasscheiben

Den mit FDS erzeugten Fensteraufbau zeigen die in Abbildung 5-3 dargestellten Schnitte durch das obere linke Fenster (Glasscheibe 1). Der Fensteraufbau wurde zur Minimierung des Implementieraufwandes vereinfacht konstruiert, indem u. a. auf eine Scheibeneinfassung und einen Scheibeneinstand verzichtet wurde. Damit geht auch eine unwesentliche Verringerung der Glasabmessungen einher, die als vernachlässigbar klein angenommen wird.



Abbildung 5-3: Fensteraufbau, Schnitt durch Fenster 1 (grün: Schnittfläche)

Die Wände bestehen aus Beton. Als Isolierung dienen Keramikfaserplatten, die im Inneren des Raumes angebracht werden. Als Brandquelle werden 20 kg Dieselöl mittig des Raumes angeordnet. Ihre Masse bleibt in jedem Simulationsdurchlauf die gleiche, während die Pool Brand Fläche variiert. Die Eingangsparameter mit ihren jeweiligen Werten sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt. Die einzelnen Materialeigenschaften stammen aus einschlägigen Normen, Websites von Fachfirmen oder sind bereits in der Bibliothek von PyroSim standardmäßig hinterlegt. Bei Angaben verschiedener Werte sind geeignete Mittelwerte angenommen worden.

Eingangsparameter							
Raumgeometrie (lichte Maße)							
Länge: 3,60 m Breite: 2,40 m				Höhe	: 2,40 m		
		Öffnu	ngen (lichte N	1aße)			
	-					Fenster	
	•	ur	1			2	3
Breite:				0,80	m		
Höhe:	2,0	0 m				0,83 m	
Dicke:		-			6 m	m bzw. 10 mm	
			Materialien				
<b>Beton</b> (Wände, Decke, Bo-	<ul> <li>Dicke: 210 mm</li> <li>Dichte: 2400,0 kg/m<sup>3</sup></li> </ul>		• S • E	<ul> <li>Spezifische Wärme: 1,0 kJ/(kg·K)</li> <li>Emissiviät: 0,9</li> </ul>			
den)				• A	• Absorptionskoeffizient: 5,0·10 <sup>4</sup> 1/m		
Keramikfaserplatte <sup>1</sup> (Isolierung)	<ul><li>Dicke</li><li>Dicht</li></ul>	<ul> <li>Dicke: 20 mm</li> <li>Dichte: 300,0 kg/m<sup>3</sup></li> </ul>		• S • E • A	<ul> <li>Spezifische Wärme: 1,13 kJ/(kg·K)</li> <li>Emissiviät: 0,97</li> <li>Absorptionskoeffizient: 5,0·10<sup>4</sup> 1/m</li> </ul>		
Holz² (Fensterrahmen)	<ul><li>Breite</li><li>Dicke</li><li>Dicht</li></ul>	eite: 20mm cke: 20mm chte: 640,0 kg/m <sup>3</sup>		• S • E • A	pezi miss Abso	fische Wärme: 2 siviät: 0,9 rptionskoeffizier	2,85 kJ/(kg·K) nt: 5,0·10⁴ 1/m
Einscheiben- Sicherheitsglas <sup>3</sup> (Verglasung)	<ul><li>Dicke</li><li>Dicht</li></ul>	Dicke: 6 mm bzw. 10 mm Dichte: 2500,0 kg/m³		<ul> <li>S</li> <li>E</li> <li>A</li> <li>B</li> </ul>	ipezi imiss Nbsoi Bruch	fische Wärme: ( siviät: 0,837 rptionskoeffizie nspannung 130 l	),72 kJ/(kg·K) nt: 5,0·10⁴ 1/m MPa
<b>Dieselöl</b> (Brandquelle)	<ul> <li>Meng</li> <li>Anor mes</li> </ul>	Menge: 20 kg Anordnung: Mittig des Rau- mes		• (* 5 8	6röß 640 x 800 x	en [mm x mm]: 540, 600 x 600, 800, 900 x 900	. 700 x 700,
	Messste	llen (AST: A	Adiabatic Surf	ace Te	mpe	eratures)	
ESG	<ul><li>Mitti</li><li>Mitti</li></ul>	g auf dem f g im Randb	Rahmen (alle v ereich nahe d	vier Se es Rah	iten) imer	ns (alle vier Seite	en)

#### Tabelle 5-2: Eingangsparameter für die Brandsimulation

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Gemäß Quelle [53]

Die Realbrandversuche liefern keine näheren Angaben zur verwendeten Holzart bei den Rahmen. Je nach Holz und Anstrich können sich diese unterschiedlich schnell erwärmen. Um den Einfluss einer Absorption möglichst gering zu halten, wird Fichtenholz (hellfarbig) gewählt und dessen Materialeigenschaften bei den Fensterrahmen hinterlegt. Die potenzielle Fehlerquelle, die durch diese Annahme hervorgeht und die Temperaturentwicklung beeinflusst, gilt es bei der späteren Auswertung zu berücksichtigen.

Die Bodenplatte schließt auf OKFF ±0,00 m ab, sodass die Wände ab OKFF ±0,00 m beginnen. Die Tür ist permanent geöffnet und dient der Ventilation.

#### 5.4.2 ZELLGITTER

Für die Erstellung des Testraumes muss außerdem das Zellgitter definiert werden. Jede Zelle des Gitters enthält wichtige und relevante Informationen über den Brandverlauf. Welche Informationen am Ende abgerufen werden sollen, kann für jeden Versuchsdurchlauf individuell festgelegt werden. Es wird darauf großen Wert gelegt, den Rechenzellen in jeder Dimension (x, y, z) dieselbe Größe zuzuordnen. Mit 5 cm Kantenlänge wird zunächst eine Testsimulation gestartet (Testraum 1), die aufgrund der vorhandenen Raumabmessungen (Breite und Höhe) getroffen wird. Für den Großteil sind die Maße ein Vielfaches der gewählten Zellgröße. Die dritte Dimension jedes Bauteils, d. h. die Dicke wird bei den Materialeigenschaften hinterlegt. Beispielsweise erstreckt sich die Keramikfaserplattendicke über eine Zelle, während in den Berechnungen die tatsächliche Dicke von 20 mm eingeht. Somit müssen allein die Breite sowie Höhe jedes Bauteils auf die Zellgröße abgestimmt werden. Schließen Bauteile nicht exakt auf der Zellkante ab, werden sie für die Brandsimulation vom Programm automatisch angepasst. Dabei werden die Werte entsprechend auf- bzw. abgerundet. Aufgrund dieser Programmeigenschaft wird ein zweiter Testraum mit einer verkleinerten Zellgröße von 2,5 cm angelegt, in dem der gleiche Brand simuliert wird (Testraum 2). Dadurch besteht die Möglichkeit, die Fensterabmessungen detailgetreuer abzubilden, da diese in den Realbrandversuchen 20 mm breit waren. Außerdem soll damit vorab getestet werden, in welchem Maße sich der Rechenaufwand erhöht, wenn im Bereich der Fenster die Zellgröße um das 8-fache ansteigt. Denn auch wenn die Darstellung präziser und dadurch für die Auswertung belastbarere Aussagen getroffen werden können, muss der Rechenaufwand in Relation zu der Fragestellung stehen. Für die beiden Testdurchläufe wurden die bei-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Gemäß Quelle [60]

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Gemäß DIN EN 572-1 Tab. 2

den Wände, die keine Öffnungen besitzen, direkt an den Rand des erstellten Zellkörpers positioniert. Zudem wird die Oberfläche des Zellgitters an dieser Stelle als geschlossen definiert. Somit ist dieser Bereich für Rauch und Strömungen blockiert, wodurch erneut irrelevante Rechenzeit eingespart werden kann. Zuletzt wird noch die obere linke Verglasung für die Testdurchläufe entfernt. Dies hat die Absicht etwaige Rauchgasströmungen aus dem Fenster und ihren Einfluss auf die Bauteilerwärmung zu untersuchen. Schließt diese nämlich zu dicht an der Außenwand des ISO Testraums ab, können auftretender Rauch und Gase nur eingeschränkt abströmen und einen Rückstau durch den Strömungswiderstand bewirken. Dies hätte wiederum Auswirkung auf die Temperaturentwicklung der Fenster. Tabelle 5-3 zeigt die Gegenüberstellung der beiden Testdurchläufe.

Zellgitter	5 cm (einheitlich)	5 cm u. 2,5 cm (kombiniert)	
Gesamtanzahl der Zellen	277.200	369.600	
Rechenzeit für 100 s Simulationsdauer	ca. 10 Std.	ca. 20 Std. 45 Min.	

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der beiden Testdurchläufe unterschiedlicher Zellgröße

Es ist zu erkennen, dass durch das feinere Zellgitter im Bereich der Fenster die Gesamtanzahl der Zellen um ca. 30 % zunimmt. Außerdem wirkt sich die detaillierte Auflösung überproportional auf die Rechenzeit aus. Bei der Simulation des feineren Zellgitters wird etwa die doppelte Rechenzeit benötigt, um 100 Sekunden Simulationsdauer zu berechnen. Andererseits ist anzumerken, dass der Fensterrahmen eine Breite von 20 mm besitzt. Durch eine Zellweite von 5 cm wird dieser in relativ großem Maße überdimensioniert, während die Verglasung unterdimensioniert wird. Letztlich soll die Temperaturdifferenz des Fensterrahmens und der Verglasung gegenübergestellt werden. Das feinere Zellgitter hätte dahingehend kaum eine Auswirkung. Der schmalere Rahmen würde eine um 2,5 cm versetzte Temperaturermittlung ausmachen. Dieser äußerst geringfügige Temperaturunterschied steht nicht in Relation mit dem erheblichen Mehraufwand hinsichtlich der Rechenzeit, weshalb für die Brandsimulationen das gröbere Zellgitter mit 5 cm ausgewählt wird.

Mit der Wahl des Zellgitters gehen die in Abbildung 5-4 dargestellten Fensterabmessungen einher.



Abbildung 5-4: Frontansicht mit Darstellung der Vermaßung [mm]

Hinsichtlich der Rauchgasströmungen, die aus dem oberen linken Fenster austreten, ist ein eindeutiger Impuls nach oben zu erkennen. Es findet kein Rückstau statt, sodass die Zellgitterwand an dieser Stelle sehr gut positioniert wurde und für die Brandsimulationen so beibehalten werden kann.

#### 5.4.3 WÄRMEFREISETZUNGSRATE

Da der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate (HRR: Heat Release Rate) von der Brandquelle (Dieselöl) in der Arbeit von Xie et al. nicht definiert wird, wurde für die zuvor beschriebenen Testdurchläufe (Kapitel 5.4.2) zunächst ein konstanter Wert angenommen und festgelegt. Für die eigentliche Brandsimulation ist jedoch eine detailliertere Angabe notwendig, die mithilfe anderer Versuche bzw. Erfahrungswerte aus der Literatur bestimmt werden kann. Der Artikel ,The Effect of Fuel Quantity and Location on Small Enclosure Fires' von Thomas et al., veröffentlicht im Jahr 2007, vergleicht verschiedene Wärmefreisetzungsraten von Bränden in einem ISO Testraum mit Bränden, die unmittelbar außerhalb des ISO Testraumes durchgeführt wurden (Abbildung 5-5) [53].



Abbildung 5-5: Versuchsaufbau Thomas et al. (2007) – Brand mittig (links), Brand außerhalb (rechts) [53]

Als Brandquelle diente Brennspiritus, mit einem Volumen von u. a. 20 L [53]. Zum Vergleich: Xie et al. nahmen 20 kg Dieselöl, was bei einer Dichte<sup>4</sup> von 0,83 kg/l umgerechnet ca. 24,1 L Dieselöl entspricht. Das nachstehende Ablaufdiagramm (Abbildung 5-6) zeigt, wie mithilfe dieses Artikels der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate von Dieselöl in dem Testraum nach ISO 9705 bestimmt werden kann.



Abbildung 5-6: Ablaufdiagramm zur Bestimmung der HRR für Dieselöl im Testraum nach ISO 9705

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Gemäß Quelle [62]

Die Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}$  von brennbaren Flüssigkeiten in offenen Wannen, dessen Durchmesser D > 0,20 m beträgt, kann mit der Gleichung (5.1) bestimmt werden [54] [55]:

$$Q = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_c \cdot \chi$$
 [kW] Gleichung (5.1)  
mit  $A_f$ : Fläche von nicht runden Brandquellen in m<sup>2</sup>  
 $\dot{m}''$ : Verlustrate der freien Verbrennungsrate in kg/(m<sup>2</sup>·s)  
 $\Delta H_c$ : vollständige Verbrennungswärme in kJ/kg  
 $\chi$ : Verbrennungseffektivität

Die Verbrennungseffektivität  $\chi$  ist das Verhältnis der effektiven Verbrennungswärme  $\Delta H_{c,eff}$  zu dem der vollständigen Verbrennungswärme  $\Delta H_c$ :  $\chi = \frac{\Delta H_{c,eff}}{\Delta H_c}$ . Wird diese Gleichung nach  $\Delta H_{c,eff} = \chi \cdot \Delta H_c$  umgestellt, berechnet sich die Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}$  wie folgt [56]:

$$\dot{Q} = A_f \cdot \dot{m}'' \cdot \Delta H_{c,eff}$$
 [kW] Gleichung (5.1a)

Die Fläche der Brandquelle  $A_f$  (zwei Wannen) berechnet sich wiederum zu:

$$A_f = 2 \cdot 0,81 \ m \cdot 0,70 \ m = 1,134 \ m^2$$

Die Verlustrate der freien Verbrennungsrate  $\dot{m}''$  wird nach Gleichung (5.2) bestimmt:

$$\dot{m}^{\prime\prime} = \dot{m}_{\infty}^{\prime\prime} \cdot \left(1 - e^{-k\beta D}\right) \qquad [kg/(m^2 \cdot s)] \qquad \qquad Gleichung (5.2)$$

mit  $\dot{m}_{\infty}^{\prime\prime}$ : maximale Verlustrate der freien Verbrennungsrate in kg/(m<sup>2</sup>·s)  $k\beta$ : Materialkonstante für flüssige Brennstoffe in m<sup>-1</sup> D: Durchmesser der Brandquelle in m

Der Durchmesser D lässt sich für Brandquellen, die keine runde Brandfläche besitzen, vereinfacht mit der Gleichung (5.3) ermitteln [57]. In dem vorliegenden Fall nach Thomas et al. ergibt sich der Durchmesser zu:

Der verwendete Brennspiritus besteht zu 97 % aus Ethanol [53]. Für die Verlustrate der freien Verbrennungsrate  $\dot{m}''$  von Ethanol werden in Abhängigkeit des Durchmessers verschiedene Werte angegeben. Besitzt die Brandfläche einen Durchmesser zwischen 0,60 m < D < 3,00 m, so liegt die Verlustrate bei<sup>5</sup>:

$$\dot{m}^{\prime\prime} = 0,022 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

Der Wert für die effektive Verbrennungswärme  $\Delta H_{c,eff}$  kann Tabellenwerken<sup>6</sup> entnommen werden.

Letztlich ergibt sich die Wärmefreisetzungsrate  $\dot{Q}$  von Brennspiritus nach Gleichung (5.1a) zu:

$$\dot{Q} = 1,134 \ m^2 \cdot 0,022 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot 26.800 \frac{kJ}{kg} \cong 668,61 \ kW$$

*Q* gibt in der Regel immer den Zeitpunkt an, wo die Wärmefreisetzungsrate ihren höchsten Wert erfährt (Peak). Wird der berechnete Wert nun mit dem Verlauf aus den Realbrandversuchen von Thomas et al. in Abbildung 5-7 verglichen, so ist zu erkennen, dass die errechnete maximale Wärmefreisetzungsrate dem Wert des mittig vom ISO Raum befindlichen Brandes (blaue Linie) gleicht. Diese erfährt zwischen der 500. und der 600. Sekunde ihren Peak bei 660 kW.



Abbildung 5-7: Berechnung des Faktors für außen- und innenbefindliche Brände

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Gemäß Seite 866 aus Quelle [63]

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Tabelle 3.2 aus Quelle [64]

Dieser Vergleich hat gezeigt, dass die händische Berechnung die Wärmefreisetzungsrate aus den Realbrandversuchen (mittig platziert) gut wiedergibt. Ein Korrekturfaktor ist daher nicht notwendig. Mit dem erlangten Wissensstand über die Wärmefreisetzungsrate von Ethanol-Pool-Bränden in einem ISO Testraum, wird nun  $\dot{Q}$  für Dieselöl gemäß der Gleichung (5.1a) bestimmt. Die Werte können anschließend in PyroSim hinterlegt werden, um die Brandsimulation durchzuführen. Beispielhaft werden nachfolgend die Berechnungen für den Pool-Brand der Abmessungen 540 mm x 540 mm aufgeführt. Eine Auflistung aller Wärmefreisetzungsraten inklusive der Höhe der Wanne zeigt Tabelle 5-4 und kann darüber hinaus dem Anhang entnommen werden.

Fläche der Brandquelle:

$$A_f = 0.54 \ m \cdot 0.54 \ m = 0.2916 \ m^2$$

Durchmesser der Brandquelle:

$$D = \left(\frac{4 \cdot A_f}{\pi}\right)^{1/2} = \left(\frac{4 \cdot 0.2916 \ m^2}{\pi}\right)^{1/2} \cong 0.61 \ m$$

Verlustrate der freien Verbrennungseffektivität<sup>7</sup>:

$$\dot{m}^{\prime\prime} = \dot{m}_{\infty}^{\prime\prime} \cdot \left(1 - e^{-k\beta D}\right) = 0.045 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \cdot \left(1 - e^{-2.1 \cdot 0.61 \, m}\right) \cong 0.033 \frac{kg}{m^2 \cdot s}$$

Wärmefreisetzungsrate:

$$\dot{Q} = A_f \cdot m'' \cdot \Delta H_{c,eff} = 0,2916 \, m^2 \cdot 0,033 \cdot 44.400 \frac{kJ}{kg} \cong 427,25 \, kW$$

Tabelle 5-4: Wärmefreisetzungsraten von Dieselöl in Abhängigkeit der Fläche der Brandquelle mit Angebe der Wannenhöhe

Fläche der Brandquelle $A_f$	Wannenhö	öhe <i>h</i>	Wärmefreisetzungsrate Q	
, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	Gefüllter Bereich	gewählt		
540 mm x 540 mm = 0,2916 m²	8,23 cm	10,00 cm	427,25 kW	
600 mm x 600 mm = 0,3600 m²	6,67 cm	8,50 cm	559,44 kW	
700 mm x 700 mm = 0,4900 m²	5,00 cm	7,00 cm	804,97 kW	
800 mm x 800 mm = 0,6400 m²	3,75 cm	5,50 cm	1108,22 kW	
900 mm x 900 mm = 0,8100 m²	3,00 cm	5,00 cm	1438,66 kW	

 $<sup>^{7}\</sup>dot{m}_{\infty}^{\prime\prime}$  und  $k\beta$  gemäß Tabelle 3-4 aus Quelle [56]

Um den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate (inklusive Zeitpunkt des Peaks) von Dieselöl im ISO Raum abzubilden, werden die Informationen des Ethanol-Pool-Brandes von Thomas et al. vereinfacht adaptiert. Begründet wird dies durch die ähnlichen Randbedingungen hinsichtlich der Raumgeometrie (ISO Testraum) und der Menge der Brandquelle (20 L bzw. 24,1 L). So steigt  $\dot{Q}$  bis zur 600. Sekunde mit einem beschränkten Wachstum an und fällt anschließend innerhalb kurzer Zeit auf eine geringe Wärmefreisetzungsrate ab. In der 1400. Sekunde wird die Nullstelle erreicht (Abbildung 5-8). Es ist bekannt, dass mit zunehmender Poolfläche bei gleichbleibender Brandgutmenge die Wärmefreisetzungsrate steiler ansteigt und schneller sein Peak erreicht. Diese Vereinfachung wird bei der späteren Auswertung berücksichtigt.



Abbildung 5-8: Verlauf der Wärmefreisetzungsraten von Ethanol und Dieselöl

#### 5.4.4 AUSWERTEEBENEN

Für die Brandsimulationen müssen nach Hinterlegung der Eingangsparameter für die Raumgeometrie und der einzelnen Materialien noch die Attribute, die nach Durchlauf der Simulation ausgewertet werden sollen, definiert werden. Zur Bestimmung der Temperaturen und deren Differenzen wird die adiabatische Oberflächentemperatur (AST), die in Kapitel 4.2 bereits beschrieben wurde, herangezogen. Diese berücksichtigt nicht nur die konvektive Temperatur (der Heißgasschicht), sondern auch die Wärmestrahlung, die die Glasscheiben ebenso erwärmen lässt [48]. Gemäß des Realbrandversuches werden an jeder Scheibe acht Messstellen angeordnet, vier auf dem Holzrahmen und die übrigen vier auf der Glasscheibe (Kennzeichnung "A" bis "N",) – wie Abbildung 5-9 zeigt. Wie zuvor erwähnt stellt die schraffierte Fläche den Rahmen und damit den schattierten Bereich dar. Die Anzahl der AST-Elemente reicht über das notwenige Maß für die Erfassung der Temperaturunterschiede hinaus, wird jedoch aufgrund der besseren Validierung der Simulation in dieser Form hinterlegt. Dabei ist es wichtig, die richtige Anordnung mit der entsprechenden Blickrichtung zu berücksichtigen. AST-Elemente dürfen nicht direkt auf der Kante oder Ecke der Zelle angeordnet werden, da das Programm selbst nicht erkennt, welche der angrenzenden Zellen letztlich als Informationsquelle dienen sollen. Deshalb werden sie möglichst mittig der Zelle positioniert. Dabei muss die Blickrichtung stets vom Bauteil aus weg zeigen, was über die Einstellungen hinterlegt werden kann.



Abbildung 5-9: Anordnung der Temperatur-Messelemente für die Verglasung [36]

Ein für die Erfassung der Temperaturdifferenzen zwischen Rahmen und Glasscheibe äußerst essenzieller Befehl ist derjenige, der bei Überschreiten der kritischen Temperaturdifferenz die dazugehörige Glasscheibe entfernt (= Herausfallen). Im Quellcode ist hinter jedem AST-Element folgende Implementierung vorzunehmen (hier beispielhaft für die Messstelle ,A'):

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_A', XYZ=1.,0.5,2., SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_A', INITIAL\_STATE=.TRUE./ &CTRL ID='DeltaT\_A', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='AST\_A\_v', 'AST\_A\_r'/

Der Kontrollbefehl *"&CTRL*' ermittelt während der gesamten Simulationsdauer die Differenz zweier Messpunkte (hier '*AST\_A\_v*' und '*AST\_A\_r*', mit v: Verglasung und r: Rahmen). Dies geschieht wiederum über die Funktion *"SUBTRACT*', zu Deutsch *"*subtrahieren'. Die ermittelte Temperaturdifferenz wird aufgezeichnet (*ID='Temperaturdifferenz\_A'*) und mit der kritischen Temperaturdifferenz von 200 K (*SETPOINT=200.*) verglichen. Um letztlich die Verknüpfung zu der jeweiligen Glasscheibe herzustellen, die bei Überschreiten des kritischen Wertes (*INI-TIAL\_STATE=.TRUE.*) entfernt wird, muss die Befehlszeile jedes Glases (*&OBST ID='Glas'*) durch folgende Funktion ergänzt werden:

DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_A'/

Durch sogenannte ,Boundary Files' (&BNDF) lassen sich Eigenschaften der Bauteiloberflächen (z. B. Wand-, Fenster-, Türeigenschaften) anzeigen [58]. Da das Augenmerk letztlich der Fenster, d. h. der Verglasungen und Fensterrahmen gilt, wird dieser Befehl zugunsten der Rechendauer für die übrigen Bauteile ausgeschaltet.

Darüber hinaus werden sogenannte ,Slice Files' (*&SLCF*) senkrecht zur Scheibenebene definiert. Sie können u. a. verschiedene Temperaturwerte, Gasphasenmengen oder Geschwindigkeiten entlang der definierten Ebene (zweidimensionale Auswerteebene) aufzeichnen. [58] In dieser Brandsimulation werden die Temperaturen in der Mitte der Fensterscheiben in der Vertikalen erfasst (siehe Abbildung 5-10, gelbe Außenlinien).



Abbildung 5-10: Darstellung der AST und Slice-Files im Testraum

Zuletzt ist noch die Befehlfunktion ,Plot3d' zu nennen. Mit ihr lassen sich alle im Simulationsraum befindlichen Werte zu einem bestimmten Zeitpunkt in zwei- oder dreidimensionaler Form anzeigen. [58] In einem Intervall von zehn Sekunden wird zum einen die Temperatur und zum anderen die Geschwindigkeit in allen drei Dimensionen (wobei die Koordinaten ,uvw' mit ,xyz' gleichzusetzen sind) aufgezeichnet.

### 5.4.5 SIMULATIONSDURCHLÄUFE

Pro Versuchsaufbau wird ein Simulationsdurchlauf mit einer Dauer von 1400 s (in Anlehnung an die Realbrandversuche) durchgeführt. Zum Vergleich: Xie et al. haben je Brandherd-Durchmesser zwei Durchläufe vorgenommen, mit der Anmerkung, dass ein dritter Durchlauf durchgeführt wird, wenn sich der erste Durchlauf vom zweiten Durchlauf signifikant unterscheidet [36]. Dies ist jedoch nur dann notwendig, wenn es sich um Realbrandversuche handelt.

Für Brandsimulationen genügt ein Durchlauf, wobei in dieser Arbeit jeweils eines der folgenden Parameter variiert:

- Glasdicke (6 mm und 10 mm)
- Pool Brand Fläche (0,54<sup>2</sup> m<sup>2</sup>; 0,80<sup>2</sup> m<sup>2</sup>; 0,90<sup>2</sup> m<sup>2</sup>)

Der Übersichtlichkeit dienend, werden die Simulationen gemäß Tabelle 5-5 nummeriert.

Simulation Nr.	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
Glasdicke	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm
Pool Brand Fläche	0,54	4² m²	0,80	)² m²	0,90	)² m²

Tabelle 5-5: Nummerierung der Simulationen

An dieser Stelle wird angemerkt, dass sich aufgrund der Rechenkapazitäten und dem zeitlich einzuhaltenden Rahmen auf drei unterschiedlich große Brandquellen spezialisiert wird. Gewählt wurden die kleinste sowie die beiden größten Abmessungen. Letztere erreichen durch die größere Poolfläche am ehesten die kritischen Temperaturdifferenzen. Zudem können die dazugehörigen experimentellen Ergebnisse von Xie et al. in ihrem Bericht eingesehen werden. Experimentelle Ergebnisse des Versuches mit der kleinsten Brandquelle sind nicht gegeben, nichtsdestotrotz kommt eine Auswertung der entsprechenden Temperaturdifferenzen und dessen Verläufe der Gesamtbetrachtung zu Gute. Durch die Betrachtung zwei unterschiedlicher Glasdicken für alle betrachteten Wannenflächen, finden somit insgesamt sechs Simulationen statt.

## **6 SIMULATIONSERGEBNISSE**

## 6.1 ÜBERSICHT

Um eine fundierte Auswertung der Simulationsergebnisse durchzuführen, wird vorab ein kurzer Blick auf die für das Herausfallen verursachenden Versagenskriterien und Einflussparameter geworfen. Tabelle 6-1 zeigt hierzu eine Übersicht, wobei die mit , $\checkmark$ ' gekennzeichneten Attribute berücksichtigt und die mit ,\*' gekennzeichneten Attribute nicht berücksichtigt wurden. Da für die Brandsimulationen Einscheiben-Sicherheitsglas verwendet wurde und das komplette Versagen unmittelbar nach Auftreten der ersten Risse geschieht, hat das Kriterium "Rissanzahl" keinen Einfluss (mit ,-' gekennzeichnet).

Versagenskriterium	
Temperaturunterschiede	✓
Lage der Temperaturextreme	✓
Dauer der thermischen Belastung	×
Rissanzahl/Glasinseln	-

Einflussparameter	
Scheibenabmessungen (-einstand)	×
Fensteranordnung im Raum	~
Glasart	✓
Glasdicke	×
Rahmenkonstruktion/Einbausituation	×
Umfassungsbauteile	✓
Aufheizgeschwindigkeit (Brandquelle)	✓

Wie bereits erwähnt, gestaltet es sich schwierig, alle wichtigen, in Tabelle 6-1 aufgelisteten Attribute bei einer Modellierung zu berücksichtigen. In den Simulationen wurden die Dauer der thermischen Belastung, die Scheibenabmessungen (-einstand), die Glasdicke sowie die Einbausituation nur in geringen Maße einbezogen. Warum die einzelnen Einflussparameter nicht berücksichtigt wurden, wird an entsprechender Stelle in der nachfolgenden Ergebnisauswertung erklärt.
## 6.2 AUSWERTUNG

Die nachstehende Abbildung 6-1 zeigt, wie der Verlauf der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen im Realbrandversuch aussah. Exemplarisch zeigt die Abbildung die Ergebnisse der Glasscheibe 1 der Dicke 6 mm mit einem Pool Brand der Fläche 800 mm x 800 mm. Ähnliche Verläufe wurden auch bei den übrigen Glasscheiben mit jeweils wiederum unterschiedlich großen Pool Flächen ermittelt und können bei Bedarf der Literatur [36] entnommen werden.



Abbildung 6-1: ΔT der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell [36]

Alle numerischen Ergebnisse, die mit FDS erzeugt wurden, weichen signifikant von den Realbrandversuchen ab. Beispielhaft werden die numerischen Ergebnisse der Simulation 1-1 (Pool Brand: 540 mm x 540 mm; 6 mm ESG) in den nachstehenden Abbildungen gezeigt. Die übrigen Graphen, die die Verläufe der Temperaturdifferenzen über die Zeit darstellen, sind dem Anhang (Kapitel VIII.II) beigefügt.



Abbildung 6-2:  $\Delta T$  der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 540 x 540 mm, numerisch (Simulation 1)



Abbildung 6-3:  $\Delta T$  der Glasscheibe 2 (6 mm), Pool Brand 540 x 540 mm, numerisch (Simulation 1)



Abbildung 6-4: ΔT der Glasscheibe 3 (6 mm), Pool Brand 540 x 540 mm, numerisch (Simulation 1)

Es ist unverkennbar, dass die mit FDS erzeugten Simulationen nicht die gewünschten Ergebnisse erzielen. Die Temperaturdifferenzen, die in den Realbrandversuchen von Xie et al. gemessen wurden, konnten mit den Simulationen nicht abgebildet werden. Zu begründen ist dies in erster Linie mit den gewählten Messelementen. Die adiabatischen Oberflächentemperaturen messen den konvektiven sowie radiativen Temperaturanteil an der Oberfläche des Bauteils. Das bedeutet, dass die Eigenschaften der Bauteile (Verglasung, Fensterrahmen), wie beispielsweise die Wärmekapazität, selbst kaum berücksichtigt werden. An den Messstellen wird also die direkte Wärmestrahlung bzw. -konvektion des Brandes bestimmt. Die ermittelten Temperaturdifferenzen, die sich sowohl positive als auch negative Werte annehmen, bewegen sich im Mittel auf der Horizontalachse. Zurückzuführen ist das auf thermodynamische Prozesse. Die einzelnen Messstellen-Paare liegen so dicht beieinander, dass die Temperaturen im Laufe der Brandentwicklung insgesamt zwar ansteigen, dabei aber Schwankungen unterliegen. Auf Höhe des Rahmens können deshalb im Vergleich zur Verglasung höhere Temperaturen gemessen werden, während im nächsten Augenblick auf Höhe des unwesentlich entfernten AST-Elements auf der Verglasung, wiederum höhere Temperaturen auftreten. Das erklärt auch, warum nahezu die Hälfte aller bestimmten Temperaturdifferenzen negative Werte hervorbringen. Wird der gesamte Brandverlauf betrachtet, dann ist zu erkennen, dass die aufgezeichneten Werte im Mittel bei ca. 0 K liegen.

Neben der Auswahl verwendeter Temperatur-Messelemente haben auch deren Anordnungen Einfluss auf ungenaue Messergebnisse. Eine weitere Schwäche bei diesem Simulationsansatz war die Ungenauigkeit der ermittelten Temperaturdifferenzen. Während der Ergebnisauswertungen stellte sich heraus, dass sich die tatsächliche Differenz zwischen zwei AST-Elementen geringfügig von dem während der Simulation berechneten Wert unterscheidet. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf bezogene Mittelwerte, d. h. Temperaturwerte, die über die Dauer von einer Minute gemittelt und dann wiederum voneinander subtrahiert wurden, während die Differenz zweier AST-Elemente zu einem bestimmten Zeitpunkt einen anderen Wert liefern kann.

Auf eine intensivere Auswertung wird an dieser Stelle verzichtet, da das Hauptziel der Simulationsdurchläufe nicht erreicht wurde. Die Erwartungen, die an den Simulationsansatz in Bezug auf die auftretenden Temperaturdifferenzen gestellt wurden, sind nicht erfüllt worden. Wie bereits gezeigt, bilden sich keine größeren Temperaturdifferenzen zwischen dem AST-Element auf der Glasscheibe und dem auf der Verglasung befindlichen AST-Element aus. Es war bereits zu Beginn des Simulationsaufbaus bekannt, dass die Ergebnisse bei einer numerischen Abbildung des Realbrandversuchs von den experimentellen Ergebnissen abweichen können. Die Bestimmung der maßgebenden Temperaturdifferenzen ist jedoch elementarer Bestandteil der Modellierung. Der bei diesem Simulationsansatz auftretende Unterschied zwischen numerischer und experimenteller Ergebnisse ist so gravierend, dass es die bisher festgelegten Messelemente hinsichtlich ihrer Anordnung und Eigenschaften zu optimieren gilt. In welcher Form dies geschieht, wird im nachfolgenden Kapitel 7 näher erläutert.

# **7 OPTIMIERUNG DES SIMULATIONSANSATZES**

## 7.1 HERAUSFORDERUNGEN

Da das Hauptziel der Simulationsdurchläufe bislang nicht erreicht wurde, werden die durchgeführten Simulationen entsprechend der gewonnenen Erkenntnissen überarbeitet und optimiert. Im Zuge der Modellierung und dem Umgang mit FDS ist deutlich geworden, dass das Programm einige Herausforderungen mit sich bringt:

Sowohl FDS als auch PyroSim verfügen über ein Benutzerhandbuch, das beim Download des Programms bzw. der Software inbegriffen und frei zugänglich ist. Viele Funktionsweisen, Befehle und Tipps werden aufgeführt. Einige für diese Arbeit wichtigen Befehle werden dabei zum Teil jedoch unzureichend beschrieben. Ein Beispiel hierfür ist die Anordnung der Temperaturmesspunkte, dessen einzuhaltende Blickrichtung nicht immer bekannt ist. Neben der Blickrichtung ist die richtige Position – ob in der Zelle oder auf der Zellkante – einzuhalten. Diese kann sich je nach verwendetem "Device" unterscheiden. Darüber hinaus kann nicht jede Befehlszeile, die in FDS problemlos implementiert werden kann auch in PyroSim eingegeben werden. Daraus ergibt sich automatisch ein erhöhter Aufwand beim Erstellen der Simulationen, da die noch unfertige Datei als FDS-Datei exportiert werden muss, um die notwendigen Befehle ergänzen zu können.

Die in Kapitel 6.2 erfassten Diskrepanzen zwischen den experimentellen und numerischen Versuchsergebnissen sollen nachfolgend in möglichst großem Umfang behoben werden. Aufgrund der Diversität an FDS-Befehlen und der damit einhergehenden Fehleranfälligkeit, werden zunächst verschiedene Varianten in Bezug auf die Messelemente und den Fensteraufbau vorgestellt. Eine für die kommenden Simulationen generelle Änderung wird vorgenommen: aufgrund der ungenau berechneten Temperaturdifferenzen wird die ausgegebene Zeitschrittweite auf eine Sekunde festgelegt. Damit soll erreicht werden, dass die verschiedenen Messwerte stets zu derselben Zeit aufgezeichnet und untereinander verglichen werden, um letztlich korrekte Differenzen zu erhalten.

Außerdem wurde mit den Hauptentwicklern von FDS Kontakt aufgenommen, um die Komplexität hinter der Erfassung realistischer Temperaturwerte von schattiertem Glas entsprechend erfassen zu können.

## 7.2 ÄNDERUNGEN

### 7.2.1 ANZAHL UND ART DER MESSELEMENTE

Bisher wurde die Temperatur bzw. die Temperaturdifferenz mithilfe von Messelementen ermittelt, die jeweils an zwei unterschiedlichen Positionen angeordnet wurden. Die Messelement-Paare befanden sich beide auf der brandzugewandten Seite, dem freien Brand ausgesetzt. Wie in der Ergebnisauswertung (Kapitel 6.2) hervorging, müssen die Anordnung sowie die hinterlegte Eigenschaft der ,Devices' überdacht werden, damit realistische Oberflächentemperaturen der Glasscheiben über die gesamte Dauer des Brandes identifiziert werden können.

Abbildung 7-1 stellt die Definition der Temperaturdifferenzen nach Xie et al. dar, die sich wie folgt zusammensetzt [36]:

$$\Delta T_1 = T_{exposed, fire} - T_{shaded, fire}$$
 [K] Gleichung (7.1)

$$\Delta T_2 = T_{shaded, fire} - T_{shaded, ambient} \quad [K] \qquad \qquad Gleichung (7.2)$$

$$\Delta T = T_{exposed, fire} - T_{shaded, ambient} = \Delta T_1 + \Delta T_2 \quad [K] \qquad Gleichung (7.3)$$

mit  $T_{exposed, fire}$ : Temperatur freier Bereich (brandzugewandte Seite)

*T<sub>shaded.fire</sub>*: Temperatur schattierter Bereich (brandzugewandte Seite)

*T<sub>shaded,ambient</sub>*: Temperatur schattierter Bereich (brandabgewandte Seite)



Abbildung 7-1: Definition der Temperaturdifferenzen nach Xie et al. [36]

Bei den bisherigen Simulationen wurde die verwendete Glasdicke zwar angegeben, bei der Ermittlung der Temperaturdifferenzen wurden diese aufgrund der Messelement-Anordnung jedoch nicht berücksichtigt. Xie et al. lösen dieses Problem, indem sie ein weiteres Messelement im schattierten Bereich auf der brandabgewandten Seite anordnen. Auf der brandzugewandten Seite wird die Temperatur im freien Bereich am größten sein. Im schattierten Bereich auf gleicher Seite wird die Temperatur abnehmen und auf der brandabgewandten Seite im schattierten Bereich wird die kühlste Temperatur auftreten. Mit Gleichung (7.3) lässt sich schließlich die die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ermitteln, die der Differenz aus der Temperatur des freien Bereichs (brandzugewandt) und des schattierten Bereichs (brandabgewandte) entspricht. Damit kann eines der drei Messelemente (das dem brandzugewandte, im schattierten Bereich liegende) eliminiert werden, was den Implementieraufwand vereinfacht und Rechenkapazität erspart. Für die optimierten Simulationen werden die Messelemente entsprechend neu positioniert.

Neben der Anordnung gilt es noch die korrekte Eigenschaft (*,QUANTITIY'*) den sogenannten ,Devices' zuzuordnen. Bisher wurde die Temperatur bzw. die Temperaturdifferenz mithilfe von Messelementen der Eigenschaft adiabatischer Oberflächentemperaturen ermittelt. In FDS können neben adiabatischen Temperaturen auch solche identifiziert werden:

TEMPERATURE:	misst die Gastemperatur am hinterlegten Messpunkt
WALL TEMPERATURE:	misst die vom hinterlegten Messpunkt in Blickrich-
	tung nächstgelegenste Oberflächentemperatur eines
	Bauteils
INSIDE WALL TEMPERATURE:	misst die innere Bauteiltemperatur am hinterlegten
	Messpunkt in angegebener Tiefe

Die Ermittlung der Gastemperatur (*TEMPERATURE*) stellt keine geeignete Alternative zu den AST-Elementen dar, da hier die Eigenschaften der Glasscheibe bzw. der Rahmenkonstruktion nicht berücksichtigen werden. Anders sieht es bei der Oberflächentemperatur (*WALL TEMPERE-RATURE*) bzw. der Bauteiltemperatur (*INSIDE WALL TEMPERATURE*) aus. Vor allem erstere können die Glastemperatur direkt an der Oberfläche identifizieren. Um am Schluss die für die Ermittlung der Temperaturdifferenz maßgeblichen ,Devices' festzulegen, werden zunächst noch verschiedene Fensteraufbauten vorgestellt und getestet.

## 7.2.2 AUFBAU DER FENSTER

Neben der richtigen Wahl von Anzahl und Art der Messelemente, muss außerdem der Aufbau der Fenster überdacht und angepasst werden. Die unrealistischen, erfassten Temperaturdifferenzen sind hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Temperaturen auf unterschiedlichen Oberflächen gemessen und verglichen wurden. Der kühlere Bereich befindet sich nicht auf den Fensterrahmen selbst, sondern auf dem nicht sichtbaren Bereich des Glases, der durch die Rahmenkonstruktion gehalten und daher schattiert wird. Das bedeutet, dass bei jeder der drei Fenster die Temperaturen am bzw. im Glas direkt gemessen und untereinander verglichen werden müssen.

Nachfolgend werden drei Fensteraufbauten vorgestellt. Bevor sie im Falle eines Erfolges auf den eigentlichen Testraum adaptiert werden, werden diese Varianten in einem modifizierten ISO-Raum (siehe Abbildung 7-2) getestet. Da diese Simulation nur auf prinzipielle Erkenntnisse abzielt, werden nachfolgende Parameter kleiner angesetzt:

- Geometrie (lichte Abmessungen, L x B x H): 1,90 m x 1,00 m x 2,40 m
- Pool Fläche: 150 mm x 150 mm
- Fensterscheiben: 6 mm dickes ESG
- Fensterrahmen: 50 mm Dicke
- Maximale Wärmefreisetzungsrate: HRRPUA = 2.000 kW/m<sup>2</sup>
- Anstieg der Wärmefreisetzungsrate: t<sup>2</sup> = 10 s
- Simulationsdauer: 50 s
- Kritische Temperaturdifferenz: 7 K



Abbildung 7-2: Modifizierter ISO-Raum zum Testen unterschiedlicher Fensteraufbauten (links: Frontansicht; rechts: rechte Seitenansicht)

Dieser modifizierte ISO-Raum bietet den Vorteil, dass aufgrund seiner kleineren Geometrie, der schnelleren Wärmeentwicklung und der kürzeren Simulationsdauer, deutlich schneller Ergebnisse geliefert werden können. Die Rahmendicke wird von ursprünglichen 20 mm auf 50 mm erhöht, um eine intensivere Kühlung zu gewährleisten. Statt Messelemente mit der Eigenschaft einer adiabatischen Oberflächentemperatur (AST) anzuordnen, werden je nach Fensteraufbau die zuvor vorgestellten Messelemente (*WALL TEMPERATURE* bzw. *INSIDE WALL TEMPERATURE*) verwendet. Für diese Tests wird zugunsten dem Auswertungsaufwand ausschließlich ein Messpaar im oberen Randbereich angeordnet (gemäß der Messstelle A aus den Brandsimulationen). Im Folgenden werden die simulierten Varianten beschrieben und direkt anhand der erzielten Ergebnisse bewertet.

### Variante 1

In der ersten Variante wird die Scheibeneinfassung und der damit einhergehende Scheibeneinstand (Einflussparameter 1 und 5, Kapitel 3.4) dahingehend berücksichtigt, dass der Fensterrahmen von der Außen- und Innenseite direkt auf der Glasscheibe aufliegt. Abbildung 7-3 zeigt das geschnittene Bauteil bei der Erstellung der Variante 1.



Abbildung 7-3: Fensteraufbau Variante 1, Schnitt (grün: Schnittfläche)

Abbildung 7-4 stellt die Anordnung der Messelemente dar. Für das Element im freiliegenden Bereich wird die Eigenschaft ,QUANTITY = WALL TEMPERATURE' hinterlegt. Dieses misst die Oberflächentemperatur der Glasscheibe. Dem Element, was sich im schattierten Bereich befindet, wird die Eigenschaft ,QUANTITY = INSIDE WALL TEMPERATURE' zugewiesen, was die innere Bauteiltemperatur an der definierten Stelle misst.



Abbildung 7-4: Anordnung der Messelemente der Variante 1 in FDS

Das Ergebnis dieser Testvariante zeigt, dass sowohl die ,INSIDE WALL TEMPERATURE' als auch die ,WALL TEMPERATURE' realistische Temperaturen aufzeichnen. Entsprechend wird eine Temperaturdifferenz aufgezeichnet, die bis zum Simulationsende ansteigt (siehe Anhang, Kapitel VIII.III). Die vorgestellte Variante 1 erfüllt vorerst das gewünschte Ergebnis. Nach Vorstellung aller drei Varianten wird entschieden, welche für die finale Brandsimulation verwendet wird.

### Variante 2

Die Variante 2 unterscheidet sich vom Aussehen nur unwesentlich von der Variante 1 (siehe Abbildung 7-5). Die Glasscheibe wird flächenmäßig auf jeder Seite um 5 cm verringert, sodass der Rahmen die Glasscheibe augenscheinlich nicht einspannt und nur die Ecken von Rahmen und Glasscheibe einander berühren. In dieser Variante wird der Materialaufbau des Fensterrahmens verändert. Die Messstellen bleiben an der gleichen Position, mit der Ausnahme, dass die Temperaturen im schattierten Bereich ebenfalls als ,WALL TEMPERATURE' ermittelt werden (Abbildung 7-6). In FDS besteht die Möglichkeit, eine Oberfläche mit mehreren Materialschichten anzulegen<sup>8</sup>. In diesem Fall soll der Fensterrahmen an der Seite, wo er in der Realität die Scheibe einspannt, zusätzlich die Materialeigenschaft von Glas zugewiesen bekommen. Aufgrund des unsymmetrischen Aufbaus von Holz und Glas bzw. Glas und Holz sind in FDS zwei Oberflächen zu definieren – je nach Position.

&SURF ID='Fensterrahmen\_Holz-Glas', RGB=204,102,0, MATL\_ID(1,1)='TIMBER', MATL\_ID(2,1)='GLASS', MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0, MATL\_MASS\_FRACTION(2,1)=1.0, THICKNESS(1:2)=0.05,1.0E-3/ &SURF ID='Fensterrahmen\_Glas-Holz', RGB=204,102,0, MATL\_ID(1,1)='GLASS', MATL\_ID(2,1)='TIMBER', MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0, MATL\_MASS\_FRACTION(2,1)=1.0, THICKNESS(1:2)=1.0E-3,0.05/

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Siehe hierzu auch Kapitel 8.3.5 (S. 68 ff.) im FDS Handbuch



Abbildung 7-5: Fensteraufbau Variante 2, Schnitt (grün: Schnittfläche)



Abbildung 7-6: Anordnung der Messelemente der Variante 2 in FDS

Bei dieser Variante zeigt sich, dass das Messelement im schattierten Bereich stets 20 °C misst (vgl. Anhang, Kapitel VIII.III). Da die Temperatur an der freien Glasscheibe ansteigt, steigt mit fortschreitender Zeit auch die gemessene Temperaturdifferenz an. Diese Werte sind aufgrund der gleichbleibenden Glastemperatur im Randbereich jedoch nicht realistisch und damit nicht aussagekräftig. Es bedarf einer weiteren Alternative.

#### Variante 3

Zuletzt wird die dritte Variante vorgestellt. Durch die fortschreitende Bearbeitungszeit, der damit verbunden intensiveren Auseinandersetzung mit FDS sowie dem Kontakt zu Hauptherstellern des Programms, wird folgender Grundgedanke näher betrachtet: Bei der Eingabe mehrerer Bauteile (*@OBST*), die in der Simulation direkt aneinander liegen (Fensterrahmen und Verglasung) und dessen äußere Zellkanten direkt aufeinandertreffen, besteht aller Voraussicht nach keine Verbindung untereinander. Das bedeutet wiederum, dass der Bereich der Glasscheibe, der von der Rahmenkonstruktion gehalten wird, als ein einziges Bauteil angelegt werden muss. Nur dann kann die Schattierung und der damit einhergehende kühlere Randbereich in FDS als solches erkannt werden. Der Ansatz, der für die Variante 2 vorgestellt wurde, wird auch hier gewählt: Der Randbereich wird durch den Aufbau Holzrahmen – Glasscheibe – Holzrahmen als ein Bauteil eingegeben. Im Vergleich zu Variante 1 ist dieser nun symmetrisch.

Die folgenden Befehlszeilen, die den Aufbau berücksichtigen, werden in FDS hinterlegt:

&SURF ID='Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz', RGB=204,102,0, MATL\_ID(1,1)='TIMBER', MATL\_ID(2,1)='GLASS', MATL\_ID(3,1)='TIMBER', MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0, MATL\_MASS\_FRACTION(2,1)=1.0, MATL\_MASS\_FRACTION(3,1)=1.0, THICKNESS(1:3)=0.05,6.0E-3,0.05/

Durch die direkte Verbindung zwischen Glasscheibe und des beidseitigen Holzrahmens, werden wie in Variante 1 zwei unterschiedliche Messelemente zur Bestimmung der Bauteil- und Oberflächentemperatur hinterlegt. Ihre Positionierung bleibt wie bereits zuvor an der gleichen Stelle (Abbildung 7-8). Abbildung 7-7 stellt den Fensteraufbau der Variante 3 dar.



Abbildung 7-7: Fensteraufbau Variante 3, Schnitt (grün: Schnittfläche)



Abbildung 7-8: Anordnung der Messelemente der Variante 3 in FDS

Variante 3 stellt sich als erfolgreich heraus. Während die ,INSIDE WALL TEMPERATURE' im Verlauf des Brandes nur langsam ansteigt, entwickeln sich höhere Temperaturen an der freien Glasscheibe (,WALL TEMPERATURE'). Die daraus resultierende Temperaturdifferenz weist realistische Werte auf. Aufgrund der erfolgreichen Testversion werden die in Variante 3 verwendeten ,Devices' mit denselben Abständen zum bzw. im Bauteil entsprechend auf die ISO-Räume adaptiert. Neue, optimierte Brandsimulationen werden durchgeführt.

### 7.2.3 ANZAHL DER SIMULATIONEN

Für den zweiten Durchlauf werden insgesamt vier Simulationen, wie Tabelle 7-1 zeigt, gestartet.

Simulation Nr.	3-1	3-2	3-3	3-4
Glasdicke	6 mm	10 mm	6 mm	10 mm
Pool Brand Fläche	0,80² m²		0,90	)² m²

Tabelle 7-1: Nummerierung der optimierten Simulationen

Auf eine Simulation mit kleinerer Brandquelle wird an dieser Stelle verzichtet, da es im zweiten Durchlauf primär um die repräsentative Abbildung der Realbrandversuche geht, dessen Ergebnisse von Xie et al. ausschließlich für die beiden größten Brandquellen dargestellt wurden.

## **8 SIMULATIONSERGEBNISSE DES OPTIMIERTEN ANSATZES**

## 8.1 ÜBERSICHT

Zu Beginn der Auswertung der zweiten Simulationsreihe wird erneut geprüft, welche Versagenskriterien und Einflussparameter in dem Simulationsansatz berücksichtigt wurden. Dadurch können die Ergebnisse einer aussagekräftigen Auswertung unterzogen werden.

Versagenskriterium		
Temperaturunterschiede		
Lage der Temperaturextreme		
Dauer der thermischen Belastung		
Rissanzahl/Glasinseln		

Einflussparameter		
Scheibenabmessungen (-einstand)		
Fensteranordnung im Raum		
Glasart		
Glasdicke		
Rahmenkonstruktion/Einbausituation		
Umfassungsbauteile		
Aufheizgeschwindigkeit (Brandquelle)		

Tabelle 8-1: Berücksichtigung der Versagenskriterien und Einflussparameter (Simulation 3)

Im Vergleich zu der ersten Simulation werden nun alle Einflussparameter in dem gewählten Simulationsansatz berücksichtigt. Aufgrund der veränderten Messelemente und deren Anordnung konnten der Scheibeneinstand und die Glasdicke einbezogen werden. Inwieweit sich Unterschiede bei den einzelnen Glasdicken zeigen, wird nachfolgend in der Auswertung überprüft.

Darüber hinaus wird angemerkt, dass in diesem Kapitel Auszüge der angefertigten Ergebnis-Diagramme dargestellt werden. Eine vollständige Abbildung ist dem Anhang beigefügt und kann diesem bei Bedarf entnommen werden. Bezüglich der entsprechenden Diagramme aus den Realbrandversuchen von Xie et al. wird an dieser Stelle auf die Literatur [36] verwiesen.

### 8.2 AUSWERTUNG

Die Auswertung der optimierten Brandsimulationen wird exemplarisch von der Simulation 3-1 sowie 3-4 vorgenommen. Die Ergebnisse der Temperaturdifferenzen zeigen zum größten Teil ähnliche Verläufe. Sind ähnliche bzw. gleiche Ergebnisse zu erkennen, wird dies an der entsprechenden Stelle erwähnt und auf die jeweilige Simulation verwiesen. Bei signifikanten Abweichungen werden die dazugehörigen Diagramme einer eigenen Auswertung unterzogen.

#### Simulation 3-1: Pool Brand: 800 mm x 800 mm, 6 mm Glasdicke

Zu Beginn der Auswertung wird die Glasscheibe 1 (oben links) betrachtet. Der an dieser Scheibe gemessene numerische sowie experimentelle Temperaturverlauf ist in den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 8-1 bzw. Abbildung 8-2) dargestellt. Während sich bei der numerischen Simulation schon nach wenigen Sekunden Temperaturdifferenzen (ΔT) aufzeigen, bleiben die Temperaturen der vier Messpaare an der Glasscheibe 1 in den ersten 100 Sekunden auf gleichem Niveau. Beide Versuche (numerisch sowie experimentell) verzeichnen in der 200. Sekunde an den Messpunkten A, B und D eine Temperaturdifferenz von etwa 170 K. Ausnahme ist der Messpunkt C des Realbrandversuches, dessen ΔT in derselben Sekunde unter 100 K liegt. Während die  $\Delta$ T-Verläufe von Xie et al. nach Erreichen von  $\Delta$ T = 200 K weiter ansteigen, fallen die der numerischen Simulation innerhalb einer Sekunde auf 0 K ab. Für die restliche Branddauer werden negative Temperaturdifferenzen erfasst. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Simulationsansatz die Angabe einer kritischen Temperaturdifferenz ( $\Delta T_{crit}$ ) erfordert, denn nur so können in der Simulation Fensterscheiben versagen und herausfallen. Bei Überschreiten von ΔT<sub>crit</sub> fallen die Messelemente aus, die im freien Bereich der Glasscheibe positioniert wurden. Da anschließend nur noch die Messelemente im Rahmen Temperaturen aufzeichnen, die in der Befehlszeile ,SUBTRACT' an zweiter Stelle stehen, werden beim Wegfall des ersten Wertes dann negative Temperaturdifferenzen errechnet. Die Literaturrecherche in Kapitel 3.2 ergab, dass Einscheiben-Sicherheitsglas durch seine Vorspannung bei einer im Glas auftretenden Temperaturdifferenz von etwa 200 K versagt. Dieser Wert ist für die in FDS erstellten Brandsimulationen übernommen worden. Xie et al. haben hingegen je nach Glasdicke höhere Versagenstemperaturunterschiede identifiziert, weshalb die experimentell ermittelten Temperaturverläufe bei Überschreiten von 200 K einen anderen Verlauf annehmen. In der Realität fallen Glasscheiben dann heraus, wenn ihre individuelle Versagenstemperaturdifferenz überschritten wird. Diese kann wiederum von unterschiedlichen Faktoren, wie der Rahmenkonstruktion, der Befestigung (Leimen, Schrauben, etc.), der Glasart selbst uvm. abhängen. Nichtsdestotrotz können die numerischen sowie experimentellen Verläufe bis zu dem Zeitpunkt von  $\Delta T = 200$  K verglichen und aussagekräftige Schlussfolgerungen unternommen werden. Zudem steht im Vordergrund dieser Arbeit der vorgestellte Modellierungsansatz, der hinsichtlich seiner realistischen Abbildung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung bewertet werden soll.



Abbildung 8-1: ΔT der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-2:  $\Delta T$  der Glasscheibe 1 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell [36]

Im Vergleich zu der Glasscheibe 1 wird die kritische Temperaturdifferenz bei der Glasscheibe 2 erwartungsgemäß später erreicht (Abbildung 8-3). In den ersten Sekunden des Brandes erfahren die Glasscheiben zunächst nur Wärmebelastungen, die sich aus der Wärmestrahlung der Brandquelle ergeben. Durch die heißen Rauchgase, die sich relativ schnell im oberen Raumabschnitt ausbilden, erfahren die Fensterscheiben zusätzliche thermische Belastungen. Diese sind bei der unteren Glasscheibe geringer ausgeprägt, weshalb sich die Temperaturdifferenzen zwischen der freien Glasscheibe und dem schattierten Glas hier später ausbilden (vgl. Abbildung 8-5 bis Abbildung 8-7).

Die im unteren Fensterbereich angeordneten Messpunkte (C, G und L) verzeichnen bei den Realbrandversuchen die geringsten Temperaturdifferenzen. Dieselben Messpunkte der numerischen Ergebnisse weisen dagegen im Vergleich zu den Messpunkten B, F bzw. K geringere Temperaturdifferenzen auf. Diese Unterschiede sind jedoch geringfügig und können auf unterschiedlich auftretende Strömungsverhalten im ISO-Raum zurückgeführt werden.



Abbildung 8-3: ΔT der Glasscheibe 2 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-4: ΔT der Glasscheibe 2 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell [36]



Abbildung 8-5: Simulation 3-1: ,WALL TEMPERATURE' in der 91. Sekunde (Auszug: Smokeview)



Abbildung 8-6: Simulation 3-1: ,WALL TEMPERATURE' in der 221. Sekunde (Auszug: Smokeview)



Abbildung 8-7: Simulation 3-1: ,WALL TEMPERATURE' in der 224. Sekunde mit herausgefallener Glasscheibe 1 (Auszug: Smokeview)

Wie bei den Glasscheiben 1 und 2 zeigt auch die Glasscheibe 3 in FDS bei allen vier Messpunkten unmittelbar nach Simulationsstart Temperaturdifferenzen auf. Im Realbrandversuch sind erst nach ca. 100 Sekunden an den oberen Messpunkten und nach ca. 150 Sekunden an den unteren Messpunkten Temperaturdifferenzen zwischen den jeweiligen Messpaaren zu verzeichnen. In dem Bericht von Xie et al. wird nicht näher erläutert, wie die Thermoelemente an der Scheibe und vor allem im schattierten Bereich angebracht worden sind. Aus diesem Grund wird vermutet, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Befestigung der Thermoelemente und der aufgezeichneten Temperaturdifferenzen besteht. Die in FDS angeordneten Messelemente sind im Vergleich dazu direkter thermischer Beanspruchung ausgesetzt, da potentielle Befestigungsmittel, wie Klebstoff etc. diese Elemente nicht umgeben und schützen.

Die Temperaturdifferenzen der Scheibe 1 werden in Bezug auf das Erreichen der festgelegten kritischen Temperaturdifferenz von  $\Delta T = 200$  K in den Realbrandversuchen numerisch gut abgebildet. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten werden auch in FDS erfasst, auch wenn diese in den Realbrandversuchen ausgeprägter sind.



Abbildung 8-8: ΔT der Glasscheibe 3 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-9: ∆T der Glasscheibe 3 (6 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell [36]

Um die Entwicklung und die Ausbildung der Temperaturen auf der Scheibenoberfläche während des Brandverlaufes identifizieren zu können, kann in Smokeview die Ausgabeebene ,BOUNDA-RIES' genutzt werden. Abbildung 8-10 zeigt die Frontansicht des ISO-Raumes zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Die in schwarz dargestellten Flächen stellen die Temperatur 200,4 °C dar. Es wird ersichtlich, dass zunächst die Mitte der Glasscheibe 1 diese Temperatur erfährt. Mit der Zeit bildet sich auch auf den übrigen beiden Glasscheiben (zuerst Scheibe 2, dann Scheibe 3) die Temperatur von 200,4 °C aus. Bei allen drei Verglasungen erwärmt sich die Scheibe zunächst in der Mitte und bildet sich nach außen ringförmig aus, bis letztlich den Randbereich erreicht wird.

Bei den Auswertungen der Messelemente ist deutlich zu erkennen gewesen, dass die Temperaturen im schattierten Randbereich nur sehr langsam ansteigen. Sie erreichen bei der Simulation 3-1 maximal 20,68 °C. In Hinblick auf den unteren linken bzw. unteren rechten Screenshot der Abbildung 8-10 (Sekunde 220,6 bzw. 225,9) wird deutlich, dass durch den geringen Temperaturanstieg im schattierten Bereich die Scheibe dann versagt, wenn der Randbereich T = 200 K erreicht.



Abbildung 8-10: Oberflächentemperatur T = 200,4 °C (schwarz) zu unterschiedlichen Zeiten (Auszug Smokeview)

Während die das Glasversagen numerisch ziemlich gut abbilden lässt, entwickelt sich auch der Brand entsprechend den Realbrandversuchen von Xie et al.. Aufgrund der verwendeten Brandquelle Dieselöl ist schon nach 30 Sekunden eine hohe Rauchentwicklung (schwarzer Rauch) zu verzeichnen (Abbildung 8-11). Diese bildet sich zu Beginn an der Decke aus, wird mit fortschreitendem Brandverlauf immer dicker und nähert sich dem Boden an. Eine ähnliche Entwicklung dokumentierten Xie et al. [36].



Abbildung 8-11: Simulation 3-1: Rauchentwicklung in der 36. Sekunde (Auszug: Smokeview)

### Simulation 3-2: Pool Brand: 800 mm x 800 mm, 10 mm Glasdicke

Bei der Simulation 3-2 sind Unterschiede zwischen den experimentellen und numerischen Ergebnissen sichtbar, weshalb an dieser Stelle in Abbildung 8-12 die Temperaturdifferenzen der Glasscheibe 2 dargestellt werden. Im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen (Abbildung 8-13) fällt diese Glasscheibe heraus, da die kritische  $\Delta T = 200$  K überschritten wird. In den Realbrandversuchen werden zu keinem Zeitpunkt solch hohe Differenzen gemessen. Zudem werden dort auch erst ab der 100. Sekunde sichtliche Temperaturunterschiede zwischen den Messpaaren festgestellt (in FDS treten diese sofort nach Simulationsbeginn auf). Trotz dieser Unterschiede, die zwischen den numerischen und experimentellen Ergebnissen vorhanden sind, sind Gemeinsamkeiten bei den Temperaturunterschieden innerhalb der vier Messstellen zu erkennen. Während der Messpunkt I die größten Temperaturunterschiede misst, treten bei dem Messpunkt H die geringsten auf.



Abbildung 8-12:  $\Delta T$  der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-13:  $\Delta T$  der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 800 x 800 mm, experimentell [36]

### Simulation 3-4: Pool Brand: 900 mm x 900 mm, 10 mm Glasdicke

Zuletzt wird noch die Simulation 3-4 ausgewertet. Im Realbrandversuch von Xie et al. brachen die Glasscheiben 1 und 3 und fielen heraus. Wie bereits erwähnt, bildet die in FDS erstellte Simulation das mit dem Brandverlauf einhergehende Glasbruchverhalten nicht zu 100 % ab. Die festgelegte Versagenstemperaturdifferenz ist mit 200 K eine andere als sie von Xie et al. untersucht wurde. Auch hier sind die Verläufe bis zum Erreichen von  $\Delta T_{crit}$  entscheidend.

Die Temperaturdifferenzen der Glasscheibe 1 (Abbildung 8-14) erreichen vor der 200. Sekunde bereits den kritischen Wert. Die Oberflächenerwärmung der Glasscheibe im Realbrandversuch zeigt ein anderes Verhalten auf. Bis zur 200. Sekunde bilden sich zwischen den Messpaaren noch keine Differenzen aus. Dass der anfängliche Temperaturanstieg numerisch ein anderer ist, wurde bereits erläutert. Bisher wurde  $\Delta T_{crit}$  = 200 K aber auch bei den experimentellen Versuchen annähernd zu derselben Zeit erreicht.



Abbildung 8-14:  $\Delta T$  der Glasscheibe 1 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-15: ΔT der Glasscheibe 1 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, experimentell [36]

Das gleiche Phänomen ist bei der Glasscheibe 2 zu erkennen. Auch hier stimmen die numerischen Ergebnisse (Abbildung 8-16) nicht mit den experimentellen Ergebnissen (Abbildung 8-17) überein. Die Ursache kann der in FDS hinterlegte Verlauf der Wärmefreisetzungsrate sein. In den Vorbereitungen wurde bereits die Schwierigkeit erkannt, den korrekten Verlauf der Wärmefreisetzungsrate zu ermitteln. Während in FDS je Pool Brand Fläche ein anderer Maximalwert angegeben wurde, ist stets bei Sekunde 500 der Peak festgelegt worden. In der Realität erreicht die Wärmefreisetzungsrate mit zunehmender Pool Brand Fläche jedoch schneller sein Maximum. Aufgrund unzureichender Informationen aus den Realbrandversuchen ist diese Vereinfachung getroffen worden.



Abbildung 8-16: ΔT der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-17: ΔT der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, experimentell [36]

Im Gegensatz zu den Glasscheiben 1 und 2 erzielt die numerische Ermittlung der Temperaturdifferenzen an den Messpunkten bei der Glasscheibe 3 realistische Ergebnisse.  $\Delta T_{crit}$  = 200 K wird in beiden Fällen nach ca. 270 Sekunden erreicht. Wie schon zuvor ist ein klarer Unterschied zwischen den einzelnen Messpunkten zu erkennen.

Nach Herausfallen der Glasscheiben erfährt der Kurvenverlauf bei den numerischen Werten einen rasanten Abfall auf 0 K Temperaturdifferenz. Anschließend sind negative Temperaturunterschiede zwischen dem schattierten und der freien Scheibenfläche zu verzeichnen. In den Realbrandversuchen verhalten sich die auftretenden Temperaturdifferenzen anders. Sie nehmen mit der Zeit deutlich langsamer ab. Anders ausgedrückt sind über einen sichtbar längeren Zeitraum weiterhin höhere Temperaturen auf der freien Scheibenoberfläche im Vergleich zum schattierten Randbereich vorhanden. Als Ursache wird folgendes vermutet: in FDS fällt (wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erläutert) die Glasscheibe komplett heraus. Sie ist im Bauteil nicht mehr vorhanden, weshalb auch das zugehörige Messelement ab diesem Moment keine Temperaturen aufzeichnet. Für die Realbrandversuche von Xie et al. wird angenommen, dass der Glasbereich, auf dem sich die Messelemente der freien Scheibenoberfläche befinden, nach Herausfallen in der Rahmenkonstruktion verbleibt. Wenn dieses Glasteil beim Herausfallen ebenfalls

86

von der Rahmenkonstruktion entfernt wird, gibt es weiterhin die Möglichkeit, dass das angebrachte Thermoelement auf der noch warmen Glasscherbe, Temperaturen aufzeichnet. In beiden Fällen werden deshalb auch nach dem Glasbruch positive Temperaturdifferenzen aufgezeichnet.



Abbildung 8-18: ΔT der Glasscheibe 3 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, numerisch (Simulation 3)



Abbildung 8-19: ΔT der Glasscheibe 2 (10 mm), Pool Brand 900 x 900 mm, experimentell [36]

## 8.3 STÄRKEN UND SCHWÄCHEN DES FINALEN SIMULATIONSANSATZES

Abschließend werden auf Grundlage der Ergebnisauswertung die Stärken und Schwächen des optimierten (finalen) Simulationsansatzes aufgeführt und erläutert. Tabelle 8-2 stellt der Übersichtlichkeit dienend eine Auflistung aller Stärken und Schwächen dar.

Stärken	Schwächen
<ul> <li>Berücksichtigung der essenziellen Versa- genskriterien</li> </ul>	Benutzerfreundlichkeit
Berücksichtigung aller Einflussparameter	Auf ESG optimiert
<ul> <li>Deckungsähnliche Ergebnisse zu Real- brandversuchen</li> </ul>	
→ erfolgreiche numerische Abbildung des Glasbruchverhalten im Brandfall	

Tabelle 8-2: Stärken und Schwächen des gewählten Ansatzes der Brandsimulation

#### Stärken

Als Stärke dieses Simulationsansatzes ist die Berücksichtigung der für Einscheiben-Sicherheitsglas essenziellen Versagenskriterien sowie aller Einflussparameter zu nennen. Im gleichen Zuge ist diese Aussage zu relativieren, da die Berücksichtigung nicht mit der gewünschten Detail- und Realitätstreue einhergeht. Damit ist zum Beispiel der Einflussparameter ,Rahmenkonstruktion' zu nennen. Die Konstruktion an sich wurde berücksichtigt, die genauen Materialangaben gingen aus dem Realbrandversuch jedoch nicht hervor, sodass hier Annahmen getroffen werden mussten. Als weiteres Beispiel sind die Abmessungen des Fensterrahmens zu erwähnen, dessen Dicke nicht bekannt war, womit der Scheibeneinstand ebenfalls frei gewählt wurde. Dennoch konnten die Realbrandversuche numerisch gut abgebildet werden, sodass die Annahmen – die an der ein oder anderen Stelle getroffen werden mussten – das Ergebnis nicht negativ beeinflusst haben.

Darüber hinaus ist der Simulationsansatz positiv zu bewerten. Die für das Glasbruchverhalten im Brandfall verursachenden Temperaturdifferenzen zwischen eingespannter Glasscheibe und freier Glasoberfläche wurden realistisch abgebildet. Die Erwartungen, die mit der Erstellung und Durchführung der Brandsimulationen einhergingen, wurden erfüllt.

### Schwächen

Neben den oben aufgeführten Stärken, verzeichnet der erstellte Simulationsansatz ebenso Schwächen. Der gewählte ISO-Raum, einschließlich aller Öffnungen, der verwendeten Materialien und Temperatur-Sensoren, konnte ohne Probleme mithilfe der Benutzeroberfläche ,Pyro-Sim' erstellt werden. Der für die Erfassung der Temperaturdifferenzen notwendige Befehl ,SUB-TRACT', der zwei Temperaturstellen miteinander vergleicht, voneinander subtrahiert und bei Überschreiten eines vorher festgelegten kritischen Wertes die Glasscheibe entfernt (= Herausfallen), konnte in der hier verwendeten Version von PyroSim (Version 6.7.1) hingegen nicht implementiert werden. Aus diesem Grund konnten die Simulationen nur dann gestartet werden, wenn im Quellcode die entsprechenden Befehlszeilen ergänzt wurden. Dies erforderte besondere Sorgfalt und erhöhte den Implementieraufwand, weshalb der verwendete Ansatz hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit ausbaufähig ist.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Simulationsansatz bezieht sich ausschließlich auf Einscheiben-Sicherheitsglas und ist für diese Glasart optimiert. Wie in den Modellierungsansätzen (Kapitel 4.2) bereits aufgezeigt wurde, versagt je nach verwendeter Glasart die Verglasung auf verschiedene Weisen. Im Fall von Einscheiben-Sicherheitsglas fällt die Verglasung ohne große Vorankündigung (Risse) nach Überschreiten der kritischen Temperaturdifferenz komplett aus der

89

Rahmenkonstruktion heraus. Dieses Phänomen weisen andere Glasarten nicht auf. Für die Untersuchung solcher Gläser kann der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz nicht ohne Weiteres angewendet werden. In diesem Fall können die vorgestellten Modellierungsansätze (Kapitel 4.2) herangezogen werden. Bei einem stückweisen Herausfallen wird empfohlen, die Fensterscheibe in mehrere Bauteile zu unterteilen. Dadurch können die einzelnen Glaselemente, entsprechend festgesetzter zeitlicher Abhängigkeiten, nach Überschreiten der kritischen Temperaturdifferenz herausfallen.

# **9 FAZIT UND AUSBLICK**

Im Rahmen der Masterarbeit sind Modellierungsansätze für das Glasbruchverhalten bei Brandeinwirkung untersucht worden. Als Grundlage der Arbeit diente eine ausführliche Literaturrecherche. Diese beinhaltete u. a. die Untersuchung schon bestehender Forschung in Hinblick auf bereits durchgeführte Realbrandversuche.

Hinsichtlich der einleitenden Fragestellung dieser Arbeit, inwiefern die Ansätze zur Modellierung von Glasbruch Anwendung finden und welche Rückschlüsse aus den gewonnenen Erkenntnissen getroffen werden können, lässt sich Folgendes festhalten: Es gibt keine Universallösung für die Modellierung des Glasbruchverhaltens bei Brandeinwirkung. In Abhängigkeit der gewählten Verglasung (Glasart, Beschichtung, Rahmenkonstruktion, Größe) und Einbausituation reagieren diese bei thermischer Beanspruchung unterschiedlich. Die vorgestellten Modellierungen sind für Einscheiben-Sicherheitsgläser geeignet, die von Holzrahmen gehalten werden, optimiert worden.

Aus dem Grund der Diversität und den der Berücksichtigung unterschiedlichster Faktoren je nach verwendeter Glasart, musste von der ursprünglichen Aufgabenstellung abgewichen werden. Auch deswegen, weil die Literatur keine genaue Unterteilung vornimmt und der Eindruck vermittelt wird, dass die bei den Realbrandversuchen gewählten Glasarten wahllos und ohne tiefergehende Begründung für die Versuche gewählt worden sind.

Der gewählte Simulationsansatz bildet für die Untersuchung von Einscheiben-Sicherheitsglas eine gute Basis. Aufgrund der zuvor festgelegten kritischen Temperaturdifferenz von 200 K, die auf Basis der vorherigen Literaturrecherche getroffen wurde, zeigen sich unterschiedliche ΔT-Verläufe zwischen den experimentellen und numerischen Brandverläufen. Unzureichende Informationen über den ausgewählten Realbrandversuch von Xie et al. – hinsichtlich der Rahmenkonstruktion, der Befestigung der Thermoelemente sowie dem Verlauf der Wärmefreisetzungsrate – erschwerten die numerische Abbildung des Glasbruchverhaltens. Es bedarf aufgrund dessen einer intensiveren Auseinandersetzung mit der Thematik ,Glasbruchverhalten im Brandfall' sowie einer Optimierung des Quellcodes. Die Temperaturdifferenzen gilt es genauer zu erfassen, die Anordnung der Oberflächen- und Bauteiltemperatur-Messelemente muss je nach Anwendungsfall individuell festgelegt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Erwartungen im Verlauf der optimierten Simulation erfüllt wurden. Die ermittelten Temperaturdifferenz-Verläufe werden plausibel und

91

realitätsnah abgebildet. Für die Ermittlung genauerer Zusammenhänge und zur Klärung der offenen Fragen, sind weiterführende Untersuchungen erforderlich. Diese sollten sich vornehmlich auf andere Glasarten spezialisieren, um die Wissenslücke auf diesem Gebiet weitestgehend zu schließen.

Abschließend kann diese Arbeit und die mit ihr gewonnenen Erkenntnisse als wertvoller Beitrag in der Entwicklung des Brandschutzwesens bewertet werden. Realbrandversuche sind zeit- und kostenaufwendig. Sie können die Gesamtheit eines Gebäudes bei entsprechender Größe nicht realitätsnah abbilden. Solche Versuche unterliegen diversen Streuungen, die durch Materialvarianz, menschlichen Einsatz und Umweltfaktoren im individuellen Fall hervorgerufen werden. Für zukünftige Untersuchungen wird daher empfohlen, Realbrandversuche im ISO-Testraum mit Glasarten unterschiedlicher Dicke sowie in verschiedenen Rahmenkonstruktion zu testen, um im Anschluss den in dieser Arbeit vorgestellten Simulationsansatz auf andere Glasarten entsprechend anpassen und erweitern zu können. Dabei sollte in jedem Fall der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate bei den Realbrandversuchen sorgfältig aufgezeichnet werden. Die Fehleranfälligkeit bei der numerischen Umsetzung in FDS kann dadurch in großem Umfang minimiert werden.

Durch die Ergänzung weiterer adäquater Modellierungsansätze, bieten Brandsimulationen den großen Vorteil, eine rein physikalische Methode zur Abschätzung des Glasbruchverhaltens im Brandfall zu liefern. Zu bemängeln ist lediglich der hohe Modellierungsaufwand, welcher im Zuge des anstehenden Wandels zur Projektplanung mit BIM (Building Information Modeling) zu großen Teilen jedoch entfallen könnte.
### **VII** LITERATURVERZEICHNIS

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, *DIN 1259-1: Glas Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen,* 2001.
- [2] J. Schneider, J. Kuntsche, S. Schula, F. Schneider und J.-D. Wörner, Glasbau 2. -Grundlagen \* Berechnung \* Konstruktion (2. Auflage), Darmstadt: Springer Vieweg, 2016.
- [3] K.-C. Thienel, Werkstoffe des Bauwesens Glas, München, 2018.
- [4] B. Lippold, "www.chemie.de," Lumitos AG, [Online]. Available: http://www.chemie.de/lexikon/Glas.html. [Zugriff am 5 April 2019].
- [5] B. Weller und S. Tasche, Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln (36. Auflage), Aachen:
  Springer Vieweg; Beuth, 2018, pp. 880-892.
- [6] H. Scholze, Glas: Natur, Struktur und Eigenschaften, Springer-Verlag Berlin, 1988, pp. 3-7.
- J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/funktionsglaeser/einscheibensicherhei tsglas-esg-159097. [Zugriff am 6 April 2019].
- J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: https://www.baunetzwissen.de/brandschutz/fachwissen/bauprodukte/feuerschutzabs chluesse-verglasungen-3176883. [Zugriff am 14 April 2019].
- [9] Ares GmbH, "www.spiegel21.de," [Online]. Available: https://www.spiegel21.de/Glas/ESG-Glas/10-mm-ESG-Glas::2635.html. [Zugriff am 16 April 2019].
- [10] Vinalsa Glas und Glaswaren, "www.vinalsa.es," [Online]. Available: https://www.vinalsa.es/de/verbundsicherheitsglas-vsg/. [Zugriff am April 2019].

- [11] Scheuten Glas, "www.scheuten.com," [Online]. Available: https://www.scheuten.com/de/scheuten-projects/glasprodukte/2-fach-isolierglas.
   [Zugriff am 6 April 2019].
- [12] Kremer Pigmente GmbH & Co. KG, "www.kremer-pigmente.com," [Online]. Available: http://www.kremer-pigmente.com/media/pdf/67600.pdf. [Zugriff am April 2019].
- [13] J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online].
  Available: https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/herstellungeigenschaften/festigkeit-von-glas-159075. [Zugriff am 10 April 2019].
- [14] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, DIN EN 12150-1: Glas im Bauwesen Thermisch vorgespanntes Kalknatron-Einscheiben-Sicherheitsglas - Teil 1: Definition und Beschreibung, Brüssel, 2015.
- [15] Scholl GmbH, "www.glas-scholl.de," [Online]. Available: https://www.glasscholl.de/fachbegr/vsg.html. [Zugriff am 10 April 2019].
- [16] Ortsfeuerwehr Waltersdorf, "www.ortsfeuerwehr-waltersdorf.de," [Online]. Available: http://www.ortsfeuerwehrwaltersdorf.de/index.php?option=com\_content&view=article&id=12&Itemid=40.
   [Zugriff am 16 April 2019].
- [17] J. Kunkelmann, "Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweisen," Karlsruhe, 2013.
- [18] U. Schneider, "Umrechnungsfaktor; DIN 18 230-4: Ermittlung der äquivalenten Branddauer u. des Wärmeabzugs durch Brandsimulation," in *Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz 7. Auflage*, Renningen, expert verlag, 2014, pp. 301-380.
- [19] K. Kang, "Assessment of a model development for window glass breakage due to fire exposure in a field model," Elsevier, New York, USA, 2008.
- [20] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, ".fib-bwwwund.de," Juli
  2006. [Online]. Available: https://.fibbwwwund.de/Inhalt/Leitfaden/Brandschutz/brandschutzleitfaden-fuer-gebaeude-desbundes.pdf. [Zugriff am April 2019].
- [21] O. Nuyken, H. Samarian und D. Kunzmann, "www.chemgapedia.de," Wiley Information Services GmbH, [Online]. Available:

http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/polymere\_werkstoff/mol ekulare\_ordnung/glastemperatur/glastemperatur.vlu.html. [Zugriff am 13 April 2019].

- [22] R. Meili und M. Läubli, "www.glaswelt.de," Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG,
  [Online]. Available: https://www.glaswelt.de/gentner.dll/POPUP?CMD=IMG\_ZOOM&FID=599258&MID=11
   2170. [Zugriff am 12 April 2019].
- [23] K. Müller, "www.baufoerderer.de," Team Energie und Bauen, 15 April 2016. [Online]. Available: https://www.baufoerderer.de/bauberatung/bauphysik/waermeleitfaehigkeitwaermedurchgang-definition-und-grenzwerte-am-bau. [Zugriff am 24 April 2019].
- [24] J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/bauphysik/waermeschutzu-wert-waermedurchgangskoeffizient-159234. [Zugriff am 22 April 2019].
- [25] R. Meili und M. Läubli, "www.glaswelt.de," Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG,
  [Online]. Available: https://www.glaswelt.de/Archiv/Newsletter-Archiv/article-599282 112170/vorsicht-glasbruch-bei-iso-02-thermische-spannungen-als-ursache-.html.
  [Zugriff am 15 April 2019].
- [26] J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/schaeden/glasbruch-durchtemperaturzwang-159360. [Zugriff am 14 April 2019].
- [27] R. Maus, Glasbruch Ursachenforschung, 2015.
- [28] J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: https://www.baunetzwissen.de/glossar/b/bruchbild-51239. [Zugriff am 22 April 2019].
- [29] G. Siebert und I. Maniatis, Tragende Bauteile aus Glas Grundlagen, Konstruktion, Bemessung, Beispiele, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [30] J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online].
  Available: https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/basisglaeser/floatglas-159089. [Zugriff am 6 April 2019].
- [31] SIGAB Schweizerisches Institut für Glas am Bau, SIGAB-Richtlinie, Oktober, 2013.

- [32] J. Schneider und S. Schula, "www.baunetzwissen.de," BauNetz Media GmbH, [Online]. Available: https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/funktionsglaeser/verbundsicherheitsgl as-vsg-159103. [Zugriff am 6 April 2019].
- [33] M. Fahlbusch, "tuprints.ulb.tu-darmstadt.de," [Online]. Available: http://tuprints.ulb.tudarmstadt.de/962/2/Anhaenge.pdf. [Zugriff am April 2019].
- [34] J. Hietaniemi, *Probabilistic simulation of glass fracture and fallout in fire,* Finnland: VTT Information Service, 2005.
- [35] V. Babrauskas, "Glass breakage in fires," 2016.
- [36] Q. Xie, H. Zhang, Y. Wan, Q. Zhang und X. Cheng, "Full-scale experimental study on crack and fallout of toughened glass with different thicknesses," John Wiley & Sons, China, 2008.
- [37] H. Zhao, Q. Wang, Y. W. Y. Su, G. Shao, H. Chen und J. Sun, "Experimental Investigation on Glass Cracking for Wind Load Combined with Radiant Heating," in *Fire Science And Technology 2015*, Singapore, Springer Science + Business Media, 2017, pp. 255-260.
- [38] H. Chen, Y. Wang, Y. Zhang, Q. Wang, H. Zhao, G. Shao, Y. Su, J. Sun und L. He, "Crack evolution process of window glass under radiant heating," John Wiley & Sons, China, 2017.
- [39] HÖHBAUER GmbH, "www.hoehbauer.com," [Online]. Available: https://www.hoehbauer.com/fenster.html. [Zugriff am 12 April 2019].
- [40] Berg GmbH & Co. KG, "www.tischlerei-berg.de," [Online]. Available: https://www.tischlerei-berg.de/hochwertige-kunststofffenster-nach-mass/. [Zugriff am April 2019].
- [41] Presse Verlagsgesellschaft für Zeitschriften und neue Medien mbH, "www.journalfrankfurt.de," [Online]. Available: https://www.journalfrankfurt.de/journal\_news/Wirtschaft-7/Ganz-oben-Die-neuen-Tuerme-der-Deutschen-Bank-13720.html. [Zugriff am 20 April 2019].
- [42] B. Lippold, "www.chemie.de," LUMITOS AG, [Online]. Available: https://www.chemie.de/lexikon/Konvektion.html. [Zugriff am 9 Mai 2019].

XII

- [43] B. Weller und S. Tasche, Glasbau 2014, Dresden: Wilhelm Ernst & Sohn, 2014, pp. 205-215.
- [44] CPU Ingenieurgesellschaft mbH, "www.cpu-ing.net," 2012. [Online]. Available: https://www.cpu-ing.net/bibliothek-zur-hei%C3%9Fbemessung/etk-und-naturbrand/. [Zugriff am 5 Mai 2019].
- [45] J.-F. Cadorin und J.-M. Franssen, "A tool to design steel elements submitted to compartment fires - OZone V2 Part 1," in *Fire Safety Journal*, 2003, pp. 395-427.
- [46] D. Hosser, "Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes," Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., Altenberge; Braunschweig, 2013.
- [47] K. Wallasch und B. Stock, "Das Raumgitter und seine Abmessungen," in Das Fire Dynamics Simulator Handbuch - Brandsimulationen mit FDS, Norderstedt, Books on Demand GmbH, 2008, pp. 192-197.
- [48] U. Wickström, D. Duthinh und K. McGrattan, "Adiabatic Surface Temperature For Calculating Heat Transfer To Fire Exposed Structures," London, 2007.
- [49] U. Schneider, "Grundlagen der Modellierung von Bränden mit CFD-Modellen," in Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz 7. Auflage, Renningen, expert verlag, 2014, pp. 209-236.
- [50] K. Wallasch und B. Stock, "Einleitung," in *Das Fire Dynamics Simulator Handbuch* -*Brandsimulationen mit FDS*, Norderstedt, Books on Demand GmbH, 2008, pp. 20-23.
- [51] K. Grewolls und G. Grewolls, "Feldmodelle," in Praxiswissen Brandschutz Simulationen -Schneller Einstieg und kompaktes Wissen, Köln, Feuertrutz GmbH Verlag für Brandschutzpublikationen, 2012, pp. 49-58.
- [52] *ISO 9705-1: Reaction to fire tests Room corner test for wall and ceiling lining products,* Beuth, 2016.
- [53] I. Thomas, K. Moinuddin und I. Bennetts, "The Effect of Fuel Quantity and Location on Small Fires," Society and Fire Protection Engineers, Melbourne City, 2007.
- [54] D. Drysdale, "Some Practial Applications; Burning of Liquids," in An Introduction to Fire Dynamics, Edinburgh, John Wiley & Sons, 1999, p. 146; 163 f..

- [55] U. Schneider, "Grundlagen der Verbrennungsprozesse (Kapitel 5.2.2)," in Ingnieurmethoden im Baulichen Brandschutz, expert verlag, 2001, pp. 137-140.
- [56] C. Kusche, C. Knaust und U. Krause, "Experimentelle Untersuchungen zur Verbrennungseffektivität als Grundlage für Brandlastberechnungen der DIN 18230," Magdeburg, 2013.
- [57] N. Iqbal und M. H. Salley, "Chapter 3 Estimating Burning Characteristics of Liquid Pool Fire, Heat Release Rate, Burning Duration, and Flame Height," in *Fire Dynamic Tools*, Washington, 2004, pp. 3.1-3.6; 3.18.
- [58] K. Wallasch und B. Stock, "Überblick über die grafische Darstellung," in Das Fire Dynamics Simulator Handbuch - Brandsimulationen mit FDS, Norderstedt, Books on Demand GmbH, 2008, pp. 38-53.
- [59] "termofeuerfest.com," Termo Feuerfest, 2019. [Online]. Available: https://termofeuerfest.com/produkte/isolierendefeuerfeste/keramikfaserplatten.html. [Zugriff am 04 Juni 2019].
- [60] P. Lyding und M. Kessler, "www.energieheld.de," Energieheld GmbH, [Online]. Available: https://www.energieheld.de/fenster/fensterrahmen/holz-fenster. [Zugriff am 09 Juni 2019].
- [61] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, DIN EN 590:2017-10 Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge – Dieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren, 2017.
- [62] V. Babrauskas, "Heat Release Rates," in SFPE Handbook Of Fire Protection Engineering 5th Edition, Springer, 2016, pp. 863-867.

# **VIII ANHANG**

## VIII.I BESTIMMUNG DER EINGANGSPARAMETER

# Wärmefreisetzungsrate Dieselöl

	Brennstoff	maximale Verlustrate der freien `m"∞		Materia für f Brer	ilkonstante flüssige nnstoffe kβ	effe Verbrenn ΔI	ektive ungswärme Ic,eff	
	Dieselöl	0,045	0,045 kg/(m <sup>2</sup> ·s) 2,1 m <sup>-1</sup>		m <sup>-1</sup>	44.400 kJ/kg		]
Abmessungen I x b	Fläche der Brandquelle A <sub>f</sub> = l x b		Durchmesser der Brandquelle D = ((4 · A <sub>f</sub> ) / $\pi$ ) <sup>(1/2)</sup>		Verlustrate Verbrenn `m" = `m"∞	e der freien ungsrate · (1 - e <sup>(-kβD)</sup> )	Wärmefreisetzungsrat `Q = A <sub>f</sub> · `m'' · ΔH <sub>c,eff</sub>	
0,54 m x 0,54 m	0,2916	m²	0,61	т	0,033	kg/(m²·s)	427,25	kW
0,60 m x 0,60 m	0,3600	m²	0,68	m	0,035	kg/(m²·s)	559,44	kW
0,70 m x 0,70 m	0,4900	m²	0,79	m	0,037	kg/(m²·s)	804,97	kW
0,80 m x 0,80 m	0,6400	m²	0,90	т	0,039	kg/(m²·s)	1108,22	kW
0 90 m v 0 90 m	0.8100	m <sup>2</sup>	1.02	m	0.040	ka/(m²·s)	1438.56	kW

## VIII.II ERGEBNISSE DER BRANDSIMULATIONEN 1









### ISO-Raum: Pool Brand 540 mm x 540 mm / 10 mm ESG







ISO-Raum: Pool Brand 800 mm x 800 mm / 6 mm ESG







ISO-Raum: Pool Brand 800 mm x 800 mm / 10 mm ESG







ISO-Raum: Pool Brand 900 mm x 900 mm / 6 mm ESG







### ISO-Raum: Pool Brand 900 mm x 900 mm / 10 mm ESG







# VIII.III ERGEBNISSE DER BRANDSIMULATIONEN 2 (TESTSIMULATION)

# <u>Formblätter</u>

Τe	Testraum - Variante 1					Testraum - ¥ariante 2					Testraum - Variante 3				
Zeit t	Ar	Αv	ΔΤ Α	1	Zeit t	Ar	Αv	ΔΤ Α		Zeit t	Ar	Αv	AT A		
[s]	['0]	[°C]	[K]	1	[5]	['0]	[°C]	[K]		[5]	1.01	101	[K]		
0,00	20,000000	20,00	0,00	1	0,00	20,000000	20,00	0,00		0,00	20,000000	20,00	0,00		
1,00	20,000000	20,00	0,00	I I	1,00	19,999999	20,00	0,00		1,00	20,000000	20,00	0,00		
2,03	20,000000	20,00	0,00	I I	2,03	20,000000	20,00	0,00		2,03	20,000000	20,00	0,00		
3,01	20,000000	20,00	0,00	I I	3,01	20,000000	20,00	0,00		3,01	20,000000	20,00	0,00		
4,00	20,000000	20,01	0,01	I I	4,00	20,000000	20,01	0,01		4,00	20,000000	20,01	0,01		
5,00	20,000000	20,01	0,02	I I	5,00	20,000000	20,01	0,02		5,00	20,000000	20,01	0,02		
6,00	20,000000	20,02	0,03	I I	6,01	20,000000	20,02	0,03		6,00	20,000000	20,02	0,03		
7,01	20,000000	20,05	0,07	I I	7,01	20,000000	20,05	0,06		7,01	20,000000	20,05	0,07		
8,01	20,000000	20,09	0,12	I I	8,00	20,000000	20,09	0,12		8,01	20,000000	20,09	0,12		
9,01	20,000000	20,16	0,18	I I	9,00	20,000000	20,17	0,19		9,01	20,000000	20,16	0,18		
10,01	20,000000	20,21	0,27	I I	10,00	20,000000	20,23	0,26		10,01	20,000000	20,21	0,27		
11,01	20,000000	20,29	0,33	I I	11,01	20,000000	20,30	0,32		11,01	20,000000	20,29	0,33		
12,00	20,000000	20,40	0,43	I I	12,00	20,000000	20,42	0,51		12,00	20,000000	20,40	0,43		
13,00	20,000000	20,51	0,61	I I	13,00	20,000000	20,56	0,60		13,00	20,000000	20,51	0,61		
14,00	20,000000	20,67	0,73	I I	14,01	20,000000	20,62	0,67		14,00	20,000000	20,67	0,73		
15,00	20,000000	20,84	0,97	I I	15,00	20,000000	20,84	0,94		15,00	20,000000	20,84	0,95		
16,01	20,000000	21,07	1,12	I I	16,00	20,000000	21,11	1,17		16,00	20,000000	20,93	0,94		
17,01	20,000000	21,17	1,25	I I	17,01	20,000000	21,19	1,25		17,00	20,000000	21,03	1,10		
18,00	20,000000	21,31	1,35		18,01	20,000000	21,28	1,31		18,00	20,000000	21,18	1,21		
19,01	20,000000	21,40	1,91		19,00	20,000000	21,37	1,91		19,01	20,000000	21,30	1,35		
20,00	20,000000	21,03	1,97	I I	20,00	20,000000	21,48	1,93		20,00	20,000000	21,38	1,41		
21,00	20,000000	21,60	1,07		21,01	20,000000	21,00	1,68		21,01	20,000000	21,48	1,53		
22,00	20,000000	21,00	1,00		22,01	20,000000	21,71	1,70		22,01	20,000000	21,60	1,63		
23,01	20,000000	21,70	1,194		23,01	20,000000	21,70	1,72		23,01	20,000000	21,68	1,72		
25.00	20,000000	21,05	1,07		25,00	20,000000	21,10	1.89		24,01	20,000000	21,70	1,03		
26,00	20,0000001	21.92	2.00	I I	26.00	20,000000	21.92	2.04		20,01	20,000000	21,00	2.11		
27.01	20,000001	22.12	2,00		27.01	20,000000	22.09	2,04		27.01	20,000001	21,30	2,0		
28.00	20,000001	22.18	2.24	I I	28.01	20,000000	22.17	2.23		29.01	20,000001	22,0	2,00		
29.01	20.000001	22.27	2.28		29.01	20.000000	22.24	2.25		29.00	20,000001	22,10	2.00		
30.01	20.000001	22.25	2.27		30.00	20.000000	22.29	2.27		30.01	20,000001	22,21	2,25		
31.01	20.000001	22.36	2.43	I I	31.00	20.000000	22.37	2.41		31.01	20.000001	22 41	2 43		
32.01	20,000001	22,47	2,49		32.00	20,000000	22,45	2,50		32.00	20.000001	22.47	2.49		
33,00	20,000001	22,55	2,62	I I	33.01	20,000000	22,57	2,68		33.01	20.000001	22.54	2.60		
34,01	20,000001	22,68	2,74		34,01	20,000000	22,66	2,63		34.01	20.000001	22.66	2.72		
35,00	20,000002	22,76	2,79	I I	35,01	20,000000	22,68	2,68		35.01	20.000002	22.76	2.78		
36,00	20,000002	22,85	2,90		36,01	20,000000	22,67	2,66		36.00	20,000002	22.81	2,80		
37,00	20,000002	22,95	2,98		37,01	20,000000	22,73	2,82		37,01	20,000002	22,82	2,84		
38,00	20,000002	23,02	3,07		38,01	20,000000	22,88	2,93		38,00	20,000002	22,88	2,93		
39,01	20,000003	23,08	3,11		39,00	20,000000	22,95	3,01		39,00	20,000003	23,01	3,09		
40,00	20,000003	23,16	3,22		40,01	20,000000	23,06	3,09		40,00	20,000003	23,10	3,10		
41,01	20,000004	23,22	3,23		41,01	20,000000	23,13	3,20		41,01	20,000004	23,17	3,19		
42,01	20,000005	23,24	3,25		42,00	20,000000	23,21	3,25		42,00	20,000005	23,23	3,37		
43,00	20,000006	23,27	3,27	I I	43,01	20,000000	23,28	3,30		43,00	20,000006	23,35	3,35		
44,01	20,000008	23,35	3,42	I I	44,00	20,000000	23,32	3,36		44,00	20,000008	23,34	3,34		
45,01	20,000011	23,47	3,48	L	45,01	20,000000	23,41	3,44		45,01	20,000010	23,39	3,45		
46,01	20,000015	23,50	3,51	L	46,01	20,000000	23,45	3,47		46,00	20,000014	23,50	3,53		
47,01	20,000022	23,54	3,59	L	47,00	20,000000	23,53	3,53		47,00	20,000020	23,54	3,53		
48,01	20,000031	23,60	3,65	L	48,01	20,000000	23,58	3,61		48,01	20,000028	23,57	3,65		
49,01	20,000044	23,65	3,65		49,00	20,000000	23,62	3,65		49,00	20,000040	23,68	3,71		
50,00	20,000060	23,69	3,70	I I	50,00	20,000000	23,70	3,75		50.00	20,000055	23,73	3.77		

### Variante 1



Variante 2



# Variante 3



# VIII.IV ERGEBNISSE DER BRANDSIMULATIONEN 3 (OPTIMIERT)



#### ISO-Raum: Pool Brand 800 mm x 800 mm / 6 mm ESG





### ISO-Raum: Pool Brand 800 mm x 800 mm / 10 mm ESG







ISO-Raum: Pool Brand 900 mm x 900 mm / 6 mm ESG







### ISO-Raum: Pool Brand 900 mm x 900 mm / 10 mm ESG







# VIII.V FDS QUELLCODE

Exemplarisch:

Simulation 3-1: Glasdicke 6 mm, Pool Brand Abmessungen 800 mm x 800 mm

&HEAD CHID='ISO-Raum\_6mm\_800x800\_V3'/

&TIME T\_END=1400.0/

&DUMP RENDER\_FILE='ISO-Raum\_6mm\_800x800\_V3.ge1', COLUMN\_DUMP\_LIMIT=.TRUE., DT\_DEVC=1.0, DT\_PL3D=10.0, DT\_RESTART=300.0, DT\_SLCF=1.0, WRITE\_XYZ=.TRUE., PLOT3D\_QUANTITY='TEMPERATURE','U-VELOCITY','V-VELOCITY','W-VELOCITY', 'VELOCITY',

&MESH ID='Mesh01', IJK=84,60,55, XB=0.0,4.2,0.0,3.0,-0.1,2.65/

&REAC ID='Dieselbrand',

FUEL='REAC\_FUEL', C=1.0, H=1.9167, AUTO\_IGNITION\_TEMPERATURE=0.0,

SOOT\_YIELD=0.097,

HEAT\_OF\_COMBUSTION=4.5E4/

&DEVC ID='A\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.4005,2.075559, IOR=-2/

&DEVC ID='A\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.46,2.022532, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_A', XYZ=1.,0.5,2., SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VAL-UE', CTRL\_ID='DeltaT\_A', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_A', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='A\_v', 'A\_r'/

&DEVC ID='B\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.827113,0.4005,1.674835, IOR=-2/

&DEVC ID='B\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.775362,0.46,1.674835, IOR=2/ &DEVC ID='Temperaturdifferenz\_B', XYZ=1.,0.5,1., SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VAL-UE', CTRL\_ID='DeltaT\_B', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_B', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='B\_v', 'B\_r'/

&DEVC ID='C\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.4005,1.271195, IOR=-2/

&DEVC ID='C\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.46,1.324222, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_C', XYZ=1.5,0.5,2., SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_C', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_C', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='C\_v', 'C\_r'/

&DEVC ID='D\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.024326,0.4005,1.674835, IOR=-2/

&DEVC ID='D\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.076076,0.46,1.674835, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_D', XYZ=1.,0.5,1.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_D', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_D', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='D\_v', 'D\_r'/

&DEVC ID='E\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.4005,1.126106, IOR=-2/

&DEVC ID='E\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.46,1.084122, IOR=2/ &DEVC ID='Temperaturdifferenz\_E', XYZ=1.5,0.5,2., SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_E', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_E', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='E\_v', 'E\_r'/

&DEVC ID='F\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.827113,0.4005,0.723332, IOR=-2/

&DEVC ID='F\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.775362,0.46,0.723332, IOR=2/ &DEVC ID='Temperaturdifferenz\_F', XYZ=1.,0.5,0.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_F', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_F', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='F\_v', 'F\_r'/

&DEVC ID='G\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.4005,0.323029, IOR=-2/

&DEVC ID='G\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.424629,0.46,0.374769, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_G', XYZ=1.5,0.5,0.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_G', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_G', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='G\_v', 'G\_r'/

&DEVC ID='H\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.024326,0.4005,0.723332, IOR=-2/

&DEVC ID='H\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=1.076076,0.46,0.723332, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_H', XYZ=1.,0.5,2.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_H', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_H', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='H\_v', 'H\_r'/

&DEVC ID='I\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=2.375833,0.4005,2.074677, IOR=-2/

&DEVC ID='I\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=2.375833,0.46,2.02446, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_I', XYZ=2.5,0.5,2., SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VAL-UE', CTRL\_ID='DeltaT\_I', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_I', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='I\_v', 'I\_r'/

&DEVC ID='J\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=2.776853,0.4005,1.674835, IOR=-2/

&DEVC ID='J\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=2.725102,0.46,1.674835, IOR=2/ &DEVC ID='Temperaturdifferenz\_J', XYZ=2.5,0.5,1.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_J', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_J', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='J\_v', 'J\_r'/

&DEVC ID='K\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=2.776853,0.4005,0.723332, IOR=-2/

&DEVC ID='K\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=2.725102,0.46,0.723332, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_K', XYZ=2.5,0.5,0.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_K', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_K', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='K\_v', 'K\_r'/

&DEVC ID='L\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=2.375833,0.4005,0.322685, IOR=-2/

&DEVC ID='L\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=2.375833,0.46,0.372902, IOR=2/

&DEVC ID='Temperaturdifferenz\_L', XYZ=2.5,0.5,0.4, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_L', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_L', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='L\_v', 'L\_r'/

&DEVC ID='M\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.974066,0.4005,0.723332, IOR=-2/

&DEVC ID='M\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=2.025816,0.46,0.723332, IOR=2/ &DEVC ID='Temperaturdifferenz\_M', XYZ=1.4,0.5,1.0, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_M', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_M', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='M\_v', 'M\_r'/

&DEVC ID='N\_r', DEPTH=1.0E-3, QUANTITY='INSIDE WALL TEMPERATURE', XYZ=1.974066,0.4005,1.674835, IOR=-2/

&DEVC ID='N\_v', QUANTITY='WALL TEMPERATURE', XYZ=2.025816,0.46,1.674835, IOR=2/ &DEVC ID='Temperaturdifferenz\_N', XYZ=2.0,0.6,1.5, SETPOINT=200., QUANTITY='CONTROL VALUE', CTRL\_ID='DeltaT\_N', INITIAL\_STATE=.TRUE./

&CTRL ID='DeltaT\_N', FUNCTION\_TYPE='SUBTRACT', INPUT\_ID='N\_v', 'N\_r'/

&MATL ID='CONCRETE',

FYI='Stahlbeton C30-C37',

SPECIFIC\_HEAT=1.0,

CONDUCTIVITY=2.1,

DENSITY=2400.0/

&MATL ID='CERAMIC FIBER',

FYI='NBSIR 88-3752 - NBS Multi-Room Validation',

SPECIFIC\_HEAT=1.04,

CONDUCTIVITY\_RAMP='CERAMIC FIBER\_CONDUCTIVITY\_RAMP',

DENSITY=300.0,

EMISSIVITY=0.97/

&RAMP ID='CERAMIC FIBER\_CONDUCTIVITY\_RAMP', T=20.0, F=0.09/

&RAMP ID='CERAMIC FIBER\_CONDUCTIVITY\_RAMP', T=300.0, F=0.09/

&RAMP ID='CERAMIC FIBER\_CONDUCTIVITY\_RAMP', T=600.0, F=0.17/

&RAMP ID='CERAMIC FIBER\_CONDUCTIVITY\_RAMP', T=900.0, F=0.25/

&MATL ID='GLASS',

FYI='Verglasung',

SPECIFIC\_HEAT=0.72,

CONDUCTIVITY=0.75,

DENSITY=2500.0,

EMISSIVITY=0.85/

&MATL ID='TIMBER',

FYI='Fensterrahmen',

SPECIFIC\_HEAT=2.85,

CONDUCTIVITY=0.14,

DENSITY=640.0/

&SURF ID='Brand\_xMW',

COLOR='RED',

HRRPUA=1731.6,

RAMP\_Q='Brand\_xMW\_RAMP\_Q'/

&RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=0.0, F=0.0/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=100.0, F=0.61/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=200.0, F=0.76/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=300.0, F=0.83/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=400.0, F=0.92/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=500.0, F=1.0/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=600.0, F=1.0/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=700.0, F=0.61/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=800.0, F=0.42/ &RAMP ID='Brand xMW RAMP Q', T=900.0, F=0.26/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=1000.0, F=0.12/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=1100.0, F=0.05/ &RAMP ID='Brand xMW RAMP Q', T=1200.0, F=0.02/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=1300.0, F=0.02/ &RAMP ID='Brand\_xMW\_RAMP\_Q', T=1400.0, F=0.0/ &SURF ID='BETON',

COLOR='GRAY 60',

BACKING='VOID',

MATL\_ID(1,1)='CONCRETE',

MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=0.1,

GEOMETRY='CARTESIAN',

LENGTH=0.0,

WIDTH=0.0/

&SURF ID='Keramikfaserplatte\_20mm',

RGB=230,222,193,

MATL\_ID(1,1)='CERAMIC FIBER',

MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=0.02/

&SURF ID='GLAS\_6mm',

RGB=0,180,213,

TRANSPARENCY=0.701961,

MATL\_ID(1,1)='GLASS',

MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=6.0E-3,

GEOMETRY='CARTESIAN',

LENGTH=0.0,

WIDTH=0.0/

&SURF ID='Fensterrahmen\_Holz\_50mm',

RGB=204,102,0,

MATL\_ID(1,1)='TIMBER',

MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,

THICKNESS(1)=0.05/

&SURF ID='Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz',

RGB=204,102,0,

MATL ID(1,1)='TIMBER',

MATL\_ID(2,1)='GLASS',

MATL\_ID(3,1)='TIMBER',

MATL\_MASS\_FRACTION(1,1)=1.0,

MATL\_MASS\_FRACTION(2,1)=1.0,

MATL\_MASS\_FRACTION(3,1)=1.0,

THICKNESS(1:3)=0.05,6.0E-3,0.05/

&OBST ID='Brand', XB=1.5,2.3,1.3,2.1,0.0,0.055, SURF\_IDS='Brand\_xMW','INERT','INERT'/ &OBST ID='Wand', XB=0.0,0.05,0.45,2.95,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=0.0,1.0,0.35,0.45,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=0.0,3.8,2.95,3.0,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=0.05,0.1,0.5,2.9,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=0.05,1.0,0.45,0.5,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=0.05,3.75,2.9,2.95,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=1.0,1.85,0.35,0.45,0.0,0.3, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Wand', XB=1.0,1.85,0.45,0.5,0.0,0.3, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=1.0,1.85,0.35,0.45,1.15,1.25, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=1.0,1.85,0.45,0.5,1.15,1.25, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=1.0,1.85,0.35,0.45,2.1,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=1.0,1.85,0.45,0.5,2.1,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=1.85,1.95,0.35,0.45,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Wand', XB=1.85,1.95,0.45,0.5,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=1.95,2.8,0.35,0.45,0.0,0.3, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=1.95,2.8,0.45,0.5,0.0,0.3, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=1.95,2.8,0.35,0.45,2.1,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=1.95,2.8,0.45,0.5,2.1,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=2.8,3.75,0.45,0.5,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=2.8,3.8,0.35,0.45,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Wand', XB=3.7,3.75,0.5,1.3,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=3.7,3.75,2.1,2.9,0.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=3.7,3.75,1.3,2.1,2.0,2.4, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&OBST ID='Wand', XB=3.75,3.8,0.45,1.3,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/ &OBST ID='Wand', XB=3.75,3.8,2.1,2.95,0.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Wand', XB=3.75,3.8,1.3,2.1,2.0,2.45, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Glas1', XB=1.05,1.8,0.4,0.45,1.3,2.05, SURF\_ID='GLAS\_6mm', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_A', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_B', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_C', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_D'/

&OBST ID='Glas2', XB=1.05,1.8,0.4,0.45,0.35,1.1, SURF\_ID='GLAS\_6mm', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_E', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_F', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_G', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_H'/

&OBST ID='Glas3', XB=2.0,2.75,0.4,0.45,0.35,2.05, SURF\_ID='GLAS\_6mm', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_I', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_J', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_K', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_L', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_M', DEVC\_ID='Temperaturdifferenz\_N'/ &OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.0,1.85,0.35,0.5,1.25,1.3, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.0,1.85,0.35,0.5,2.05,2.1, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.0,1.05,0.35,0.5,1.3,2.05, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.8,1.85,0.35,0.5,1.3,2.05, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.0,1.85,0.35,0.5,0.3,0.35, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen Holz 50mm','Fensterrahmen Holz 50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.0,1.85,0.35,0.5,1.1,1.15, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.0,1.05,0.35,0.5,0.35,1.1, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.8,1.85,0.35,0.5,0.35,1.1, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.95,2.8,0.35,0.5,0.3,0.35, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.95,2.8,0.35,0.5,2.05,2.1, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/ &OBST ID='Fensterrahmen', XB=1.95,2.0,0.35,0.5,0.35,2.05, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Fensterrahmen', XB=2.75,2.8,0.35,0.5,0.35,2.05, SURF\_ID6='Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz-Glas-Holz','Fensterrahmen\_Holz\_50mm','Fensterrahmen\_Holz\_50mm'/

&OBST ID='Boden', XB=0.0,3.8,0.35,3.0,-0.1,0.0, COLOR='GRAY 60', BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Decke\_Beton', XB=0.0,3.8,0.35,3.0,2.45,2.5, COLOR='GRAY 60', BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='BETON'/

&OBST ID='Decke\_Keramikfaserplatte', XB=0.05,3.75,0.45,2.95,2.4,2.45, RGB=245,238,153, BNDF\_OBST=.FALSE., SURF\_ID='Keramikfaserplatte\_20mm'/

&VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [XMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=4.2,4.2,0.0,3.0,-0.1,2.65/ &VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [YMIN]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.2,0.0,0.0,-0.1,2.65/ &VENT ID='Mesh Vent: Mesh01 [ZMAX]', SURF\_ID='OPEN', XB=0.0,4.2,0.0,3.0,2.65,2.65/

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=1.45/ &SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., CELL\_CENTERED=.TRUE., PBX=2.4/

&TAIL /