

# Anwendung von Brandsimulationsmodellen zur Rekonstruktion von Brandverläufen

Rekonstruktion eines Zimmerbrandes aufgrund des Spurenbildes  
unter Anwendung des Feldmodells „Fire Dynamics Simulator“ (FDS)



Master-Thesis zur Erlangung des akademischen Grades

**Master of Science in Fire Safety Management**

eingereicht am Zentrum für Praxisorientierte Informatik

der Donau-Universität Krems

Michael Pulker

Krems, am 18.05.2010



Donau-Universität Krems, Zentrum für Praxisorientierte Informatik  
Department für Governance und Public Administration

Diese Arbeit entstand unter der Begleitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider,  
Vorstand des Institutes für Hochbau und Technologie der Technischen Universität Wien.

## **Erklärung**

Ich versichere hiermit wahrheitsgemäß, dass diese Master-Thesis bis auf die, den Betreuern bereits bekannten Hilfen selbständig angefertigt, alle Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus der Arbeit anderer unverändert oder mit Änderungen entnommen wurde.

Krems, am 18.05.2010

## Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich...

...bei meinem Betreuer Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. techn. Dr.h.c. Ulrich Schneider von der Technischen Universität Wien für die kompetente und freundliche Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

...bei meinem Studienkollegen Brandursachenermittler Frank D. Stolt, mit dem ich gemeinsam den Brandversuch plante bzw. durchführte und der mir wertvolle Anregungen und Gedankenanstöße zum Thema Brandursachenermittlung und Brandverlauf vermittelte.

...bei der Freiwilligen Feuerwehr St. Pölten – Stadt unter der Führung von Branddirektor Dietmar Fahrafellner für die Zurverfügungstellung der Rauchdurchzündungsanlage und des gesamten Feuerwehrequipments, welches im Rahmen des Brandversuches benötigt wurde. Weiters bedanke ich mich bei den rund 20 Helfern der Freiwilligen Feuerwehr St. Pölten - Stadt, welche mich bei den Vorbereitungsarbeiten, bei der Versuchsdurchführung und bei den Aufräumarbeiten großartig unterstützt haben. Insbesondere Rainer Schwarz, Gabriel Hasenzagl, Anton Kraushofer und Tarik Basalic waren bei den Auf- und Abbauarbeiten eine großartige Hilfe.

...bei Ing. Christian Lebeda von der Technischen Universität Wien für die Zurverfügungstellung der Thermoelemente-Messeinrichtung und für die kompetente und freundliche Unterstützung bei Fachfragen zum Brandversuch und zur Brandsimulation.

...bei meiner Lehrgangisleiterin DI Monika Oswald für die freundliche und unkomplizierte Unterstützung bei allen organisatorischen Belangen.

...bei meinem ehemaligen Deutschlehrer SR Erich Mondl, welcher mir bei Detailfragen zur Rechtschreibung und Grammatik hilfreich zur Seite stand.

...bei Ing. Kurt Danzinger und DI Dieter Werner von der MA 39 der Stadt Wien für die Zurverfügungstellung des Sauerstoffmessgerätes.

...bei Helmut Stamberg von Stamberg News & Pictures, welcher vom Brandversuch professionelle Videoaufnahmen erstellte und technisches Equipment für die Kameraaufzeichnung zur Verfügung stellte.

...bei Familie Wagner, welche alte Möbel und die Couch für den Brandversuch zur Verfügung stellte.

...bei meinen Eltern Alfred und Annemarie Pulker, welche die Fensterscheiben und viele der Einrichtungsgegenstände für den Brandversuch zur Verfügung stellten.

...bei meinem Studienkollegen Gerhard Eichinger für die fotografische Dokumentation des Brandversuches.

Insbesondere möchte ich meiner Frau Sandra danken, welche mich jederzeit unterstützt und den nötigen Freiraum für das Studium und die Erstellung der Master-Thesis verschafft hat.

Ich widme diese Arbeit meiner Tochter Emily, welche am 18. November 2009 geboren wurde und die in den ersten Wochen und Monaten ihres Lebens, aufgrund der Erstellung dieser Arbeit des Öfteren auf ihren Papa verzichten musste.



# Abstract

## Anwendung von Brandsimulationsmodellen zur Rekonstruktion von Brandverläufen

Rekonstruktion eines Zimmerbrandes aufgrund des Spurenbildes unter Anwendung des Feldmodells „Fire Dynamics Simulator“ (FDS)

**Name Autor:** Michael Pulker

**Lehrgang/Jahrgang:** Fire Safety Management 2008/2010

### Hintergrund:

Die Anwendung von Brandsimulationsmodellen hat sich in den letzten Jahren als bewährtes und von Brandschutzingenieuren immer häufiger genutztes Verfahren zur Beurteilung komplexer Fragestellungen im vorbeugenden Brandschutz entwickelt. Basis dieser Anwendung sind klar definierte Randbedingungen wie z. B. definierte Brandszenarien (Design Fires), Schutzzieldefinitionen, Regelwerke und Fachliteratur, welche die Eingangsparameter für die Brandsimulation vorgeben.

Dieser Umstand legt den Schluss nahe, Brandsimulationsmodelle auch einzusetzen, um Verläufe von tatsächlichen Bränden nachzuvollziehen und die daraus gewonnen Erkenntnisse z. B. im Rahmen der Brandursachenermittlung weiter zu verwenden. Diesbezügliche Richtlinien und Vorgaben, um aufgrund der Brandspuren die entsprechenden Brandszenarien im Simulationsmodell zu rekonstruieren, existieren allerdings nicht.

### Hypothese:

Brandsimulationsmodelle sind unter bestimmten Voraussetzungen geeignete Werkzeuge, um aufgrund der Brandspuren die entsprechenden Brandverläufe zu rekonstruieren.

### Methoden und Belege:

Zur Überprüfung der Hypothese wurden bisherige Erkenntnisse über die Anwendung von Brandsimulationsmodellen zur Rekonstruktion von Brandereignissen recherchiert und entsprechende Fallbeispiele analysiert.

Zur praktischen Untermauerung der Hypothese wurde ein Zimmerbrand unter definierten Bedingungen nachgestellt (Realbrandversuch), um in weiterer Folge mittels des Brandsimulationsmodelles „Fire Dynamics Simulator“ zu untersuchen, inwieweit es möglich ist, aufgrund des nach dem Brand vorhandenen Spurenbildes den Brandverlauf zu rekonstruieren. Die Auswertung erfolgte durch Analyse des Brandverlaufes sowie durch Gegenüberstellung der Messergebnisse vom Versuch und von den Simulationen. Als Zusammenfassung wurde ein Katalog erstellt, in dem definiert ist, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um ein Brandereignis mittels Simulationsverfahren zu rekonstruieren.

### These:

Brandsimulationsmodelle sind aufgrund des nach dem Brand vorhandenen Spurenbildes grundsätzlich zur Rekonstruktion von Brandverläufen geeignet. Wesentliche Kriterien für die Qualität und Aussagekraft der einzelnen Simulationsergebnisse sind neben Kenntnissen zu Art und Verteilung der Brandlasten auch Informationen zur Zündquelle (Quellterm) und zu den Ventilationsbedingungen.

**Betreuer:** Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. techn.  
Dr.h.c. Ulrich Schneider

**Datum:** 18.05.2010

**Schlagwortkatalog:** Brandsimulation, Brandsimulationsmodelle, Brandursachenermittlung, Brandversuch, FDS, Feldmodell, Fire Dynamics Simulator, Rekonstruktion des Brandverlaufes, Zonenmodell



# Abstract

## Application of fire simulation models for the reconstruction of fire events

Reconstruction of a room fire based on its traces by using the field model "Fire Dynamics Simulator" (FDS)

**Name author:** Michael Pulker

**Course/Year:** Fire Safety Management 2008/2010

### Background:

For fire prevention engineers the application of fire simulation models has developed into a proven and widely used technique for the evaluation of complex investigations into fire prevention. The basis of this application are clearly defined conditions as e. g. predefined design fires, precise definitions of prevention aims, regulations and background literature, which set the introductory parameters for fire simulation.

This circumstance implies the application of fire simulation models for the re-construction of actual fires, i. e. for recording the results for further use e. g. in the investigation of causes of actual fire events. Nevertheless, regulations and pre-conditions referring to the reconstruction of fire scenarios by simulation models do not yet exist.

### Hypothesis:

Fire simulation models are apt tools for the reconstruction of fire events by their respective traces.

### Method and evidence:

For verifying this hypothesis hitherto findings about the application of fire simulation models have been investigated and respective case samples have been analysed.

For proving this hypothesis in practice a room fire was simulated under pre-defined conditions for the subsequent investigation by the „fire dynamics simulator“ fire simulation model (a constraint fire experiment) in order to find out in how far it is possible to reconstruct a fire event by means of its traces. The evaluation was done by both a close analysis of events of fire and a comparison of the measuring results of both the experiment and the simulations. As a conclusion a summary catalogue was developed defining the prerequisites for a reconstruction of fire events which have to come true for the proper simulation of an event of fire.

### Thesis:

Fire simulation models are basically applicable for the reconstruction of events of fire by following their evident traces. The essential criterion for the quality and relevance of the various simulation results – going beyond the knowledge about kinds and distribution of fire loads – is information about the ignition source (source term) and the conditions of ventilation.

**Supervisor:** Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. techn.  
Dr.h.c. Ulrich Schneider

**Date:** 18.05.2010

**Subject catalogue:** CFD, computational fluid dynamics, FDS, field model, Fire Dynamics Simulator, fire scene reconstruction, fire simulation, fire test, models for fire simulation, post-fire investigations, zone model

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
1.1 Motivation, Vorgehensweise und Ziele der Arbeit .....	3
1.2 Allgemeine Informationen zu Brandsimulationsmodellen.....	3
1.2.1 Empirisch belegte Ansätze und physikalische Gesetzmäßigkeiten .....	5
1.2.2 Zonenmodelle .....	5
1.2.3 Feldmodelle (Computational Fluid Dynamics – CFD) .....	6
1.3 Grundsätzliche Überlegungen zur Rekonstruktion von Brandverläufen mittels Brandsimulationsmodellen .....	8
1.3.1 Anwendungsmöglichkeiten von Brandsimulationsmodellen bei der Rekonstruktion von Brandverläufen .....	8
1.3.2 Auswahl des Brandsimulationsmodells für gegenständliche Arbeit.....	11
1.4 Beispiele für die Anwendung von FDS zur Rekonstruktion von Brandereignissen.....	12
1.4.1 Anschläge World Trade Center 2001 .....	13
1.4.2 Brand des „Station Nightclub“ auf Rhode Island .....	19
1.4.3 Dalmarnock Brandversuche .....	24
1.4.4 Erkenntnisse aus bereits durchgeführten und dokumentierten Rekonstruktionen von Brandereignissen mittels Brandsimulationsmodellen.....	26
<b>2 Der Brandversuch</b> .....	<b>27</b>
2.1 Warum wurde ein eigener Brandversuch durchgeführt? .....	27
2.2 Beschreibung des Versuchsraumes.....	27
2.2.1 Baubeschreibung.....	27
2.2.2 Raumausstattung .....	30
2.2.3 Messtechnik und Aufzeichnung.....	33
2.3 Ablauf des Brandversuches.....	36
2.3.1 Entzündung .....	36
2.3.2 Brandverlauf .....	37
2.4 Auswertung des Brandversuches.....	41
2.4.1 Auswertung der Messergebnisse .....	41
2.4.2 Auswertung des Spurenbildes im Anschluss an den Brandversuch .....	43
2.4.3 Fotografische Dokumentation der kalten Brandstelle .....	44
<b>3 Simulation des Brandversuches</b> .....	<b>47</b>
3.1 Das Brandsimulationsmodell „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) .....	47
3.1.1 Allgemeines .....	47
3.1.2 Programmfeatures.....	47
3.1.3 FDS – Hardware.....	48
3.1.4 FDS - Eingabeschnittstelle .....	48
3.1.5 FDS – Simulationsdurchführung .....	49
3.1.6 FDS – Auswertung .....	49
3.2 Eingangsparameter für die Brandsimulationen .....	50
3.2.1 Allgemeine Simulationsdaten .....	50
3.2.2 Gitternetz .....	50
3.2.3 Baulichen Gegebenheiten .....	51
3.2.4 Initialbrand – Grundsätzliche Überlegungen .....	53
3.2.5 Initialbrand - Brandleistungskurve .....	58
3.2.6 Ventilationsbedingungen .....	60

3.2.7	Einrichtungsgegenstände .....	62
3.2.8	Volumen- und Massenaufstellung der in der Simulation verwendeten Materialien .....	68
3.3	Brandsimulationen – Parameterstudie .....	69
3.4	Gegenüberstellung des Brandversuches zur Brandsimulation Nr. 14 .....	77
3.4.1	Gegenüberstellung der beobachteten Ereignisse .....	77
3.4.2	Gegenüberstellung der Messauswertung .....	79
3.4.3	Visueller Vergleich des Brandversuches und der Brandsimulation während des Brandes .....	82
3.4.4	Visueller Vergleich des Brandversuches und der Brandsimulation vor und nach dem Brand .....	84
3.4.5	Zusammenfassung der Gegenüberstellung des Brandversuches mit der Brandsimulation .....	87
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>Verzeichnis der Internet-Verweise .....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>93</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>95</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>95</b>
<b>10</b>	<b>Glossar .....</b>	<b>96</b>
<b>Anhang A:</b>	<b>Zitierte Webforumsbeiträge .....</b>	<b>97</b>
<b>Anhang B:</b>	<b>Messdatenauswertung des Brandversuches .....</b>	<b>99</b>
<b>Anhang C:</b>	<b>Gegenüberstellung Brandversuch &lt; &gt; Brandsimulation Nr. 14 .....</b>	<b>104</b>
<b>Anhang D:</b>	<b>Fotodokumentation des Versuchsraumes vor dem Brand .....</b>	<b>117</b>
<b>Anhang E:</b>	<b>Fotodokumentation des Brandversuches .....</b>	<b>119</b>
<b>Anhang F:</b>	<b>Auszüge aus der Videodokumentation des Brandversuches .....</b>	<b>121</b>
<b>Anhang G:</b>	<b>Fotodokumentation der kalten Brandstelle .....</b>	<b>131</b>
<b>Anhang H:</b>	<b>FDS-Eingangsparameter der Brandsimulation Nr. 14 .....</b>	<b>134</b>

## Kurzfassung

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung von Brandsimulationsmodellen zur Rekonstruktion von Brandverläufen.

Brandsimulationsmodelle werden in den letzten Jahren immer häufiger eingesetzt um komplexe Fragestellungen im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes zu beurteilen. Basis dieser Anwendung sind klar definierte Randbedingungen wie z. B. Brandleistungskurven (Design Fires), Schutzzieldefinitionen, Regelwerke und Fachliteratur, welche die Eingangsparameter für die Brandsimulation vorgeben.

Dieser Umstand legt den Schluss nahe, Brandsimulationsmodelle auch einzusetzen, um Verläufe von tatsächlichen Bränden nachzuvollziehen und die daraus gewonnen Erkenntnisse z. B. im Rahmen der Brandursachenermittlung weiter zu verwenden. Diesbezügliche Richtlinien und Vorgaben, um aufgrund der Brandspuren die entsprechenden Brandszenarien im Simulationsmodell zu rekonstruieren, existieren allerdings nicht.

Einleitend erfolgt im Kapitel 1 eine Unterscheidung der verschiedenen Varianten von Brandsimulationsmodellen und eine Bewertung inwieweit sich diese zur Rekonstruktion von Brandereignissen einsetzen lassen.

Anhand der Brände im World Trade Center und einem katastrophalen Nachtclubbrand in Rhode Island wird dargestellt in welcher Form das Feldmodell „Fire Dynamics Simulator“ in der Vergangenheit bereits zur Rekonstruktion von Brandereignissen eingesetzt wurde und welche Erkenntnisse daraus gewonnen werden konnten.

Anhand der Ergebnisse einer „Round Robin“ Studie welche im Rahmen der Dalmarnock Brandversuche in Glasgow durchgeführt wurde, wird dargestellt wie stark die Ergebnisse einer Brandsimulation von den Interpretationen des Modellanwenders abhängig ist.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit der Durchführung eines Realbrandversuches und der anschließenden Rekonstruktion des Brandverlaufes mittels des Brandsimulationsmodells „Fire Dynamics Simulator“ (FDS).

In Kapitel 2 sind der Aufbau und die Durchführung des Brandversuches beschrieben. Im Wesentlichen wurde in einem 16 m<sup>2</sup> großen Versuchsraum eine komplette Wohnzimmereinrichtung nachgebaut welche in weiterer Folge in Brand gesteckt wurde. Neben einer umfassenden Dokumentation mit mehreren Videokameras wurden zwei Wärmebildkameras sowie eine Vielzahl an Temperatur- und Sauerstoffsensoren zur Messdatenerfassung eingesetzt. Die Dokumentation und Auswertung dieser Messdaten ist ebenfalls im Kapitel 2 sowie in den Anhängen zu finden.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Rekonstruktion des Brandversuches mittels des Brandsimulationsmodells „Fire Dynamics Simulator“ (FDS). Einen Schwerpunkt bildet die Modellierung der Eingangsparameter wobei insbesondere die Brandursache (Initialbrand), die Ventilationsbedingungen (z.B. durch Glasbruch) und die Materialeigenschaften einer detaillierten Analyse unterzogen werden.

Insgesamt wurden 15 Brandsimulationen des Brandversuches durchgeführt wobei verschiedenste Parameter wie z.B. Initialbrand, Ventilationsbedingungen, Brandlast usw. variiert wurden. Jene Brandsimulation welche am ehesten dem beobachteten und gemessenen Brandverlauf entsprach wurde detailliert dem Realbrandversuch gegenübergestellt. Zusammenfassend wurde hierbei festgestellt, dass die Brandsimulation in vielen Punkten sehr gut mit dem Realbrand korreliert, wobei jedoch Eingangsparameter wie z.B. die Ventilationsbedingungen einen sehr großen Einfluss auf den Brandverlauf haben.

In Kapitel 4 wurde zusammenfassend festgestellt, dass es grundsätzlich möglich ist, nahezu jedes Brandszenario mittels eines geeigneten CFD-Modells relativ realistisch zu rekonstruieren. Die Qualität und Aussagekraft der Simulation ist jedoch von einer Vielzahl an Faktoren abhängig, wobei neben dem Initialbrand, die involvierten Brandlasten und die Ventilationsbedingungen die größte Rolle spielen. Nur wenn hier eine ausreichende Anzahl an Informationen zur Verfügung steht, kann die Simulation durch Parameterstudien entsprechend an den Realbrand angepasst werden. Stehen diese Daten nicht zur Verfügung, ist die Gefahr sehr groß, dass sich im Rahmen von Parameterstudien z. B. Fehler gegenseitig auslöschen.

Aufgrund der Literaturrecherche und den Erkenntnisse aus der Brandsimulationsreihe wurde im Kapitel 4 eine Art Leitfaden bzw. Checkliste erstellt, welche die wesentlichsten Punkte enthält die bei der Rekonstruktion von Brandereignissen mittels Brandsimulationsmodellen berücksichtigt werden müssen.

Die aufgestellte Hypothese, dass Brandsimulationsmodelle geeignete Werkzeuge sind, um aufgrund der Brandspuren die entsprechenden Brandverläufe zu rekonstruieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit somit bestätigt. Festgestellt wurde jedoch, dass für eine seriöse Anwendung des Brandsimulationsmodells eine Reihe zusätzlicher Informationen und Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um das Brandszenario realistisch rekonstruieren zu können.

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation, Vorgehensweise und Ziele der Arbeit

Die Anwendung von Brandsimulationsmodellen hat sich in den letzten Jahren als bewährtes und von Brandschutzingenieuren immer häufiger genutztes Verfahren zur Beurteilung komplexer Fragestellungen im vorbeugenden Brandschutz entwickelt. Basis dieser Anwendung sind klar definierte Randbedingungen wie z. B. definierte Brandszenarien (Design Fires), Schutzzieldefinitionen, Regelwerke und Fachliteratur, welche die Eingangsparameter für die Brandsimulation vorgeben.

Dieser Umstand legt den Schluss nahe, Brandsimulationsmodelle auch einzusetzen, um Verläufe von tatsächlichen Bränden zu rekonstruieren und die daraus gewonnen Erkenntnisse z. B. im Rahmen der Brandursachenermittlung weiterzuverwenden. Es gibt jedoch bislang keine Richtlinien und Vorgaben, wie und in welcher Form Simulationsmodelle angewandt werden können, um Brandszenarien aufgrund der vorhandenen Brandspuren zu rekonstruieren.

In den folgenden Unterkapiteln werden die grundsätzlichen Arten von Brandsimulationsmodellen unterschieden und es wird aufgrund von Literaturrecherchen analysiert, inwieweit Brandsimulationsmodelle bei der Rekonstruktion von Brandereignissen in der Vergangenheit eingesetzt wurden und welche Erkenntnisse daraus gewonnen werden konnten.

Um zu beweisen, dass Brandszenarien unter bestimmten Voraussetzungen mit geeigneten Brandsimulationsmodellen rekonstruiert werden können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Realbrandversuch (Zimmerbrand) durchgeführt. Aufgrund des nach dem Brand feststellbaren Spurenbildes wurden die Eingangsparameter für eine Serie von Brandsimulationen mittels des Programmes „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) aufgestellt.

Konkretes Ziel war es, die Eingangsparameter für die Simulation lediglich aufgrund der Untersuchung der „kalten“ Brandstelle aufzustellen, wobei im Rahmen der Simulationen mehrere unterschiedliche Zündquellen und Ventilationsbedingungen angenommen wurden, welche anschließend untereinander bzw. mit den Auswertungen des Realbrandversuches verglichen wurden.

In der Zusammenfassung wird analysiert und diskutiert, inwieweit Brandsimulationsmodelle geeignet sind, einen Brandverlauf zu rekonstruieren und welche Voraussetzungen dafür erfüllt sein müssen.

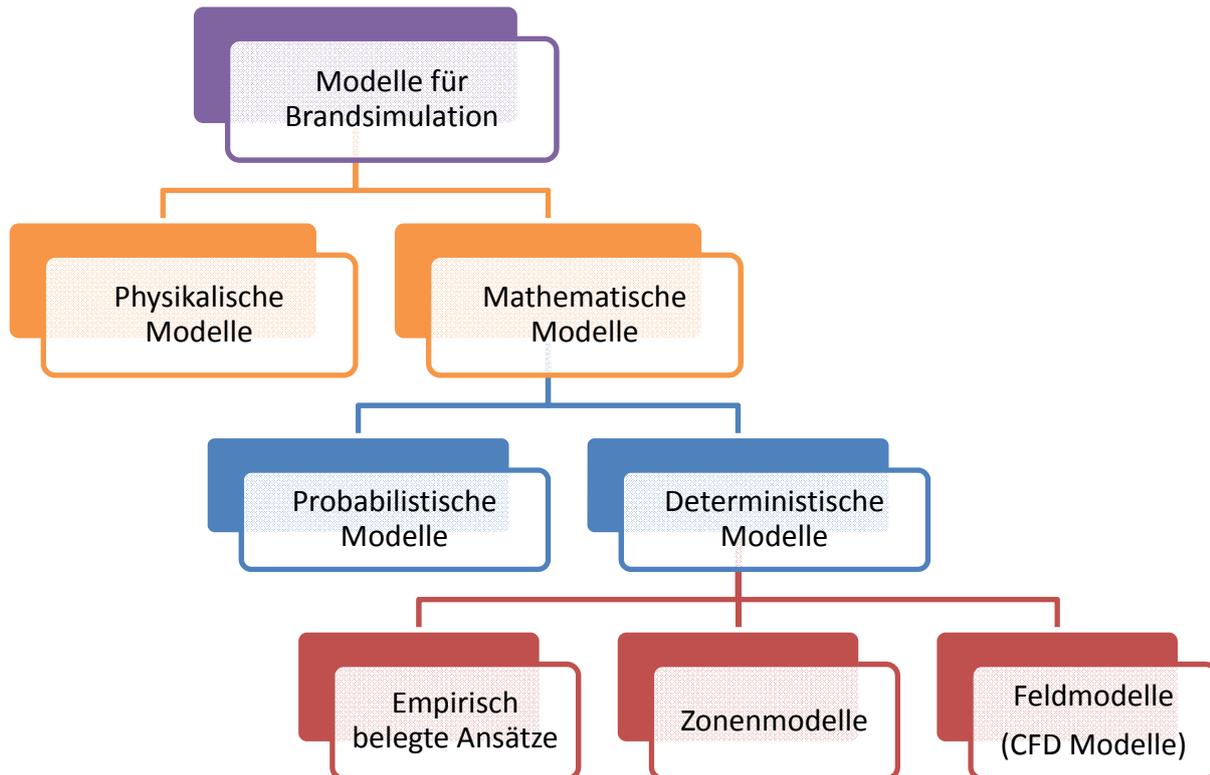
In der Arbeit wird nicht behandelt, inwieweit Brandsimulationsmodelle als „eigenständige“ Beweismittel in Straf- und Zivilprozessen geeignet sind.

## 1.2 Allgemeine Informationen zu Brandsimulationsmodellen

In diesem Unterkapitel werden die unterschiedlichen Arten von Brandsimulationsmodellen einer näheren Betrachtung unterzogen und in weiterer Folge wird eine Marktübersicht über die gängigsten Feldmodelle dargestellt.

Ein eigenes Kapitel befasst sich mit dem verwendeten Brandsimulationsmodell FDS („Fire Dynamics Simulator“) und der Begründung, warum dieses Modell für die gegenständliche Arbeit verwendet wurde.

Im Wesentlichen wird eine Reihe von Brandsimulationsmodellen unterschieden, die sich wie folgt gliedern:



**Abbildung 1: Darstellung der Arten von Brandsimulationsmodellen**

Im Wesentlichen können zwei Hauptgruppen von Brandsimulationsmodellen unterschieden werden:

1. Physikalische Modelle
2. Mathematische Modelle

Bei physikalischen Modellen wird ein Brandszenario unter realen Versuchsbedingungen (Großbrandversuche) oder unter der Berücksichtigung von Skalierungen und Ähnlichkeitsgesetzen in einem kleineren Maßstab reproduziert, wobei vor allem in der Brandforschung eine Reihe von Ähnlichkeitsgesetzen zu beachten ist.<sup>1</sup> In der gegenständlichen Arbeit werden diese physikalischen Modelle keiner näheren Betrachtung unterzogen.

Die zweite Art von Brandsimulationsmodellen sind die mathematischen Modelle, wobei hier grundlegend zwischen probabilistischen und deterministischen Modellen unterschieden wird:

*„Deterministische Modelle beschreiben die Brandentwicklung und den Brandverlauf für eine spezielle, vom Benutzer in Form von Rand- und Anfangsbedingungen zu präzisierende Ausgangssituation, welche die zeitliche Entwicklung des betrachteten Systems festlegen. Sie bestehen aus einer Zusammenstellung mathematischer Algorithmen, welche die als relevant eingeschätzten physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Abhängigkeiten beschreiben. Die deterministischen Modelle können sich erheblich in ihrer Komplexität unterscheiden.“*

*Die probabilistischen Modelle beschreiben Brände als eine Folge von Ereignissen und simulieren die Brandentwicklung auf der Basis von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Ereignisse sowie Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen bestimmten Zuständen. Die Schwierigkeit bei dieser Art von*

<sup>1</sup> Vgl. Hossler, 2009, S. 102.

*Modellen besteht allerdings darin, die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten aus statistischen Auswertungen von Beobachtungen oder Versuchsergebnissen bzw. aus Zuverlässigkeitsanalysen zu ermitteln.“<sup>2</sup>*

Rein probabilistische Modelle spielen im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes eine eher untergeordnete Rolle. In Verbindung mit deterministischen Modellen werden probabilistische Verfahren wie z. B. die Monte-Carlo-Simulation angewandt, um Risikowahrscheinlichkeiten oder Kosten-Nutzen-Analysen anzustellen. Im Zusammenhang mit der gegenständlichen Arbeit könnten probabilistische Methoden in Verbindung mit deterministischen Brandsimulationsmodellen angewandt werden, um z. B. die Wahrscheinlichkeit oder Unwahrscheinlichkeit bestimmter Varianten und Versionen zu bestimmen. Bei rechenintensiven deterministischen Modellen wie z. B. den Feldmodellen, stellt sich das Problem, dass derzeit nur mit sehr großem Zeitaufwand genügend Varianten und Versionen simuliert werden können, um entsprechende aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, d. h. die Methode ist derzeit noch absolut unrentabel und praktisch nicht durchführbar.

Bei den deterministischen Modellen werden folgende Varianten unterschieden:

1. Empirisch belegte Ansätze
2. Zonenmodelle (Ein- und Mehrraum Zonenmodelle)
3. Feldmodelle (Computational Fluid Dynamics – CFD)

### **1.2.1 Empirisch belegte Ansätze und physikalische Gesetzmäßigkeiten**

Bei den empirisch belegten Ansätzen werden vereinfachte mathematische Beziehungen aufgrund von Experimenten und Messreihen abgeleitet. Beispiele dafür sind z. B. die Beschreibung von Flammenhöhen oder Feuerplumes.<sup>3</sup> Andere Kenngrößen wie z. B. die Strahlungseinwirkung können durch physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben und berechnet werden. Großteils werden diese empirisch belegten Ansätze und physikalischen Gesetzmäßigkeiten auch in Zonenmodellen angewandt, um bestimmte Auswertungen wie z. B. die Berechnung der Plumetemperaturen anstellen zu können.

### **1.2.2 Zonenmodelle**

Bei Zonenmodellen wird grundsätzlich der Ansatz verfolgt, dass im Brandraum eine heiße Rauchgaszone (Überdruckzone) und eine kalte raucharme Schicht (Unterdruckzone) gebildet werden. Zwischen diesen beiden Schichten befindet sich eine neutrale Ebene, in der ein Druckgleichgewicht herrscht. Durch Aufstellung der jeweiligen Massen- und Energiebilanzgleichungen kann z. B. berechnet werden, wie viel Energie durch den Gaswechsel und die Strahlung bei Raumöffnungen entweicht.

Bei Zonenmodellen werden je nach Produkt auch folgende Parameter durch die entsprechenden Formelwerke berechnet:

- Wärmeströme ins Freie
- Strahlung durch Öffnungen
- Energieabsorption der Umfassungsbauteile
- Wärmespeicherenergie in den Gasen des Brandraumes
- Sonstige Wärmesenken z. B. durch Löschanlagen, Einbauten usw.
- Berechnung der Flammen und Feuerplume

---

<sup>2</sup> Hossler, 2009, S. 101.

<sup>3</sup> Vgl. Ebenda.

- Heiße Rauchgasströme im Deckenbereich (Ceiling Jet)
- Raum-Vollbrandmodell

Entsprechende ausgereifte Modelle wie z. B. MRFC (Multi Room Fire Code) sind in der Lage, eine Vielzahl von einzelnen Räumen aneinanderzureihen bzw. miteinander zu kombinieren, sodass auch Brandsimulationen in relativ komplexen Geometrien möglich sind.<sup>4</sup>

### 1.2.3 Feldmodelle (Computational Fluid Dynamics – CFD)

Der Berechnungsansatz der Feldmodelle besteht darin, dass das zu betrachtende Volumen in einzelne Kontrollvolumina (Gitternetzzenen) unterteilt wird. In weiterer Folge werden bei der Simulation die Interaktionen (Masse, Impuls und Energie) zwischen diesen einzelnen Kontrollvolumina berechnet. Aufgrund der hohen Rechenintensität, welche die Lösung dieser Modelle erfordern, werden Feldmodelle auch "Computational Fluid Dynamics" (CFD) genannt.

Physikalische Grundlage von CFD-Modellen sind die Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls, auch besser bekannt als Navier-Stokes-Gleichungen. Mit Hilfe dieser Differentialgleichungssysteme lassen sich dreidimensionale Strömungen in Gasen und Flüssigkeiten beschreiben, wobei drei Lösungsansätze unterschieden werden:

#### **Direct Numerical Simulation (DNS):**

Eine Möglichkeit der Lösung wäre die direkte numerische Simulation (DNS), dabei werden die Navier-Stokes-Gleichungen auf einem extrem feinen Gitter diskretisiert und numerisch gelöst. Weiters müssen bei diesem Verfahren die numerischen Zeitschritte sehr klein gewählt werden. Der Vorteil ist, dass z. B. auch sehr kleine Verwirbelungen genau beschrieben werden können. Aufgrund der Vorgaben (kleines Gitternetz und kleines Zeitinkrement) scheidet diese Variante für den Bereich der großvolumigen Brandsimulation jedoch aus, da die heute üblichen Rechenkapazitäten für so umfangreiche Berechnungen nicht ausreichen.

#### **Large Eddy Simulation (LES):**

Um diese Problem zu umgehen, arbeiten viele CFD-Modelle mit der LES. Dazu werden die Navier-Stokes-Gleichungen örtlich und zeitlich mit einem Tiefpassfilter gefiltert. So lassen sich die großen Wirbelstrukturen (d. h. die „large eddies“) direkt berechnen und die kleinen Strukturen werden über ein Turbulenzmodell abgebildet, wobei der LES zu Grunde liegt, dass die kleinen turbulenten Strukturen (Wirbel) isotrop sind, also keine bevorzugte Richtung haben. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die LES mit weit weniger Gitterpunkten als die DNS durchzuführen. Die meisten CFD-Brandsimulationsmodelle lösen die Navier-Stokes-Gleichungen mittels LES. Durch die Wegfilterung der kleinen Verwirbelungen werden jedoch auch gewisse Einschränkungen in Kauf genommen, so werden z. B. die Strömungsverhältnisse im Bereich der Grenze zu festen Körpern nicht aufgelöst. Je nach Art des Modells können solche Fehlerfaktoren zu einem gewissen Anteil berücksichtigt bzw. korrigiert werden.

#### **Reynolds Averaged by Navier-Stokes (RANS):**

Dieses Verfahren basiert auf der Reynolds-Mittelung der Navier-Stokes-Gleichungen. Dabei werden die Variablen in ihren Mittelwert und ihre Fluktuation zerlegt und anschließend zeitlich und/oder räumlich gemittelt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der größeren Gitterweite des Modells (und somit im geringeren Rechenaufwand), sein Nachteil besteht in der geringen Auflösung der Strömungsstrukturen.

---

<sup>4</sup> Vgl. Schneider, 2009, S. 70ff.

Bei den gängigen CFD-Brandmodellen wird am häufigsten die LES verwendet. Manche Modelle, wie z. B. der für die gegenständliche Arbeit verwendete „Fire Dynamics Simulator“ (FDS), bieten die Möglichkeit, die Navier-Stokes-Gleichungen auch mittels DNS zu lösen.<sup>5</sup>

Neben den Navier-Stokes-Gleichungen müssen vom CFD-Modell jedoch auch weitere physikalische und chemische Effekte modelliert werden, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird:

### **Verbrennungsmodell**

Dieses Untermodell ist erforderlich, um Verbrennungsvorgänge simulieren zu können. Je nach Art der verwendeten Software können die unterschiedlichsten Parameter einer Verbrennungsreaktion verändert werden, was sich wiederum auf Verbrennungstemperatur, Verbrennungsgeschwindigkeit, Rauchgasmenge, Flammengröße usw. auswirkt. Der Brand selbst wird üblicherweise als fixe oder variable Wärmefreisetzungsrate („Design Fire“) definiert, wobei komplexe Modelle wie z. B. FDS auch in der Lage sind, den Abbrand von Brandlasten unterschiedlichster Art zu simulieren. Je nach Art der Brandlast kann diese Modellierung mitunter sehr komplex sein, wie z. B. bei Holz, wo auch Faktoren wie Verkohlungs, Feuchtigkeit, Oberflächenbeschaffenheit usw. wesentlich für das Brandverhalten sind.

Grundsätzlich können Brände in CFD-Codes auf mehrere Arten simuliert werden:

1. Brände mit fixer Wärmefreisetzungsrate und fixer Brandfläche
2. Brände mit variabler Wärmefreisetzungsrate (Brandleistungskurven bzw. „Design Fire“) und fixer Brandfläche
3. Brände mit variabler Brandfläche und fixer Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit
4. Brände mit variabler Brandfläche und variabler Wärmefreisetzungsrate
5. Abbrand von Brandlasten als brandlast- und/oder ventilationsgesteuerte Brände

Unter „Design Fire“ versteht man Brandleistungskurven, welche in einschlägigen Normen und Richtlinien definiert sein können, aber auch aus Brandversuchen oder Experimenten abgeleitet sein können. Eine der verbreitetsten Prüf-Brandleistungskurven ist z. B. die Einheitstemperaturkurve, welche vor allem zur Prüfung der brandschutztechnischen Klassifizierung von Bauteilen verwendet wird.

Bei der gegenständlichen Arbeit wurde eine Kombination von „Design Fires“ und dem Abbrand von Brandlasten gewählt (siehe auch Kapitel 3.2.5).

### **Wärmestrahlung und Wärmeleitung**

Die Modellierung der Wärmestrahlung und der Wärmeleitung (bzw. Wärmeleitung) sind wesentliche Faktoren für den Brandverlauf, weil diese einerseits ausschlaggebend sind, wie stark und wie schnell sich ein Bauteil oder eine Brandlast erhitzen, und andererseits wie viel Wärmeenergie durch Bauteile und Abstrahlung ins Freie verloren geht. Ausgereifte Modelle berücksichtigen z. B. auch, dass die Wärmestrahlung je nach Dichte der Rauchsicht entsprechend absorbiert wird bzw. sich die Rauchsicht durch die Wärmestrahlung entsprechend erhitzt.<sup>6</sup>

### **Rauch- und Wärmedetektion**

Diese Untermodelle erlauben es, Elemente zur Rauch- und Wärmedetektion in die Simulation zu integrieren. Je nach Art des verwendeten Modells können diese Detektoren in der Simulation unterschiedlichste Aktionen auslösen, wie z. B. Ansteuerung einer Rauch- und Wärmeabzugsanlage, Verschluss von Brandschutztüren, Auslösen eines oder mehrerer Sprinkler usw.

### **Wirkung von Löschanlagen**

Diese Untermodelle erlauben es, die Wirkung von Lösch- und Sprinkleranlagen zu simulieren, d. h. es

---

<sup>5</sup> Vgl. <http://www.fire-simulation.at/Feldmodell.html> [15.10.2009]

<sup>6</sup> Vgl. NIST FDS Technical Reference Guide, Volume 1, 2009, S. 32ff.

werden in der Simulation einzelne Wassertröpfchen erzeugt, welche wiederum entsprechend vorgegebener Algorithmen in heißen Gasen oder an heißen Oberflächen verdampfen und entsprechend abkühlen.

In Verbindung mit den angeführten Untermodellen sind einige der aktuellen CFD-Codes bereits in der Lage, in einer vertretbaren Zeit sehr komplexe Brandszenarien zu simulieren, wobei sogar unterschiedliche Brandfallsteuerungen und Löscheinrichtungen berücksichtigt werden können. Manche CFD-Codes wie z. B. FDS verfügen über eigene Verifizierungs- und Validierungshandbücher, in denen das Gesamtmodell und die einzelnen Untermodelle hinsichtlich derer Rechenverfahren bzw. deren Übereinstimmung zu realen Brandversuchen entsprechend analysiert werden. Trotzdem muss berücksichtigt werden, dass ein Brandsimulationsmodell die Realität nie zu 100% korrekt abbilden kann und vor allem bei der Simulation der Verbrennungsvorgänge der Unschärfefaktor relativ groß ist. Demgegenüber ist es Tatsache, dass auch natürliche Brandverläufe unter realen Bedingungen nie zu 100% gleich verlaufen und bei geringsten Abweichungen der Eingangsparameter oder Randbedingungen der Brandverlauf komplett unterschiedlich sein kann (siehe auch Kapitel 3.2.4).

Teilweise können aber bestimmte Brandphänomene oder Brandauswirkungen noch gar nicht modelliert werden und müssen durch entsprechende Näherungen oder anderen Alternativen kompensiert werden. Beim CFD-Code FDS sind dies zum Beispiel das Brechen von Glas, Brandspuren und Verrußung, Abtropfen und Verflüssigung von Kunststoff,...

Für viele Anwendungsfälle vor allem im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes sind diese Funktionalitäten meist nicht relevant, für Fragestellungen im Zusammenhang mit der Rekonstruktion von Brandverläufen können diese Effekte jedoch oft sehr wesentlich sein.

Dem Anwender des CFD-Codes obliegt schlussendlich die Entscheidung bzw. die Verantwortung, ob und in welcher Form das Simulationsmodell eingesetzt wird, um bestimmte Fragestellungen zu lösen.

### **1.3 Grundsätzliche Überlegungen zur Rekonstruktion von Brandverläufen mittels Brandsimulationsmodellen**

Im folgenden Kapitel erfolgen grundsätzliche Überlegungen zur Anwendung von Brandsimulationsmodellen zur Rekonstruktion von Brandverläufen und in weiterer Folge die Begründung, warum das Programm FDS für die gegenständliche Arbeit verwendet wurde.

#### **1.3.1 Anwendungsmöglichkeiten von Brandsimulationsmodellen bei der Rekonstruktion von Brandverläufen**

Grundsätzlich können Brandsimulationsmodelle je nach Anwendungsfall und Art des Modells für folgende Aufgabenstellungen bei der Rekonstruktion von Brandverläufen eingesetzt werden:<sup>7</sup>

- Zum Verstehen des Brandverlaufes
  - Wie hat sich das Feuer entwickelt
  - Auswirkung der Brandlast und Brandleistung auf Wärmestrahlung, CO-Konzentration, Brandausbreitung,...
  - Auswirkung unterschiedlicher Ventilationsbedingungen

---

<sup>7</sup> Vgl. Gorbett, 2008, S. 28ff.

- Erhebung der minimalsten Brandenergie, welche zur Erreichung eines Flashover erforderlich ist
  - Ermittlung des Zeitraumes bis zum Erreichen eines Flashover bzw. Vollbrandes
- Überprüfung der zeitlichen Abläufe eines Brandereignisses
  - Brandausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zu bestimmten Rahmenbedingungen wie z. B. Änderung der Ventilationsverhältnisse (Öffnung einer Türe, Brechen einer Glasscheibe,...)
  - Auswirkungen auf Personen (Zeitraum bis zum Eintreten von Rauchgasvergiftungen oder Verbrennungen,...)
  - Aktivierung und Wirkung von Brandschutzeinrichtungen (Sprinkler, Brandmelder, Rauch- und Wärmeabzugsanlage,...)
- Überprüfung der Überlebensbedingungen von Personen
  - Einwirkung von Rauchgasen
  - Einwirkung von Hitze und Flammen
  - Verminderung der Sichtweite
- Analyse von Brandspuren
  - Abbrand von Brandlasten
  - Temperatureinwirkung auf Oberflächen
  - Erwärmung von Materialien
- Visualisierung des Brandereignisses
  - 3D-Visualisierung des gesamten Brandszenarios inkl. Darstellung der Flammen sowie Verrauchung und vieler anderer Auswertungen (Temperaturen, Geschwindigkeiten, Gaskonzentrationen,...)
- Überprüfung von unterschiedlichen Hypothesen zum Brandverlauf

Welche dieser Aufgabenstellungen mit Hilfe eines Brandsimulationsmodells untersucht werden können, ist in erster Linie stark abhängig von der Art und dem Leistungsumfang des Simulationsmodells, aber natürlich auch von der Qualität der Eingangsparameter.

Soll zum Beispiel lediglich berechnet werden, wie viel Wärmestrahlung von einem Brand ausgeht bzw. auf einen Körper einwirkt, reicht eine einfache physikalische Formel aus, bei der im Wesentlichen die Brandleistung bzw. der Abstand zur Brandquelle die wesentlichen Faktoren sind, welche die Erwärmung des Körpers bestimmen. Je nachdem welche weiteren Informationen vorliegen, kann die Formel um Einflussfaktoren wie z. B. den Emissionsgrad und der Wärmeleitfähigkeit des Körpers erweitert werden, um ein genaueres Rechenergebnis zu erhalten. Weitere Einflussfaktoren wie z. B. die Wärmeströmung in den heißen Rauchgasen oder die Reduzierung der Wärmestrahlung durch die Rauchsicht können durch einfache Formeln nicht mehr ohne weiteres berechnet werden.

Parameter wie z. B. die Flammenhöhe oder die Plumetemperatur können durch empirische Ansätze näherungsweise berechnet werden.

Durch den Einsatz von Zonenmodellen kann eine Reihe weiterer Fragestellungen wie z. B. Ventilationsverhältnisse oder Temperatur und Höhe der Rauchsicht untersucht werden. Je nach Leistungsfähigkeit des Programmes können auch empirische Ansätze wie z. B. die Berechnung der Plumetemperatur im Modell implementiert sein.

Durch die Komplexität von Feldmodellen sind diese bei der Rekonstruktion von Brandereignissen am universellsten einsetzbar. Wie im Kapitel 1 angeführt, sind je nach Art des Feldmodells eine Vielzahl an Untermodellen implementiert, wodurch ein Brandereignis relativ detailliert beschrieben (simuliert) werden kann.

Zusammenfassend wird folgende Matrix für die Anwendung von Brandsimulationsmodellen bei der Rekonstruktion von Brandereignissen aufgestellt. Zu beachten ist, dass die Eignung des Modells neben

den modellspezifischen Eigenheiten auch von der eingesetzten Software abhängig ist. Die Angabe der Eignung von „physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten und empirischen Ansätzen“ basiert auf der Annahme, dass nur die jeweilige Fragestellung mit relativ einfachen Formelwerken gelöst wird. Im Gegensatz dazu könnten durch entsprechende Verknüpfung der einzelnen Gesetzmäßigkeiten und empirischen Ansätze auch komplexere Fragestellungen gelöst werden, wie dies z. B. bei Zonen- und Feldmodellen angewandt wird.

Angemerkt wird, dass Feldmodelle nicht „genauere“ Ergebnisse als Zonenmodelle liefern. Die „Genauigkeit“ von Brandsimulationen hängt im Wesentlichen u. a. von den physikalischen Inhalten des jeweiligen Modells und darüber hinaus von den Kenntnissen des jeweiligen Anwenders über diese Inhalte ab.<sup>8</sup>

Zeichenerklärung:

↑.....geeignet

O.....bedingt geeignet

(leer).....ungeeignet

	Physikalisch - chemische Gesetzmäßigkeiten und empirische Ansätze	Zonenmodelle	Feldmodelle
3D Modellierung des Brandraumes		O	↑
3D Modellierung der Flammen und Rauchgase		O	↑
Modellierung des Verbrennungsprozesses	O	O	↑
Flammenhöhe und Plume	↑	↑	↑
Wärmestrahlung	↑	↑	↑
Wärmeströmung	O	↑	↑
Druckverhältnisse und Strömungsgeschwindigkeiten	O	↑	↑
Plumetemperatur	↑	↑	↑
Rauchgaskonzentration	O	O	↑
Sichtweiten	O	O	↑
Entzündung anderer Brandlasten (Brandausbreitung)	O	O	↑
Abbrand von Brandlasten	O	O	↑
Auswirkung unterschiedlicher Ventilationsbedingungen		↑	↑
Rauchdurchzündung (Flashover)		O	↑
Toxische Einwirkung auf Personen		O	↑
Temperatureinwirkung auf Personen	O	↑	↑
Ansprechen von Temperaturmeldern		O	↑
Ansprechen von Rauchmeldern		O	↑
Ansprechen von Sprinklerköpfen		O	↑
Auswirkung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen	O	↑	↑
Wirkung von Löschanlagen			↑
Punktuelle Auswertung physikalischer Größen		O	↑

**Tabelle 1: Eignung der unterschiedlichen Modelltypen zur Rekonstruktion von Bränden**

Zusammenfassend wird festgehalten, dass physikalisch-chemische Gesetzmäßigkeiten, empirische Ansätze und Zonenmodelle für die Untersuchung einzelner Fragestellungen mitunter sehr gut geeignet sein können. Eine umfassende Rekonstruktion des Brandverlaufes mit entsprechender Auswertung ist jedoch nur mit entsprechend ausgereiften Feldmodellen (CFD-Codes) möglich. Diese Feststellung wird

<sup>8</sup> Vgl. Schneider, 2009, S. 116.

auch in der einschlägigen Fachliteratur bestätigt, wo festgestellt wird, dass der Feldmodellansatz für detaillierte rechnerische Nachweise sowie für die Brandursachenermittlung geeignet ist.<sup>9</sup>

### 1.3.2 Auswahl des Brandsimulationsmodells für gegenständliche Arbeit

Hauptteil der gegenständlichen Arbeit ist die Rekonstruktion eines Brandversuches (Zimmerbrandes) mit einem Brandsimulationsmodell. Da lediglich Feldmodelle geeignet sind, den Brand umfassend zu beschreiben, wurde nur diese Modellart einer näheren Betrachtung unterzogen.

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Kurzbeschreibung der verbreitetsten Feldmodelle (CFD-Codes):

#### **ANSYS CFX und FLUENT**

2006 wurde die Fa. Fluent durch die Fa. Ansys übernommen<sup>10</sup>, wodurch auch die beiden CFD-Modelle „Fluent“ und CFX ineinander integriert wurden.<sup>11</sup> Die nunmehrige kommerzielle CFX-Software der Fa. Ansys ist ein sehr leistungsfähiges CFD-Modell, welches umfangreiche Möglichkeiten bezüglich Simulation von Strömungen in Flüssigkeiten und Gasen bietet. Einer der Hauptanwendungsbereiche von CFX ist z. B. die Simulation der thermodynamischen Vorgänge in Verbrennungskraftmaschinen oder Turbinen. CFX ist nicht speziell für Raumbände entwickelt worden, beinhaltet jedoch mehrere wesentliche Submodelle, welche für die Simulation von Verbrennungsvorgängen erforderlich sind (Wärmestrahlung, Wärmeübergang, Verbrennungsreaktion,...). Aufgrund der flexiblen Gitternetzstruktur (z. B. tetraederförmig) können auch schräge und runde Oberflächen sehr genau abgebildet werden.<sup>12</sup>

#### **FDS – Fire Dynamics Simulator**

Dieser vom NIST entwickelte CFD-Code kann kostenlos auf der Homepage des NIST heruntergeladen werden und ist dadurch das derzeit am verbreitetsten eingesetzte Brandsimulations-Feldmodell<sup>13</sup>. Das Programm verfügt über eine große Anzahl von Submodellen und ist somit in der Lage, ein Brandereignis relativ genau zu simulieren. Durch den breiten Benutzerkreis sowie den eigenen Verifizierungs- und Validierungshandbüchern ist das Programm sehr gut erprobt und wird auch laufend durch das NIST weiterentwickelt. Derzeit liegt das Programm in der Version 5.4.1 vor, wobei zum Zeitpunkt der Erstellung teilweise bereits Funktionalitäten der Version 6 zur Verfügung standen.<sup>14</sup> Der wesentlichste Nachteil des Programmes ist die relativ aufwändige Eingabe der Eingangsparameter durch reine Textdateien sowie die Ausrichtung an einem kartesischen Koordinatensystem, welches die Modellierung von schrägen und runden Flächen entsprechend erschwert. Kommerzielle Zusatzapplikationen erlauben die Dateneingabe über grafische Oberflächen und vereinfachen vor allem die Eingabe der geometrischen Parameter wesentlich.

#### **JASMINE**

Dieser vom BRE (Building Research Establishment) entwickelte kommerzielle CFD-Code verfügt über ein grafisches Benutzerinterface und wurde über einen Zeitraum von über 20 Jahren speziell zur Simulation von Bränden und Verrauchungen entwickelt und wurde anhand zahlreicher Brandversuche entsprechend validiert.<sup>15</sup>

---

<sup>9</sup> Vgl. Hosser, 2009, S. 117.

<sup>10</sup> Vgl. ANSYS Germany GmbH, 2007, S. 1.

<sup>11</sup> Vgl. Galpin, 2007, S. 3.

<sup>12</sup> Vgl. <http://www.ansys.com/Products/fluid-dynamics/cfx/features.asp> [05.11.2009]

<sup>13</sup> Vgl. Rein, 2007, S. 177.

<sup>14</sup> Vgl. [http://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/7bb35719784756b7](http://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/7bb35719784756b7) [28.10.2009]

<sup>15</sup> Vgl. [http://www.firemodelsurvey.com/pdf/JASMINE\\_2007.pdf](http://www.firemodelsurvey.com/pdf/JASMINE_2007.pdf) [05.11.2009]

### **KOBRA-3D**

Kommerzielles CFD-Modell der I.S.T. Integrierte Sicherheits-Technik GmbH., das speziell für die Simulation von Bränden entwickelt wurde und über eine grafisches Benutzerinterface verfügt.<sup>16</sup>

### **PHOENICS**

Kommerzielles CFD-Modell der englischen Firma CHAM, welches ähnlich wie FDS mit einem kartesischen Gitternetz arbeitet. PHOENICS verfügt in der letzten Version vom März 2009 über einen automatischen Gittergenerator, welcher z. B. im Bereich von Rundungen das Gitter entsprechend verfeinert. Durch unterschiedliche Programmmodule ist PHOENICS zur Simulation einer Vielzahl von Fragestellungen im Bereich der numerischen Strömungsmechanik geeignet, wobei insbesondere durch ein integriertes Verbrennungsmodell und der Simulation von Wärmestrahlung, -strömung und -übergang auch Brandszenarien simuliert werden können.<sup>17</sup>

### **SMARTFIRE**

Speziell für die Simulation von Bränden entwickelter kommerzieller CFD-Code der Fire Safety Engineering Group der Universität von Greenwich. Durch ein grafisches Benutzerinterface und einer automatisierten Gitternetzgenerierung ist das Programm sehr benutzerfreundlich.<sup>18</sup>

Diese Aufstellung zeigt, dass es eine Reihe an Feldmodellen gibt, welche für die Rekonstruktion von Brandereignissen geeignet sind. Für die gegenständliche Arbeit wurde ein Modell gesucht, welches folgende Kriterien erfüllen sollte:

1. Kostengünstig
2. Implementiertes Festbrandmodell
3. Entsprechend verifiziert und validiert
4. Breiter Benutzerkreis

Aufgrund dieser Kriterien und den Erfahrungen des Autors wurde das Programm FDS (Fire Dynamics Simulator) vom NIST in der Version 5.4.1 für die gegenständliche Arbeit ausgewählt. Der wesentliche Vorteil von FDS ist, dass es kostenfrei vom NIST erhältlich ist und dadurch weltweit von den unterschiedlichsten Benutzergruppen eingesetzt wird. Hierzu zählen neben kommerziellen Anwendern auch Forschungs- und Bildungseinrichtungen, welche das Programm laufend verifizieren und validieren und durch ihr Feedback an die Entwickler zur laufenden Verbesserung des Programmes beitragen.

## **1.4 Beispiele für die Anwendung von FDS zur Rekonstruktion von Brandereignissen**

In diesem Kapitel werden drei Fälle dargestellt, wo mit Hilfe des Programmes FDS bestimmte Fragestellungen zum Brandverlauf und zur Brandauswirkung untersucht wurden.

---

<sup>16</sup> Vgl. <http://www.ist-net.de> [10.11.2009]

<sup>17</sup> Vgl. <http://www.cham.co.uk> [10.11.2009]

<sup>18</sup> Vgl. <http://fseg.gre.ac.uk/smartfire/index.html> [10.11.2009]

## 1.4.1 Anschläge World Trade Center 2001

### 1.4.1.1 Einleitung

Der Kollaps von WTC 1 und WTC 2 und in weiterer Folge auch WTC 7 stellt das katastrophalste und gleichzeitig am besten untersuchte „Brandereignis“ in der Geschichte des Brandschutzes dar. In diesem Kapitel wird nur jener Teil der Untersuchungen vom NIST dargestellt, welche mit dem FDS durchgeführt wurden. Als Quelle hierzu dienen die „NCSTAR 1“ Berichte, welche öffentlich auf der NIST-Homepage verfügbar sind.

Das Ziel der Untersuchungen durch das NIST war die Erlangung von Erkenntnissen zu den Umständen, welche dazu beigetragen haben, dass es zum Einsturz der Gebäude kam, bzw. welche Aspekte des Brandschutzes, des Personenverhaltens, der Evakuierung und der Rettungsmannschaften dazu beigetragen haben, dass die Opferzahl in bestimmten Bereichen höher oder niedriger war. Die Ergebnisse der Untersuchungen flossen auch in Änderungen von bau- und brandschutztechnischen Vorschriften und Gesetzen mit ein.<sup>19</sup>

Die Untersuchung der WTC-Anschläge durch das NIST gliedert sich in viele einzelne Untersuchungsberichte, welche sich z. B. mit Themen wie gesetzlichen Vorgaben, Brandschutzvorschriften, Evakuierung, Brandausbreitung, Einsatz der Rettungskräfte usw. beschäftigt. In der folgenden Grafik sind diese Teilbereiche angeführt, wobei sich diese Arbeit auf den Brandverlauf und die Temperatureinwirkung auf die Stahlkonstruktion beschränkt, welche in weiterer Folge zum Kollaps der Gebäude geführt hat. Die entsprechenden Themen sind in der Grafik rot umrahmt:

---

<sup>19</sup> Vgl. NIST NCSTAR 1, 2005, S. xxix.

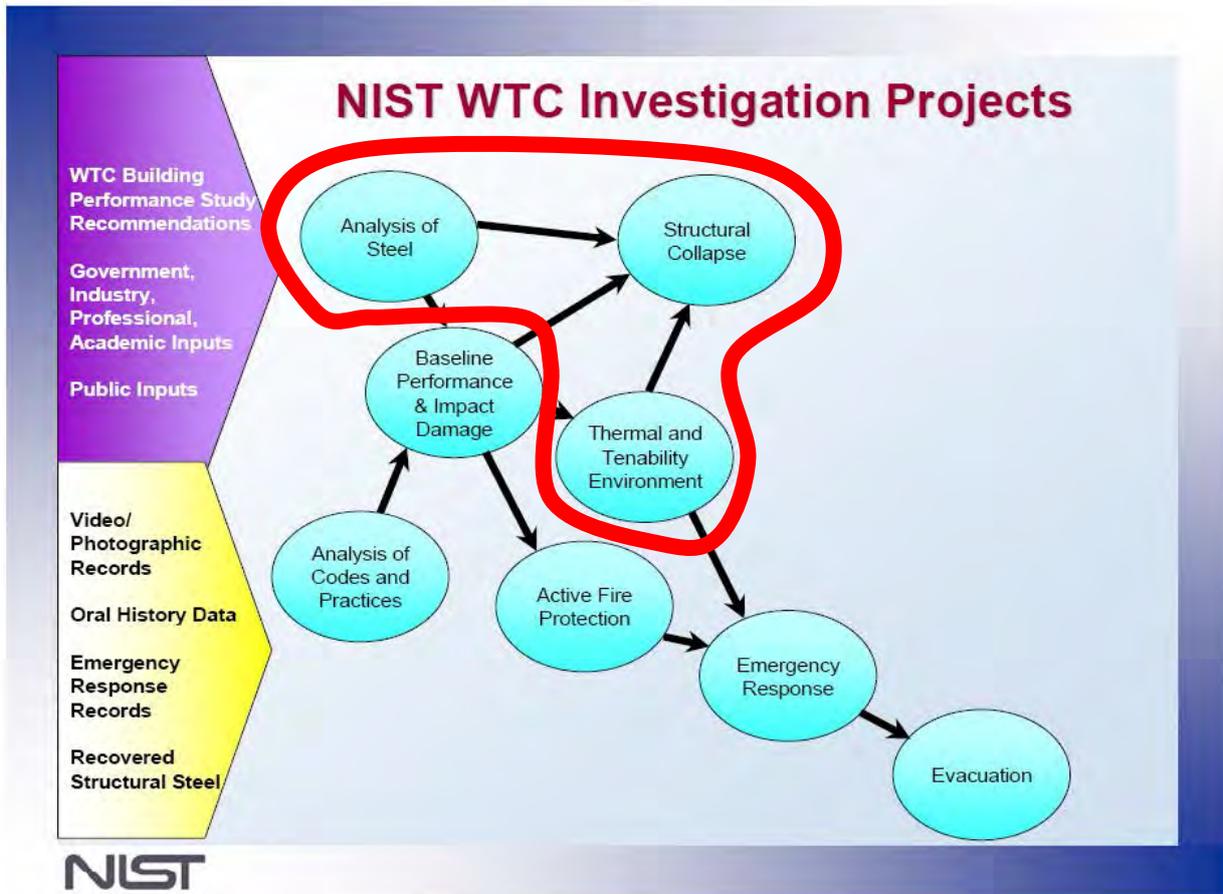


Abbildung 2: Themengliederung der WTC Untersuchungen<sup>20</sup>

#### 1.4.1.2 Anwendung der Brandsimulation

Eine Brandsimulation der WTC-Brände war erforderlich, um festzustellen, welche Umstände zum Kollaps der Türme geführt hatten. Das Ergebnis war eine dreidimensionale zeitabhängige Simulation der thermischen Verhältnisse in den Türmen in der Zeit vom Einschlag der Flugzeuge bis zum Einsturz der Türme.

#### 1.4.1.3 Vorgehensweise für die Brandsimulation

Das verwendete Modell musste folgende Forderungen erfüllen:<sup>21</sup>

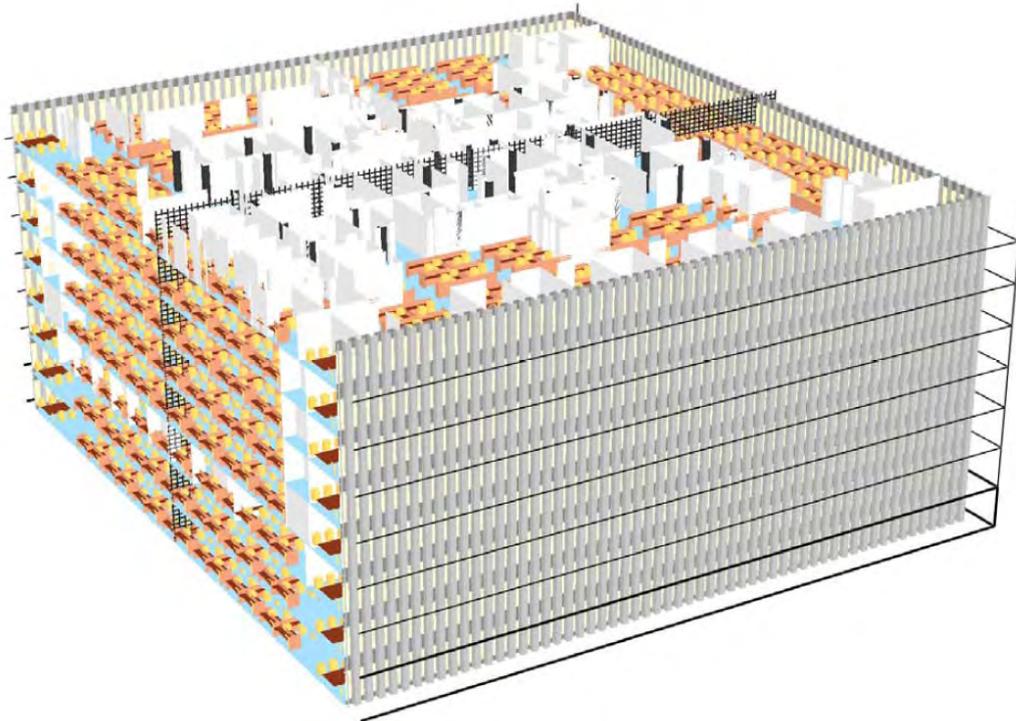
- Realistische Abbildung von der thermischen Einwirkung auf wesentliche Bauteile wie z. B. die tragende Struktur
- Simulation der komplexen Brandlasten (Mischbrandlasten)
- Simulation der Flammenausbreitung in den Geschoßen
- Einsatz eines validierten Modells

Diese Forderungen führten zum Einsatz von FDS, welches vom NIST selbst entwickelt wurde, wobei es bis dahin noch nicht für die Simulation von Brandausbreitung von so großen Geschoßflächen verwendet worden war.

<sup>20</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 1, 2005, S. xxix

<sup>21</sup> Vgl. Ebenda, S. 121ff.

Von WTC 1 wurden 8 Geschosse (92 bis 99) simuliert und vom WTC 2 wurden 6 Geschosse (78 bis 83) simuliert, wobei die Aktualität der zur Verfügung stehenden Pläne teilweise sehr unterschiedlich war. Die folgende Grafik zeigt das unbeschädigte WTC 1:



**Abbildung 3: WTC 1 Simulation in FDS (vor dem Einschlag)<sup>22</sup>**

Eine Testserie diente nur zur Feststellung, inwieweit FDS imstande ist, bei einer gleichbleibenden Wärmefreisetzungsrate (1,9 MW bzw. 3,4 MW) die Temperaturen im Raum richtig zu simulieren, d. h. es handelte sich um eine Art der Validierung mit Schwerpunkt auf das Temperaturverhalten. Diese Testreihe brachte folgende Ergebnisse:

- Die Raumtemperatur im Deckenbereich wurde von FDS um rund 4% überschätzt.
- Die Rauchgas- und Luftgeschwindigkeiten bewegten sich im Rahmen der Messunsicherheiten.
- Die Ausrichtung und Ausdehnung des Feuer-Plumes wurde von FDS unterschätzt.
- Die Wärmestromdichte lag im Bereich der Messunsicherheiten.

Ein wesentlicher Einflussfaktor in der Simulation ist die Brandentwicklungszeit und die Brandausbreitung in den jeweiligen Geschossen. Um diese Werte abschätzen zu können, wurden Realbrandversuche (Maßstab 1:1) durchgeführt, wo der Brand von einzelnen Arbeitsplätzen unter verschiedenen Bedingungen nachgestellt wurde, z. B. mit und ohne Beteiligung von Kerosin oder mit abgefallenen nichtbrennbaren Teilen der Decke auf den Arbeitsplätzen. Die Ergebnisse der Untersuchungen dienen zur Anpassung des Verbrennungsmodells von FDS an diese Einflussfaktoren.

---

<sup>22</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 1, 2005, S. 122.



Abbildung 4: Nachbau von intakten und zerstörten Arbeitsplätzen für die Brandsimulation<sup>23</sup>

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate von den Versuchen und von der FDS-Simulation:

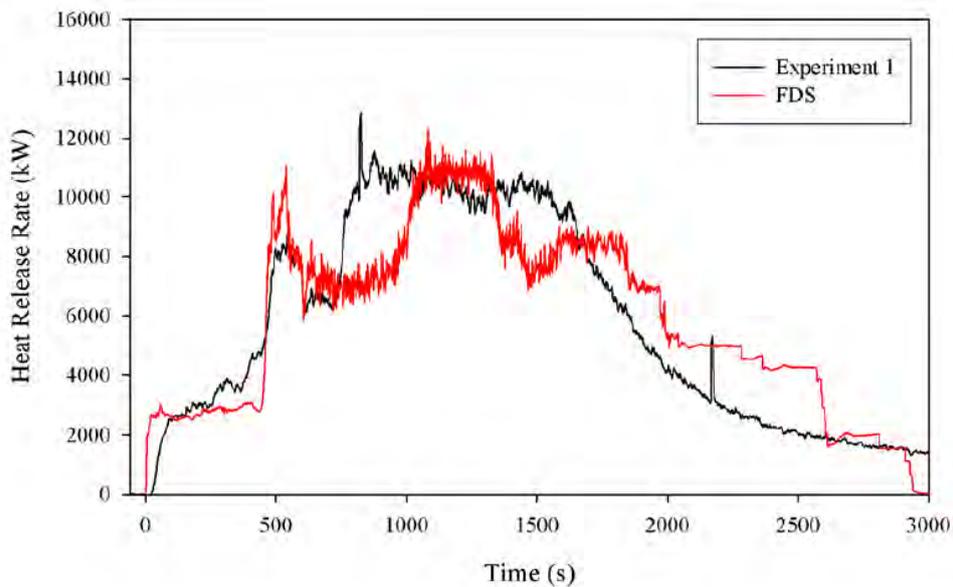


Abbildung 5: Wärmefreisetzungsrate bei einem Brand von drei Büroarbeitsplätzen<sup>24</sup>

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den Versuchen waren:

- Das Kerosin beschleunigte die Brandausbreitung.
- Von den beschädigten Arbeitsplätzen (Teile der Decke auf den Plätzen) verbrannten nur rund 60% der brennbaren Anteile.
- Die Temperaturen im Deckenbereich betragen zwischen 800 °C und 1.100 °C.

<sup>23</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 1, 2005, S. 124.

<sup>24</sup> Abbildung: Ebenda, S. 125.

Mittels FDS konnten folgende Parameter erfolgreich repliziert werden:

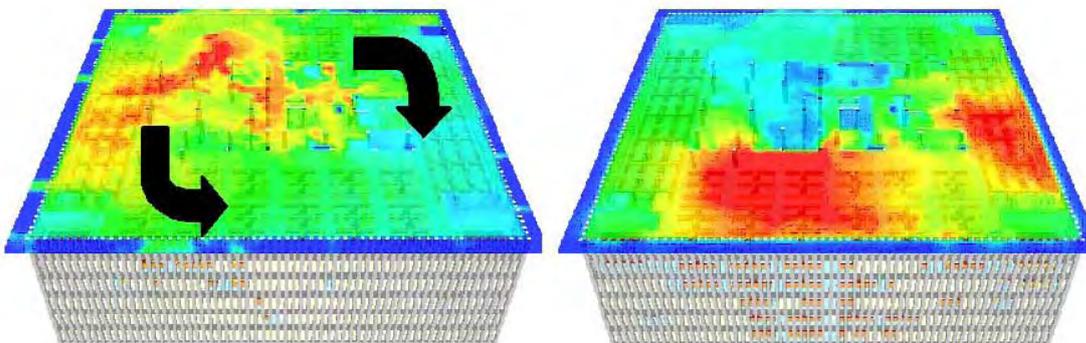
- die generelle Form der Brandleistungskurve,
- die Zeit, während der die erste Hälfte der Verbrennungsenergie freigesetzt wird (Abweichung rund 3 Minuten),
- der Wert der Brandleistung zu diesem Zeitpunkt mit rund 9% Genauigkeit,
- die Branddauer mit rund 6 Minuten Genauigkeit,
- die Maximaltemperatur im Deckenbereich mit rund 10% Genauigkeit.

Diese Abweichungen liegen innerhalb der Messunsicherheiten (Messfehler) bzw. der Unsicherheit der Eingangsparameter (Brandlastverteilung usw.). Zusammenfassend wird festgestellt, dass diese Unsicherheiten mehr überwiegen als die Unsicherheiten aufgrund des Modellfehlers.

Aus den Ergebnissen dieser Vorab-Tests konnten die Eingangsparameter für die eigentlichen Simulationsläufe eingegeben werden. Es wurden mehrere Simulationen durchgeführt, wobei jeweils unterschiedliche Kerosinmengen, Brandlastverteilungen und Zerstörungsgrade der Einrichtung angenommen wurden. Da die verwendete FDS-Version noch keinen Algorithmus für brechendes Glas implementiert hat, wurden die Verglasungen zu fixen Zeiten entfernt, so wie dies anhand der Fotografien und Videos reproduziert werden konnte.

#### 1.4.1.4 Ergebnisse der Brandsimulation

Die Ergebnisse zeigten die Brandausbreitung und die Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit in den einzelnen Geschoßen:



### WTC 1, Floor 97

**Abbildung 6: Brandverlauf (Temperaturverlauf) in Abhängigkeit von der Zeit<sup>25</sup>**

Die Parameterstudie zeigte, dass die Brände im WTC 1 grundsätzlich ventilationsgesteuert abliefen und somit der Kerosinanteil nur eine unwesentliche Rolle spielte. Das zusätzliche Kerosin verzögerte sogar die Brandausbreitung, da zuerst die Brandlasten aufgebraucht werden mussten, bevor genügend Sauerstoff für eine Brandausbreitung zur Verfügung standen.

Im Gegensatz zum WTC 1 waren beim WTC 2 durch den Einschlagwinkel des Flugzeuges eine größere Fensteranzahl betroffen, wodurch die Verbrennung im Wesentlichen brandlastgesteuert ablief.

<sup>25</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 1, 2005, S. 128.

Aufgrund der simulierten Brandverläufe und der vorhandenen Fotografien konnte im Zuge der Parameterstudie auf die Brandlastverteilung und die Kerosinmenge rückgeschlossen werden. In der FDS-Simulation wurde in weiterer Folge ausgewertet, dass die maximale Brandleistung im WTC 1 bei rund 2 GW lag und im WTC 2 bei rund 1 GW.

Die wesentlichste Auswertung war jedoch die Temperatureinwirkung auf die tragende Konstruktion, wobei hierzu jeweils der Mittelwert der oberen Heißgasschicht und der unteren Kaltgasschicht sowie die Rauchdichte und Rauchschichthöhe als Eingangsparameter für die Strukturanalyse herangezogen wurden.

#### 1.4.1.5 Strukturanalyse

Mittels eines vom NIST entwickelten Schnittstellenprogrammes („Fire Structure Interface“) wurden diese Daten in Ansys 8.0 übernommen, welches ein spezielles Programm zur Simulation von Strukturmechanik ist. Im Zuge weiterer Brandtests und Analysen wurde festgestellt, inwieweit z. B. fehlende Brandschutzbeschichtungen die Temperaturentwicklung in den tragenden Bauteilen negativ beeinflussen. In der Strukturanalyse erfolgt beim WTC 1 der Kollaps nach 100 Min. gegenüber 102 Min. in der Realität und beim WTC 2 nach 43 Min. gegenüber 56 Min. in der Realität. Diese relativ gute Übereinstimmung zeigt, dass sowohl das Brandsimulationsmodell als auch das Struktursimulationsmodell ein realistisches Abbild der Realität ergeben.

#### 1.4.1.6 Zusammenfassung

Bezüglich der Modellierung der WTC-Brände wird festgehalten, dass bei komplexen Brandlasten eine Validierung des Modells unbedingt erforderlich ist, d. h. das Modell muss mittels Realbrandversuchen an die jeweilige Ausgangssituation angepasst werden. Der Vorteil beim WTC war das umfangreiche Fotomaterial, wodurch relativ gut der Brandverlauf zumindest in den Außenbereichen sichtbar und nachvollziehbar war. Auf den Brandverlauf im Gebäudekern konnte man nur aufgrund der Brandsimulation rückschließen. Bei der Simulation wurde das Bersten der Fenster manuell aufgrund der vorhandenen Fotos und Videos ausgelöst. Dieser Umstand war vor allem beim ventilationsgesteuerten Brand im WTC 1 ein wesentlicher Faktor für die Wärmefreisetzungsrates des Brandes. Die Validierungsversuche haben gezeigt, dass FDS relativ gut die betreffenden Temperaturen und Wärmefreisetzungsrates simuliert.

Wichtig ist jedenfalls die Durchführung von Parameterstudien, um bei unbekanntem Parametern (Brandlastverteilung, Kerosinmenge,...) ein der Realität entsprechendes Szenario simulieren zu können. Für die WTC-Simulationen wurde weiters auch eine Parameterstudie bezüglich der Rechengittergröße durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass eine Zellgröße von 50 cm ausreichend ist, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten.<sup>26</sup>

In Verbindung mit der Strukturanalyse zeigt sich, dass die Brandsimulation mittels FDS sehr gut geeignet war, um den Brandverlauf bzw. die Temperatureinwirkungen auf die tragende Konstruktion nachzuvollziehen. Kritisch hinterfragt werden muss, inwieweit sich etwaige Fehler bei den Eingabeparametern gegenseitig ausgelöscht haben. Vor allem bei der Strukturanalyse besteht z. B. hinsichtlich der Zerstörung bzw. Beschädigung der Brandschutzbeschichtung ein großer Unsicherheitsfaktor, welcher sich jedoch massiv auf die Erwärmung und somit Schwächung der tragenden Konstruktion auswirkt. Es wäre daher auch durchaus denkbar, dass z. B. bei der Brandsimulation die Temperaturen im Kern des Gebäudes zu hoch simuliert wurden, dafür aber angenommen wurde, dass die Brandschutzbeschichtung der tragenden Konstruktion weniger beschädigt

---

<sup>26</sup> Vgl. NIST NCSTAR 1-5E, 2005, S. 86ff.

war, als dies tatsächlich der Fall war. Im Endeffekt ergibt ein solches Szenario bei entsprechender Parameterwahl vermutlich die gleichen Zeiten bis zum Kollaps wie in der Realität.

## 1.4.2 Brand des „Station Nightclub“ auf Rhode Island

### 1.4.2.1 Einleitung

Am 20.2.2003 kam es in einem Nachtclub auf Rhode Island zu einem katastrophalen Brand, bei dem insgesamt 100 Personen zu Tode kamen. Ausgelöst wurde der Brand durch Pyrotechnikeffekte auf der Bühne, welche PU-Schaum (Schallschutzschaumstoff) im Wandbereich in Brand setzten. Nach rund einer Minute war im Bereich der Notausgänge Rauch sichtbar und nach 5 Minuten schlugen bereits Flammen aus dem Dach. Der Hauptzugang und gleichzeitige Notausgang war binnen kurzer Zeit durch Personen blockiert. In der folgenden Grafik sind die weiteren Notausgänge sichtbar, welche jedoch nur von wenigen Personen benützt wurden:

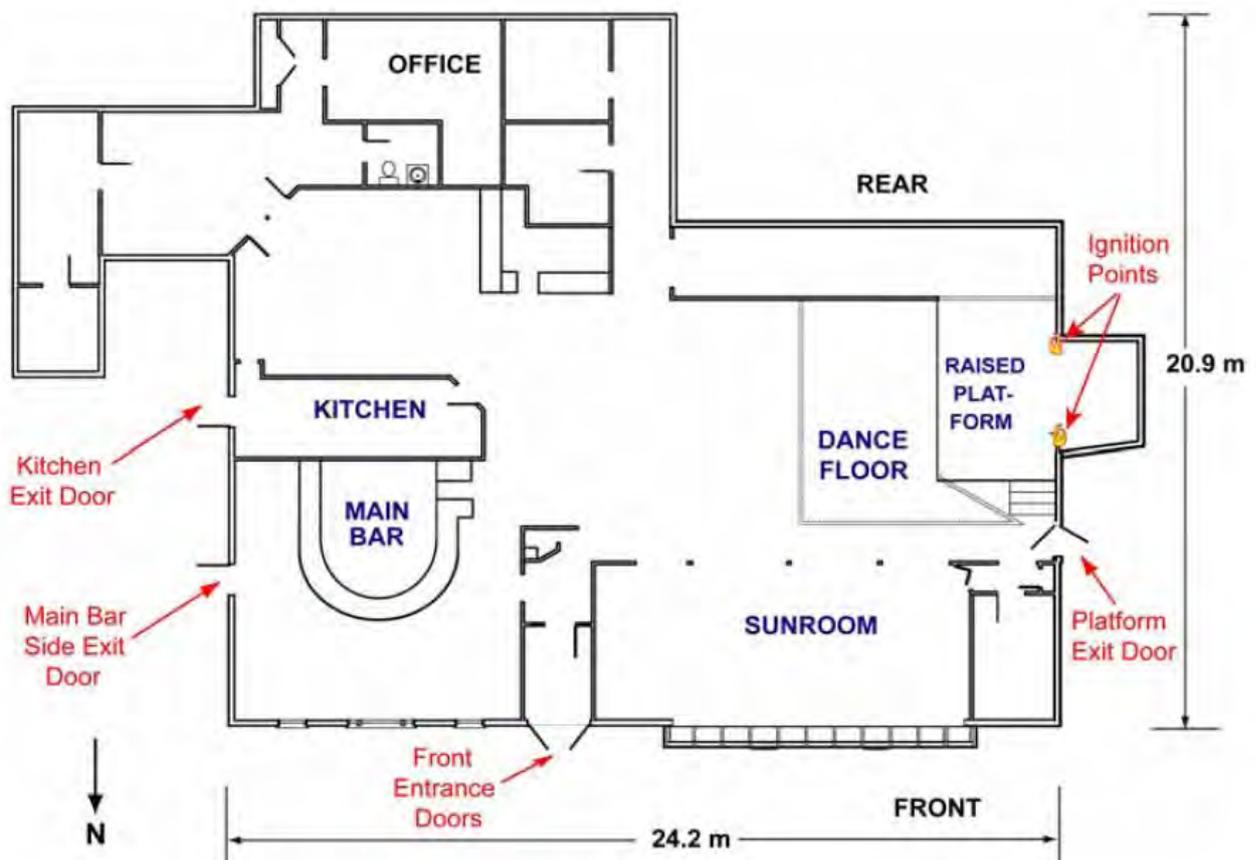


Abbildung 7: Grundrissplan des Station Nightclub<sup>27</sup>

Ein Grund für die hohe Opferzahl waren die extrem schnelle Verrauchung, die fehlenden Brandschutzeinrichtungen sowie die unübersichtliche Fluchtsituation.

<sup>27</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 1-5E, 2005, S. xviii.

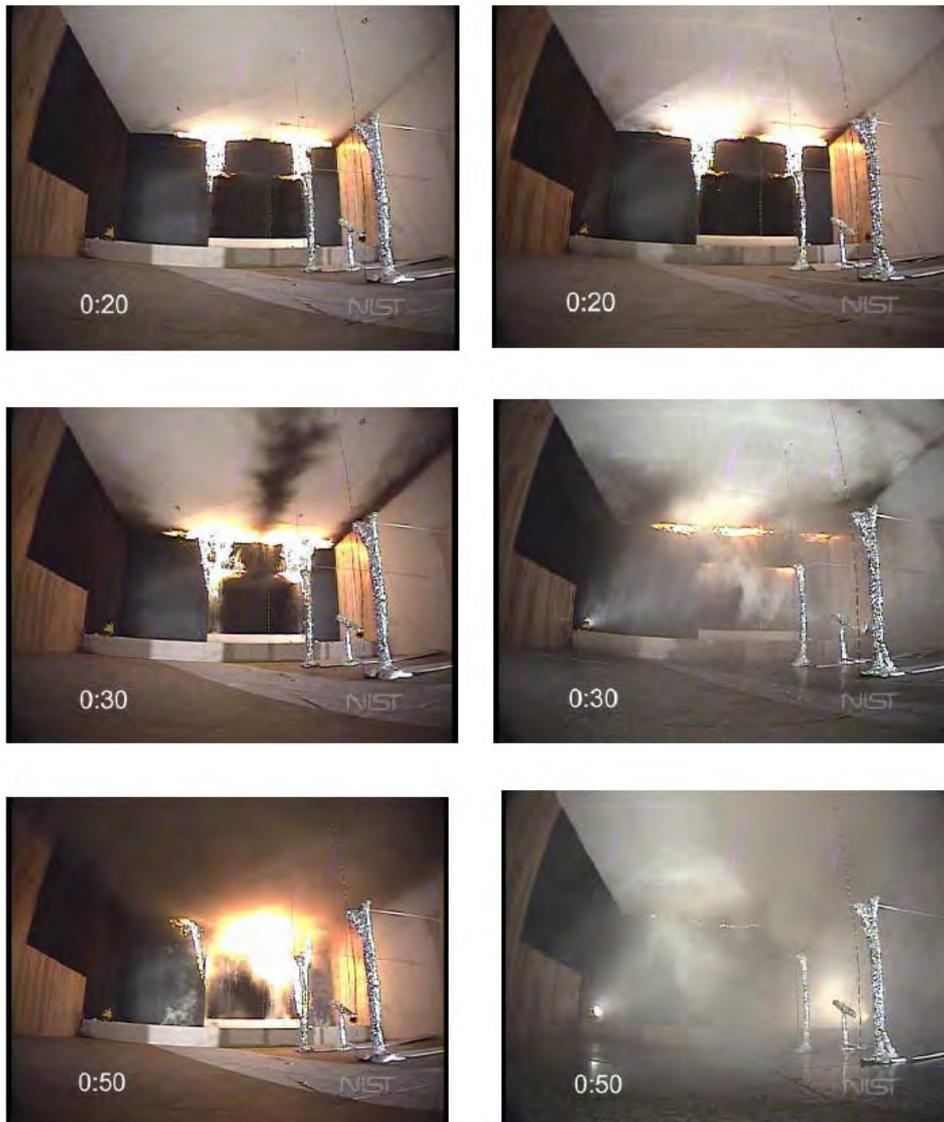
### 1.4.2.2 Anwendung der Brandsimulation

Mit der Brandsimulation sollte nachgewiesen werden, was die Gründe für die extrem schnelle Verrauchung und Brandausbreitung waren und ob z. B. eine Sprinkleranlage dieses Szenario verhindern hätte können.

### 1.4.2.3 Vorgehensweise für die Brandsimulation

Als erster Schritt wurden vom NIST Brandversuche bezüglich der Entzündung des PU-Schaums (Schaumstoffbeschichtung) angestellt. Dieser Schaumstoff diente als Schalldämmung zur besseren Akustik und hatte keinerlei brandschutztechnische Qualifikationen.

In weiterer Folge wurde der Bühnenbereich 1:1 für diverse Brandversuche nachgebaut, um den Brand ohne Sprinkleranlage und mit Sprinkleranlage nachzustellen.



**Abbildung 8: Bilder Brandversuche, links ohne Sprinkleranlage, rechts mit Sprinkleranlage<sup>28</sup>**

<sup>28</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 2, 2005, S. 4-30.

Diese Versuche haben bereits gezeigt, dass bei einer vorhandenen Sprinkleranlage die Brandausbreitung wesentlich eingeschränkt worden wäre.

Um in weiterer Folge den Brand- und Verrauchungsverlauf des gesamten Clubs zu untersuchen, erfolgte die Brandsimulation mittels FDS.

Als Zellgröße wurde 10 cm gewählt, wobei auch Parameterstudien mit 5 cm und 20 cm Zellgrößen erfolgten, wobei sich gezeigt hat, dass die Brandausbreitung bei 20 cm Zellgröße langsamer als in der Realität war und bei 5 cm Zellgröße schneller als in der Realität.

Als Brandlast wurden PU-Schaum und Sperrholzplatten wie in der Realität angenommen.

#### 1.4.2.4 Ergebnisse der Brandsimulation

Das folgende Diagramm stellt die Temperaturverläufe 1,7 m vor der Bühne dar. Der raschere Anstieg der Temperatur im Deckenbereich (Ceiling) beim Experiment wird den Messunsicherheiten im Bereich des Ceiling Jets zugeschrieben, wo im Realfall ein einzelner Punkt erfasst wird und in der Simulation der gemittelte Wert einer ganzen Zelle ausgewertet wird.

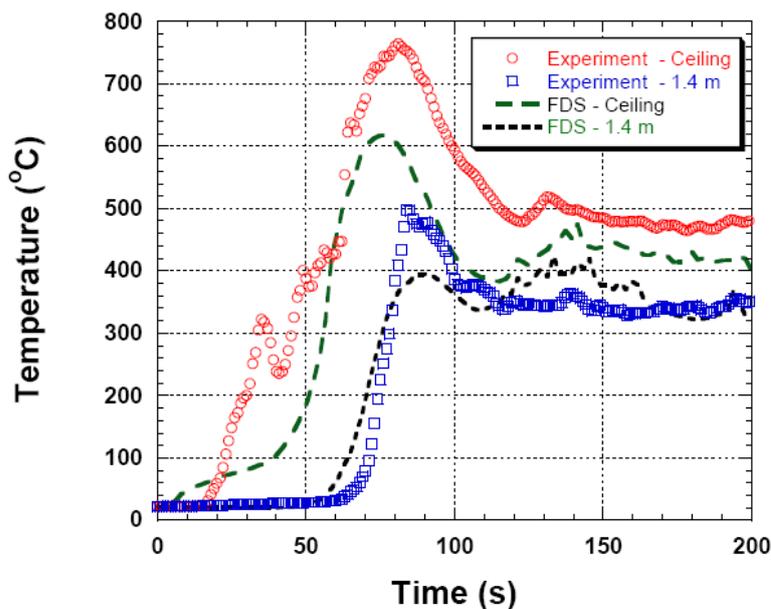
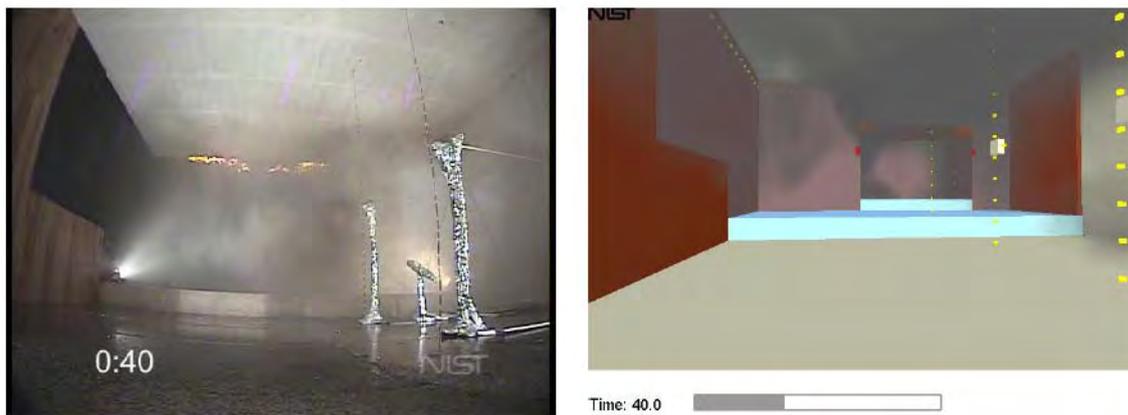


Abbildung 9: Exemplarischer Vergleich eines Temperaturverlaufes von Brandversuch und Brandsimulation<sup>29</sup>

Ebenso wurden beim visuellen Vergleich zwischen Brandversuch und Brandsimulation vergleichbare Ergebnisse festgestellt, wie folgende Abbildung vom gesprinklerten Brand zeigt:

<sup>29</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 2, 2005, S. 5-16.



**Abbildung 10: Vergleich zwischen Brandversuch und Brandsimulation (gesprinklert) nach  $t=40$  Sek.<sup>30</sup>**

Sowohl im Brandversuch als auch in der Brandsimulation wurde nachgewiesen, dass ein Sprinklerschutz einen Flashover verhindern hätte können. Im Brandversuch wurde der Brand durch die Sprinkleranlage nahezu vollständig gelöscht, in der Brandsimulation wurde immer wieder eine Wärmestrahlung durch kleine Brände, welche nicht durch die Sprinkler erfasst sind, festgestellt.

Beim nichtgesprinklerten Brandversuch wurde ein ähnlicher Brandverlauf wie in dem Video vom tatsächlichen Brand festgestellt.

Mittels der Simulation konnte auch rekonstruiert werden welche Temperaturen im Bereich des Hauptzuganges geherrscht haben:

---

<sup>30</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 2, 2005, S. 5-22.

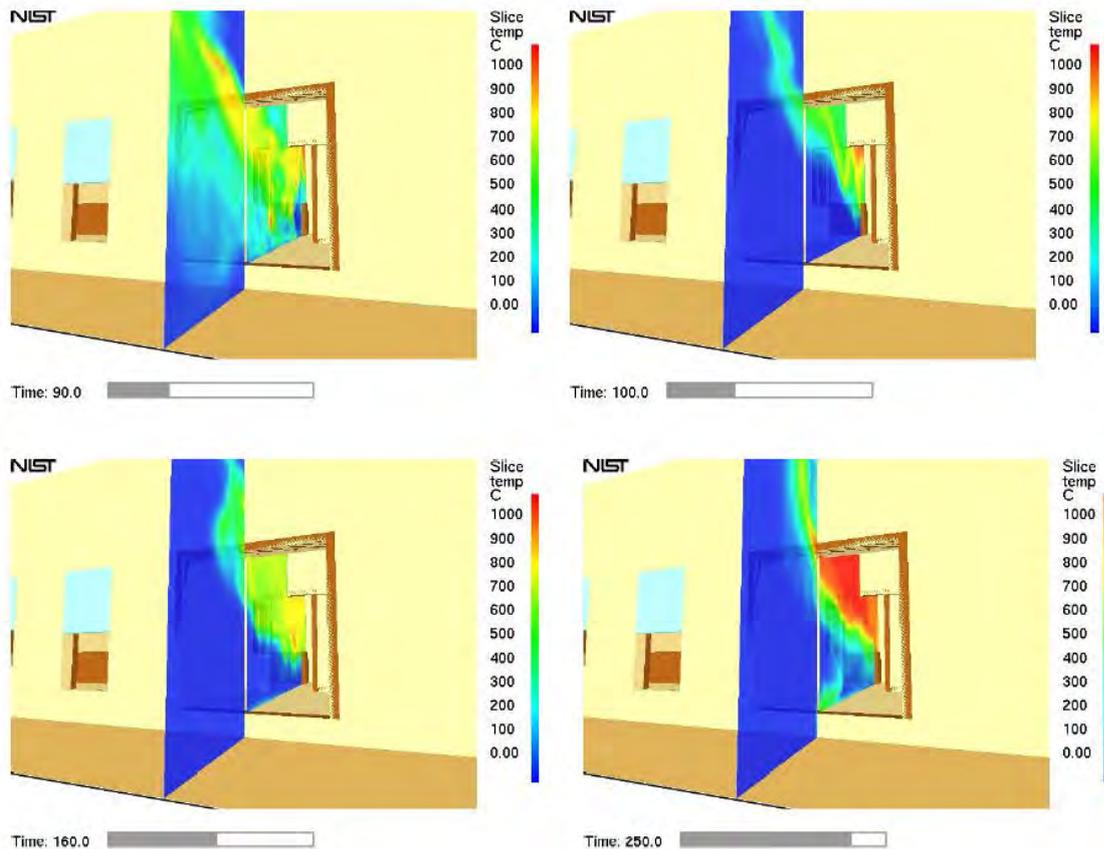


Abbildung 11: Schnittdarstellung der Temperatur im Bereich des Hauptzuges<sup>31</sup>

#### 1.4.2.5 Zusammenfassung

Die Brandsimulation mittels FDS wurde im gegenständlichen Fall erfolgreich angewandt, um die Vorgänge im Inneren des Nachtclubs zu rekonstruieren und auf Temperaturen, Sauerstoffkonzentrationen und Verrauchungen rückschließen zu können. Wesentliche Voraussetzung für die Simulation waren die Brandversuche, welche die Brandentstehungsphase rekonstruierten. Nur so konnten die entsprechenden Eingangsparameter für die Simulation optimiert werden und konnte überprüft werden, ob die Brandsimulation wirklich realistische Ergebnisse liefert.

Eine weitere wesentliche Erleichterung bzw. Kontrollmöglichkeit für die Realitätsnähe der Brandsimulation ist das Video eines Gastes, welches den Brandverlauf von der Entstehung bis zum Löschangriff der Feuerwehr lückenlos dokumentiert. So können Realität, Versuch und Simulation optimal miteinander verglichen werden.

<sup>31</sup> Abbildung: NIST NCSTAR 2, 2005, S. 5-45.

### 1.4.3 Dalmarnock Brandversuche

#### 1.4.3.1 Einleitung

Im Jahr 2006 wurden in Dalmarnock (Glasgow) in einem 23-stöckigen Hochhaus, welches 1964 errichtet wurde, insgesamt drei Brandversuche mit den unterschiedlichsten Zielsetzungen durchgeführt. Bei den beiden Hauptexperimenten wurden jeweils eine Wohnung im 2. und 4. Stockwerk identisch eingerichtet und mit einer hohen Dichte von jeweils rund 300 Messsensoren ausgestattet. Die Wohnungen verfügten über eine typische Haushaltseinrichtung mit einer entsprechenden Brandlastdichte:



**Abbildung 12: Fotos der eingerichteten Wohnung vor dem Brandversuch (verschiedene Blickrichtungen)<sup>32</sup>**

Beim ersten Brandversuch entwickelte sich das Feuer völlig ohne Einflussnahme bis zum Flashover und darüber hinaus. Beim zweiten Brandversuch mit der komplett identisch eingerichteten Wohnung wurden Ventilationsbedingungen sensorgesteuert geändert und der Brand kurz vor dem Flashover abgelöscht.<sup>33</sup>

#### 1.4.3.2 Anwendung der Brandsimulation

Die Brandversuche wurden durchgeführt, um diverse Einrichtungen der Brandschutztechnik und der Strukturanalyse zu testen sowie unterschiedliche Brandauswirkungen zu untersuchen. Ein wesentlicher Teil der Dalmarnock Brandversuche war jedoch auch die Validierung von Brandsimulationsmodellen im Anschluss an die Brandversuche. Ziel war es, dass in Form eines „Round Robin“-Verfahrens insgesamt 10 internationale Teams unabhängig voneinander den Brandverlauf vom 1. Dalmarnock Test mit einem Brandsimulationsmodell simulieren sollten. Den Teams war völlig freigestellt, welches Programm sie für die Brandsimulation verwenden, wobei sich 8 Teams für den Einsatz von FDS entschieden und zwei Teams für das Zonenmodell CFAST.<sup>34</sup>

#### 1.4.3.3 Vorgehensweise für die Brandsimulation

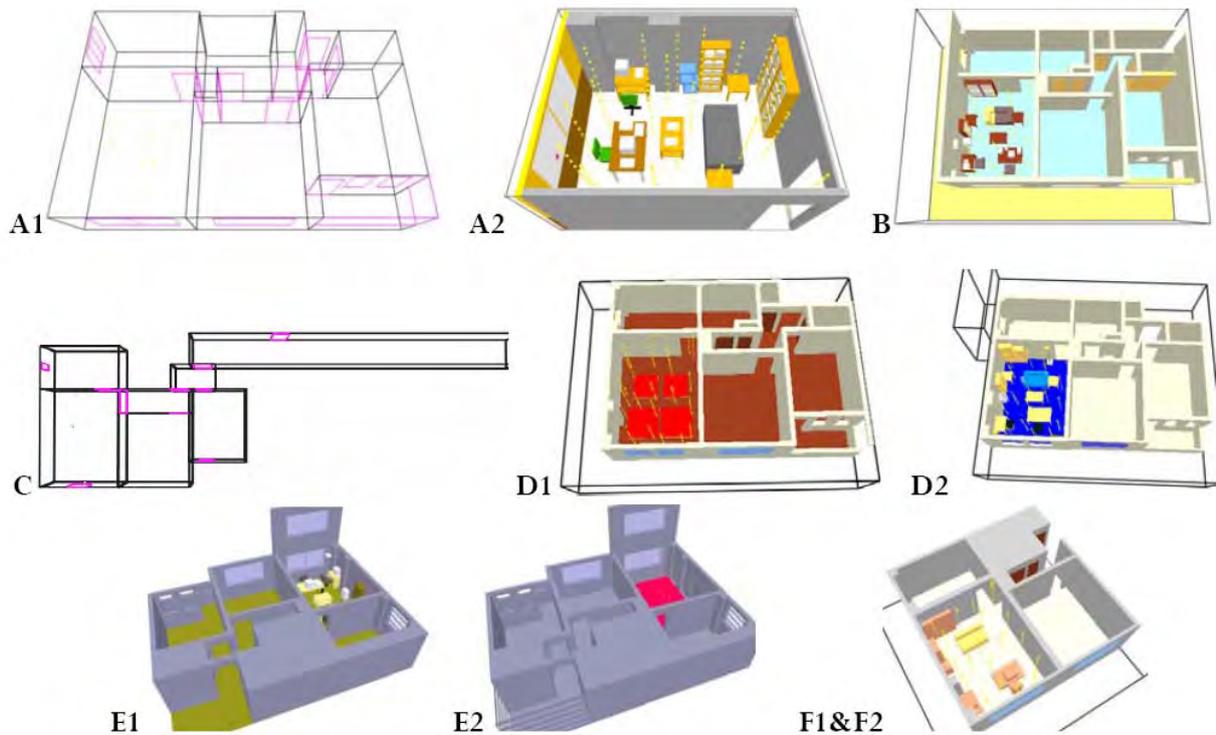
Jedem teilnehmenden Team wurden dieselben Informationen vom Brandversuch zur Verfügung gestellt, wobei dies im Wesentlichen die Geometrie, Brandlastverteilung, Zündquelle und Ventilationsbedingungen waren. Sämtliche anderen Eingangsparameter konnten bzw. mussten von den Teams selbst erarbeitet werden. Wie das folgende Bild zeigt, waren die geometrischen Eingangsparameter der einzelnen Teams

<sup>32</sup> Abbildung: Rein, 2007, S. 33.

<sup>33</sup> Vgl. Rein, 2007, S. 31ff.

<sup>34</sup> Vgl. Ebenda, S. 174ff.

sehr unterschiedlich. Einige Teams modellierten die gesamte Wohnung, einzelne Teams nur den Brandraum oder ausgewählte Teile der Wohnung. Aber auch die einzelnen Brandlasten fanden völlig unterschiedlich Eingang in die Simulation. So wurden z. B. von machen Teams die Materialien analog der vorgegebenen Brandlastverteilung definiert und der Verbrennungsverlauf somit vom Modell bestimmt, andere Teams wiederum setzten lediglich fix definierte Design Fires ein oder nutzten eine Kombination aus Design Fire und brennbaren Materialien.<sup>35</sup>



**Abbildung 13: Modellierung der Dalmarnock Brandversuche im Zuge des "Round Robin"-Verfahrens<sup>36</sup>**

#### 1.4.3.4 Ergebnisse der Brandsimulation

Ebenso unterschiedlich wie die Teams die Eingangsparameter festlegten, waren erwartungsgemäß auch die ausgewerteten Temperaturen und Brandverläufe.

In der folgenden Tabelle sind die in den Simulationen ermittelten Zeiten bis zum Erreichen des Flashovers, bzw. die maximalen Rauchsichttemperaturen den experimentell ermittelten Daten gegenübergestellt:

<sup>35</sup> Vgl. Rein, 2007, S. 174ff.

<sup>36</sup> Abbildung: Ebenda, S. 179.

	Time to Flashover [s]	Maximum Smoke Layer Temp [°C]
Brandsimulationen	A1	850
	A2	780
	B	841
	C	no flashover
	D1	200
	D2	77
	E1	180
	E2	180
	F1	720
	F2	850
	avg	591
Brandversuch	exp	300

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Brandsimulationsdaten mit den experimentell ermittelten Daten<sup>37</sup>

#### 1.4.4 Erkenntnisse aus bereits durchgeführten und dokumentierten Rekonstruktionen von Brandereignissen mittels Brandsimulationsmodellen

Die Round Robin Studie im Rahmen der Dalmarnock Brandversuche zeigt, wie stark die Ergebnisse einer Brandsimulation von den Interpretationen des Modellanwenders abhängig sind. Obwohl zum Großteil von allen Teams dieselbe Software verwendet wurde und die gleichen Eingangsparameter zur Verfügung standen, waren die Modellierung des Szenarios und damit auch die Simulationsergebnisse höchst unterschiedlich. Dieses Beispiel zeigt, dass ein großer Bedarf besteht, die Vorgangsweise und Methodik bei der Rekonstruktion von Brandereignissen mittels Simulationsmodellen zu vereinheitlichen und standardisieren.

Zusammenfassend werden folgende Erkenntnisse aus den Rekonstruktionen der Brandverläufe im WTC und des Station Nightclubs mit Hilfe des Feldmodells FDS festgehalten:

Die Rekonstruktion eines Brandereignisses kann umso genauer erfolgen, je mehr Informationen über die Brandentstehung und den Brandverlauf vorliegen. Insbesondere der Initialbrand (Brandherd) sowie die Ventilationsverhältnisse während des Brandes sind für den weiteren Brandverlauf ausschlaggebend. Beim WTC wurden Brandversuche durchgeführt, anhand welcher das FDS-Modell für den Abbrand von Büroarbeitsplätzen entsprechend validiert werden konnte. Beim Station Nightclub wurden entsprechende Brandversuche durchgeführt, um das FDS-Modell für die Brandentstehungsphase und die Sprinklerwirkung zu validieren.

Ebenso waren bei beiden Brandereignissen der zeitliche Verlauf von Ventilationsbedingungen und Branderscheinungen (Flashover, Rauchaustritt usw.) durch Fotografien bzw. Videoaufnahmen sehr gut dokumentiert.

<sup>37</sup> Tabelle: Rein, 2007, S. 184.

## 2 Der Brandversuch

### 2.1 Warum wurde ein eigener Brandversuch durchgeführt?

In den letzten Jahrzehnten wurde von den verschiedensten Institutionen, Firmen und Organisationen eine Vielzahl an mehr oder weniger wissenschaftlichen Brandversuchen in den unterschiedlichsten Dimensionen durchgeführt. Die Rahmenbedingungen, Eingangsparameter und Zielsetzungen dieser Versuche sind ebenso vielfältig wie die daraus gewonnen Erkenntnisse sowie der Umfang und Detaillierungsgrad der Dokumentationen.

Anfangs war geplant, einen dieser Versuche als Grundlage für die gegenständliche Arbeit heranzuziehen. Es wurden daher umfangreiche Recherchen angestellt, um einen Brandversuch zu finden, welcher folgende Kriterien erfüllen musste, um die Fragestellungen optimal aufzuarbeiten:

- a) Es sollte sich um ein realistisches Brandszenario handeln, welches in jedem Durchschnittshaushalt anzutreffen sein kann.
- b) Der Versuchsraum sollte so ausgestattet sein, dass nach den Löscharbeiten verwertbare Brandspuren festgestellt werden können.
- c) Der Versuchsraum sollte mehrere potentielle Zündquellen aufweisen, welche als mögliche Brandursache in Frage kommen könnten.
- d) Der Brand sollte entsprechend fortgeschritten sein, sodass die Zündquelle nicht von vornherein feststeht.
- e) Der Brand sollte zu einem Zeitpunkt gelöscht werden, wo noch nicht alle Brandlasten verbrannt sind, damit nach den Löscharbeiten noch ein entsprechendes Spurenbild zur Verfügung steht.
- f) Der Versuchsraum sollte mit einer gewissen Dichte an Temperatursensoren ausgestattet sein, damit entsprechende Vergleiche mit der Brandsimulation angestellt werden können.
- g) Der Brandverlauf sollte von verschiedenen Positionen mittels Videoaufnahmen dokumentiert sein, um entsprechende visuelle Vergleiche mit der Brandsimulation anstellen zu können.
- h) Das Spurenbild nach dem Brand sollte möglichst genau dokumentiert sein.

Aus den oben genannten Forderungen hat sich sehr schnell herauskristallisiert, dass lediglich ein Naturbrandversuch mit echter Raumausstattung für die Arbeit geeignet ist. In der einschlägigen Fachliteratur konnte auch eine Vielzahl solcher Brandversuche gefunden werden, jedoch erfüllten diese oftmals nicht die Forderungen b) und c), welche bei tatsächlichen Zimmerbränden fast immer vorhanden sind. Bei den üblichen Naturbrandversuchen ist die Raumausstattung oft sehr dürftig und besteht lediglich aus wenigen einzelnen Möbeln, Geräten und Einbauten ohne irgendwelche Accessoires wie z. B. Dekorationen, Bekleidung usw., welche für die Brandursachenermittlung und Spurenauswertung oftmals von großer Bedeutung sind. Weiters wurde festgestellt, dass bei vielen Brandversuchen der Brandverlauf und die Messdaten zwar sehr gut dokumentiert sind, aber das Spurenbild nach dem Brand oftmals nur sehr mangelhaft oder gar nicht dokumentiert ist, da dies nicht Zielsetzung des jeweiligen Versuches war.

Aus diesen Gründen wurde ein eigener Brandversuch durchgeführt, bei dem die Rahmenbedingungen und Eingangsparameter, aber auch die Auswertung und Analyse der Brandspuren genau an die Aufgabenstellung der gegenständlichen Arbeit angepasst werden konnten.

### 2.2 Beschreibung des Versuchsraumes

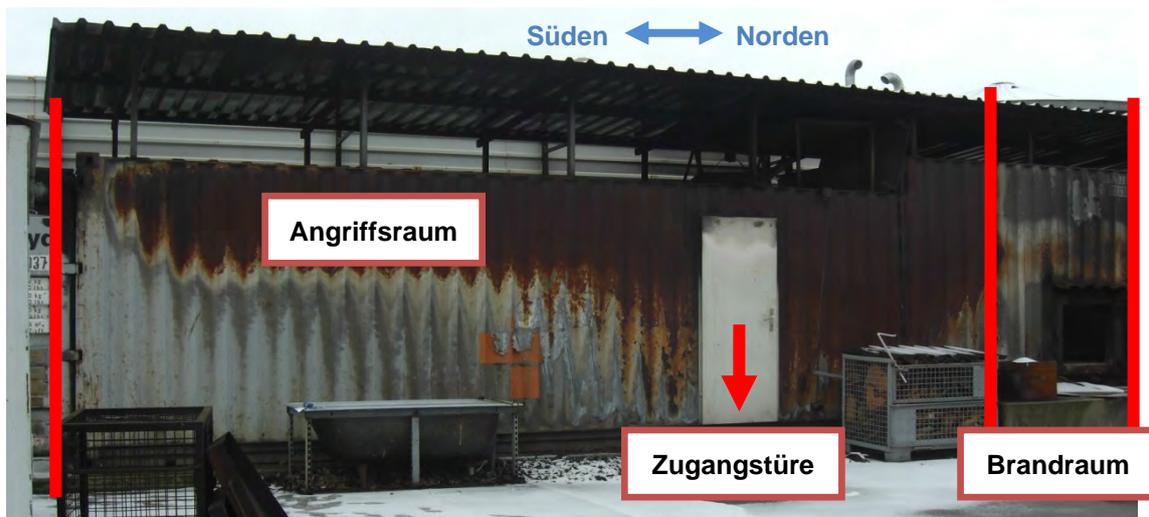
#### 2.2.1 Baubeschreibung

Der Versuchsraum wurde in der Rauchdurchzündungsanlage (RDA) der Freiwilligen Feuerwehr St. Pölten–Stadt durchgeführt. Bei dieser RDA handelt es sich um eine Übungsanlage der Feuerwehr,

womit üblicherweise das richtige Vorgehen bei Rauchdurchzündungen (Flashover) von den Einsatzkräften geübt wird. Bei der RDA handelt es sich um einem 40-Fuß-ISO-Container, der in einem schamottierten Brandraum und einem unverkleideten Angriffsraum unterteilt ist. Der Brandraum ist rund 30 cm gegenüber dem Angriffsraum erhöht und ist im Wand- und Deckenbereich ausschamottiert und durch eine Brandschutztüre mit dem Angriffsraum verbunden.

Die gesamte Übungsanlage ist mit einem Trapezblechprofildach als Regenschutz überdeckt, was brandschutztechnisch jedoch keinen Einfluss hat.

Im Übungsbetrieb wird der Brandraum mit Holzpaletten befeuert, woraufhin die Rauchgase über den Angriffsraum abziehen und bei den richtigen Brand- und Belüftungsverhältnissen eine Rauchdurchzündung („Flashover“) im Angriffsraum entsteht.



**Abbildung 14: Rauchdurchzündungsanlage der Freiwilligen Feuerwehr St. Pölten - Stadt**

Für den Brandversuch wurde lediglich der Angriffsraum benützt. Um realitätsnahe Verhältnisse nachzubilden, wurde der Angriffsraum im Wandbereich einlagig mit Gipskartonplatten (9,5 mm) und im Deckenbereich zweilagig mit Gipskartonplatten (je 9,5 mm) beplankt. Als Unterkonstruktion wurde eine selbsttragende Holzlattenkonstruktion verwendet. Entlang der mittleren Längsachse wurde die Deckenkonstruktion mit 3 Kanthölzern (50 x 50 mm) abgestützt, welche mit einer Lage Gipskarton als Brandschutz verkleidet wurden und gleichzeitig als Messbäume zur Aufnahme der Thermoelemente dienten. Sämtliche Gipskartonplatten waren Standardprodukte (ohne Brandschutzqualifikation und ohne Feuchtraumtauglichkeit). Durch die Auskleidung mit den Gipskartonplatten ergaben sich folgende Vorteile:

- a) Das Wärmeübergangsverhalten ist vergleichbar mit dem eines herkömmlichen Trockenausbaues.
- b) An den hellen Gipskartonwänden sind, im Gegensatz zu den verrußten Containerwänden, sehr deutlich die Rauch- und Brandspuren erkennbar.

Insgesamt wurden für die Verkleidung rund 50 Gipskartonplatten in der Größe 260 x 60 cm verwendet wobei diese nicht verfugt wurden und auch keine sonstigen Brandschutzmaßnahmen ergriffen wurden.

An der nördlichen und südlichen Stirnseite des Containers wurde jeweils eine freistehende Wand aus einer Holzlattenkonstruktion mit einlagiger Gipskartonbeplankung errichtet. In jede der beiden Stirnseiten wurde eine 2-Scheiben Isolierverglasung mit 125 cm Breite und 95 cm Höhe eingebaut. Die südliche Scheibe wurde gekippt eingebaut, so dass die Scheibenoberkante rund 15 cm Abstand zur Wand hatte. Die verwendeten Scheiben waren Standard Isolierverglasungen (zwei Scheiben Floatglas), wobei die

Scheiben über keinen Rahmen verfügten, sondern provisorisch in die Holzlattenkonstruktion der Stirnseiten integriert wurden.

Die Innenabmessungen des fertig ausgekleideten Raumes betragen  $L = 7,15 \text{ m}$ ,  $B = 2,25 \text{ m}$ ,  $H = 2,1 \text{ m}$ , die Grundfläche betrug somit ca.  $16,1 \text{ m}^2$  und das Volumen ca.  $33,8 \text{ m}^3$ .

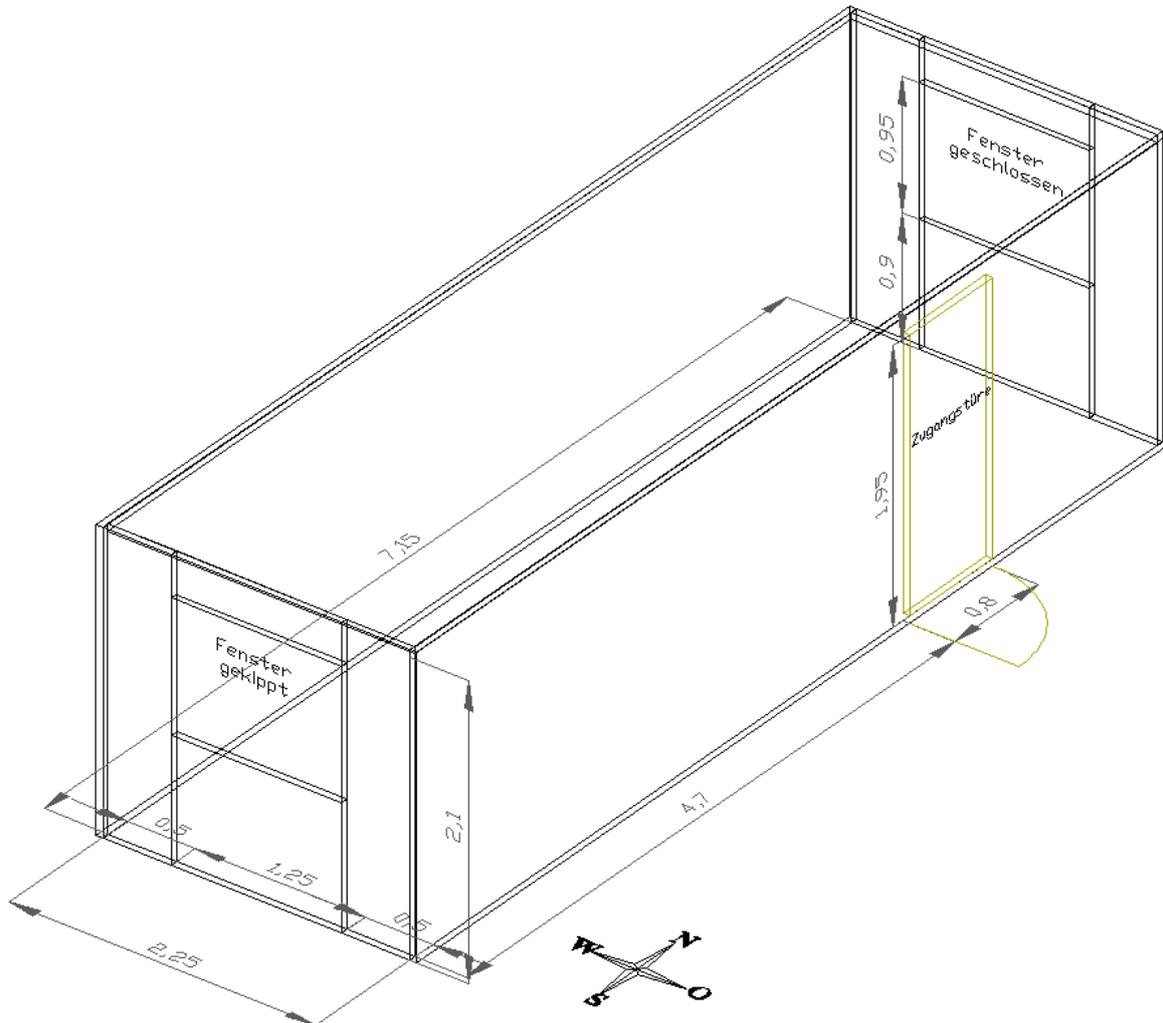


Abbildung 15: 3D-CAD-Modell des Versuchsraumes (Bemaßung in Meter)

Vor Durchführung des Brandversuches wurde bereits durch Modellrechnungen nachgewiesen, dass zur ausreichenden Ventilation des Brandes neben dem gekippten Fenster eine zusätzliche Öffnung erforderlich ist. Diese zusätzliche Ventilationsfläche wurde über die Türöffnung hergestellt, welche während des Brandversuches mit einem Spalt von ca.  $40 \text{ cm}$  geöffnet war. Zu Beginn des Brandversuches verfügte der Raum somit über folgende Öffnungen:

- c) Zugangstüre mit einem Spalt von ca.  $40 \text{ cm}$  geöffnet (= gesamte Öffnungsfläche von rund  $1,1 \text{ m}^2$ )
- d) Südliches Fenster rund  $15 \text{ cm}$  gekippt (= gesamte Öffnungsfläche von rund  $0,33 \text{ m}^2$ )
- e) Kleinere Spalten und Ritzen im Wandbereich

Der Fußboden der RDA besteht aus Dreischicht-Holz-Schalungsplatten, welche für den Brandversuch mit einem sehr dünnen niederflorigen Teppich (Polyamid Teppich mit Rückenschicht aus aufgeschäumtem Latex) abgedeckt wurden. Der Teppich wurde nicht verklebt, sondern mit Nägeln und den Einrichtungsgegenständen fixiert.

### 2.2.2 Raumausstattung

Zielsetzung war, ein möglichst realistisches Brandszenario nachzubilden, wodurch der Raum mit einer Vielzahl unterschiedlicher Möbel und Geräte sowie Gegenständen des täglichen Gebrauchs ausgestattet wurde. Das erklärte Ziel des Brandversuches war, dass im Anschluss an den Brand die Brandspuren ausgewertet werden und die daraus gewonnenen Erkenntnisse und visuellen Wahrnehmungen wiederum als Eingangsparameter für die Brandsimulation herangezogen werden. Aus diesem Grund spielten die vor dem Brand vorhandenen Brandlasten nur eine untergeordnete Rolle und es wurde daher keine genaue Materialbestimmung und Quantifizierung vorgenommen. Detaillierte Bilder der Raumausstattung vor dem Brandversuch sind im Anhang D zu finden.

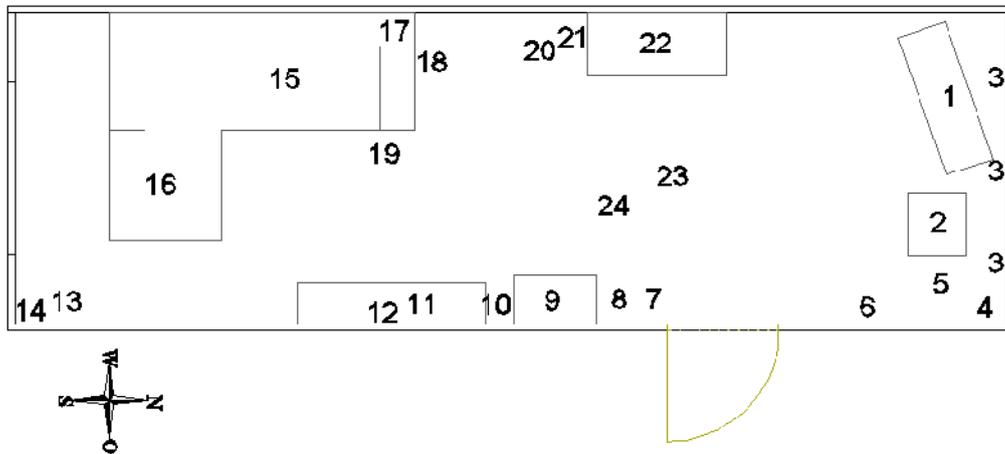
In der folgenden Aufstellung sind alle im Brandraum aufgestellten Möbel und Ausstattungen sowie in den jeweiligen Unterpunkten die darauf oder darin abgestellten Gegenstände angeführt. Die Ordnungsnummern sind im anschließenden Grundrissplan entsprechend ihrer Position im Brandraum eingetragen. Größenangaben in der Klammer stehen für „Breite x Tiefe x Höhe“ (BxTxH), alle Größen in cm:

1. Fernsehkästchen (120x35x70) auf Standfüßen (H=35 cm), Vollholz beschichtet
  - a. Röhrenfernseher, Bildschirmdiagonale 51 cm,
  - b. Thermoskanne
  - c. Anrufbeantworter
  - d. Videorekorder
  - e. Zeitschriftenstapel (H=8 cm)
  - f. Flechtkorbchen
2. Bürostuhl, Schaumgummipolsterung
  - a. T-Shirt über Lehne gehängt
  - b. Polsterauflage auf Sitzfläche mit Schaumstoffkern (H=2 cm)
  - c. Shorts auf der Polsterauflage liegend
3. Vorhang seitlich und über dem Fenster, bis zum Boden reichend
4. Runder Korb (geflochten) mit Stoffauskleidung (35x35x25)
5. Stoffhausschuhe
6. Garderobe mit Ablageboard (H=165 cm)
  - a. Zwei Handtaschen
  - b. Kleine Reisetasche
  - c. 8 x A5-Ordner, 2 x A4-Ordner
  - d. Diverse leere Kunststoffverpackungen (30x20x20) (Spülmittelflasche, Eispackungen,...)
  - e. Puppe (H=25 cm)
  - f. Leere Flasche Sonnenschutzmittel
7. Leere Bierkiste
8. Staubsauger
9. Kästchen mit 5 Regalen (60x35x125), Vollholz, Regalfächer
  - a. Fach 1: leer
  - b. Fach 2: 1,5 l PET-Flasche, Kunststofffolie
  - c. Fach 3: Hemd, Geschenkpaket (20x30x15)
  - d. Fach 4: Fleischwolf (Kunststoff), leere Eispackung (Kunststoff), Kunststoffauflage
  - e. Fach 5: Elektr. Brotschneidemaschine (Kunststoff), Mixer, leere Eierkarton
  - f. Oben: Mikrowellenherd, Kaffeemaschine, Thermoskanne, Geschenkpaket (20x30x10)
10. PC (Standard Tower)

11. Kästchen (135x30x75), Holz beschichtet, Glasschiebetüren in der oberen Hälfte
  - a. Tintenstrahldrucker (im oberen Regal)
  - b. Tastatur (auf dem Kästchen)
  - c. 14 Zoll Röhrenmonitor (auf dem Kästchen)
  - d. Mini Stereoanlage (auf dem Kästchen)
12. Ablagebrett (80x25) H=180
  - a. Diverse leere Kunststoffbehältnisse
13. Alter Filmprojektor (50x20x35) am Boden stehend
14. Leere Kunststoffgießkanne (H=35 cm) am Boden stehend
15. Eck-Sitzcouch - Hauptteil (220x80x40), Höhe der Lehne = 80 cm
  - a. 2 Steppdecken
  - b. 2 Polster
  - c. Zeitschriftenstapel auf Rückenlehne (H=3 cm) und darauf ein Kunststofftelefon
  - d. Radio auf Rückenlehne (30x10x25)
16. Eck-Sitzcouch - kurzer Teil (80x80x40), keine Lehne
17. Wandlampe mit Kunststoff-Lampenschirm (10x10x30) (H=180 cm)
18. Elektroheizkörper (15x75x65)
19. Plastikhocker (40x30x30)
20. Paar Turnschuhe
21. PC (Standard Tower)
22. Kasten (105x45x200), zu Versuchsbeginn waren Türen geschlossen
  - a. Im Kasten liegend bzw. aufgehängt:
    - 5 kleinere Kleidungsstücke (Shorts, T-Shirt)
    - Kleine Reisetaschen (leer)
    - 3 Plastiksäckchen
  - b. Auf dem Kasten:
    - 2 Plastiksäckchen
  - c. Auf der linken Außenseite des Kasten aufgehängt:
    - Kleine Lederhandtaschen, Handtasche aus Bast, eine Hose
  - d. Auf der linken Außenseite des Kasten aufgehängt:
    - Eine Jacke
23. Runde Deckenlampe mit Metallsockel und Glas-Lampenschirm (D=25 cm)
24. Teppich (Bodenläufer) 120x60

Die Aufstellung zeigt, dass es sich um einen Standard-Wohnraum handelte, wie er in sehr vielen Haushalten vorkommen könnte, lediglich die Raumhöhe war mit 2,1 m etwas geringer als üblich, was jedoch für die gegenständliche Arbeit nicht weiter wesentlich war.

Im anschließenden Plan sind die in der vorigen Aufstellung angeführten Brandlasten entsprechend ihrer Ordnungsnummern und Positionen im Versuchsraum dargestellt:



**Abbildung 16: Grundriss des Versuchsraumes mit Darstellung der Brandlasten**

Die folgenden beiden Fotos zeigen den fertig eingerichteten Versuchsraum unmittelbar vor Versuchsbeginn. Sehr gut erkennbar sind die drei Deckenstützen in der Raummitte welche aus statischen Gründen erforderlich waren und gleichzeitig zur Halterung der Temperatursensoren dienten. Im Hintergrund des folgenden Bildes ist der Fernseher erkennbar, welcher als Zündquelle diente.



**Abbildung 17: Versuchsraum vor der Zündung, Blickrichtung Norden**



Abbildung 18: Versuchsraum vor der Zündung, Blickrichtung Süden

### 2.2.3 Messtechnik und Aufzeichnung

Für den Brandversuch wurde der Versuchsraum mit folgender Mess- und Aufzeichnungstechnik ausgestattet:

- a) 8 x Mantelthermoelement Typ „K“ (NiCr-Ni) mit Mineralisolierung und Metallhülle  $\varnothing = 1,5$  mm
- b) 17 x Thermoelement Typ „K“ (NiCr-Ni), je 2 Litzen ( $\varnothing = 0,315$  mm) verdrillt
- c) 1 x Sauerstoffmessgerät
- d) 2 x Wärmebildkamera „MSA Auer Evolution 4000“
- e) 1 x Minikamera schwarz/weiß (Auflösung 352x288) im Versuchsraum
- f) 3 x Videokamera (Camcorder), je eine Kamera auf den Stirnseiten und eine mobile Kamera

Die 8 Thermoelemente (a) waren bereits fix in der Westseite der RDA installiert und ragten beim Brandversuch durch Löcher in den Gipskartonplatten ca. 5 cm in den Versuchsraum hinein.

Die 17 zusätzlichen Thermoelemente (b) wurden durch Verdrillen von einlitzen Typ-K-Thermoelementleitungen (NiCr-Ni-Litzendurchmesser = 0,315 mm) hergestellt. Je zwei Messstellen waren bei den Innenseiten der beiden Stirnseitenfenster angebracht, je vier Messstellen an den drei Deckenstützen und eine Messstelle im Fernseher im Bereich der Zündquelle. Durch die sehr dünnen Thermoelementleitungen ist die Masse der Messstelle sehr gering, wodurch die Temperaturmessung sehr dynamisch mit kurzen Ansprechzeiten erfolgte.

Sämtliche Thermoelemente waren so ausgeführt, dass neben der Umgebungstemperatur auch die Erwärmung durch die Strahlungseinwirkung gemessen wurde. Eine Kompensation diesbezüglich erfolgte nicht.

Die Messdatenerfassung der Thermoelemente erfolgte mit einem Messumformer und einer auf Microsoft Excel basierenden Aufzeichnungssoftware, welche von der Technischen Universität Wien zur Verfügung gestellt wurden. Die Temperatur jedes Thermoelementes wurde hierbei im Intervall von 10 Sekunden automatisch gespeichert.

Das Sauerstoffmessgerät (c), dessen Ansaugöffnung im Bereich der südlichen Stirnseite positioniert war, wurde von der MA 39 der Stadt Wien zur Verfügung gestellt und ist speziell für die Messung von Sauerstoffkonzentration in Heißgasen geeignet. Die Ablesung und Dokumentation des Sauerstoffgehaltes erfolgte manuell im Intervall von 10 Sekunden.

In der folgenden Tabelle sind die Koordinaten der Thermoelemente und der Ansaugöffnung des Sauerstoffmessgerätes angeführt. Die XYZ-Werte bezeichnen die Koordinaten des Messpunktes, wobei als Nullpunkt des Koordinatensystems die südwestliche unterste Ecke im Versuchsraum gewählt wurde. Als Längeneinheit wurden „Meter“ gewählt, da dies gleichzeitig die Einheit für die Eingabeparameter des Brandsimulationsprogrammes FDS ist.

Bezeichnung	X	Y	Z	Erläuterung
A1	1,15	5,45	0,50	Thermoelement-Messbaum Nord (H=0,50)
A2	1,15	5,45	1,00	Thermoelement-Messbaum Nord (H=1,00)
A3	1,15	5,45	1,50	Thermoelement-Messbaum Nord (H=1,50)
A4	1,15	5,45	2,00	Thermoelement-Messbaum Nord (H=2,00)
B1	1,15	3,65	0,50	Thermoelement-Messbaum Mitte (H=0,50)
B2	1,15	3,65	1,00	Thermoelement-Messbaum Mitte (H=1,00)
B3	1,15	3,65	1,50	Thermoelement-Messbaum Mitte (H=1,50)
B4	1,15	3,65	2,00	Thermoelement-Messbaum Mitte (H=2,00)
C1	1,15	1,85	0,50	Thermoelement-Messbaum Süd (H=0,50)
C2	1,15	1,85	1,00	Thermoelement-Messbaum Süd (H=1,00)
C3	1,15	1,85	1,50	Thermoelement-Messbaum Süd (H=1,50)
C4	1,15	1,85	2,00	Thermoelement-Messbaum Süd (H=2,00) (Störung)
F1	1,15	7,20	1,00	Thermoelement nördliches Fenster mittig unten
F2	1,15	7,20	1,75	Thermoelement nördliches Fenster mittig oben
K1	1,15	0,00	1,00	Thermoelement südliches gekipptes Fenster mittig unten
K2	1,15	0,00	1,75	Thermoelement südliches gekipptes Fenster mittig oben
Z				Thermoelement direkt beim Brandherd (Fernseher)
S1	0,05	0,40	1,95	RDA Thermoelement Süd oben
S2	0,05	0,40	1,20	RDA Thermoelement Süd mittig
S3	0,05	0,40	0,15	RDA Thermoelement Süd unten
S4	0,05	3,65	1,95	RDA Thermoelement mittig oben
S5	0,05	3,65	1,20	RDA Thermoelement mittig mittig
S6	0,05	3,65	0,15	RDA Thermoelement mittig unten
S7	0,05	7,00	1,95	RDA Thermoelement Nord oben
S8	0,05	7,00	0,30	RDA Thermoelement Nord unten
O2	2,10	0,40	1,00	Ansaugung (H=1,00) östlich vom südl. Fenster für O <sub>2</sub> -Messung

**Tabelle 3: Auflistung der Messstellen im Versuchsraum**

Die Ansaugung der Luft für die Sauerstoffmessung („O<sub>2</sub>“) erfolgte über ein Metallrohr, welches östlich vom südlichen Fenster in einer Höhe von einem Meter montiert war.

Das Thermoelement „Z“ befand sich direkt beim Brandherd (im Fernsehgerät) und diente zur Erfassung der Initialbrandquelle, um den genauen Brandbeginn festlegen zu können. Im weiteren Brandverlauf konnte aufgrund des Abschmelzens und Zusammenbrechens des Fernsehers bzw. des Kästchens die Lage dieses Thermoelements „Z“ nicht mehr festgestellt werden.

Das Thermoelement „C4“ (südlicher Messbaum – oben) ist unmittelbar nach Versuchsbeginn ausgefallen und lieferte keine brauchbaren Messwerte.

Die Thermoelemente „F1“ und „F2“ befanden sich am nördlichen Fenster, welches im Zuge des Brandversuches aufgrund der thermischen Belastung zerstört wurde. Es konnte nicht festgestellt werden, inwieweit sich die Position der beiden Thermoelemente nach dem Brechen der Glasscheibe verändert hat.

Ansonsten haben alle Thermoelemente bis zum Versuchsende realistische und plausible Messwerte geliefert.

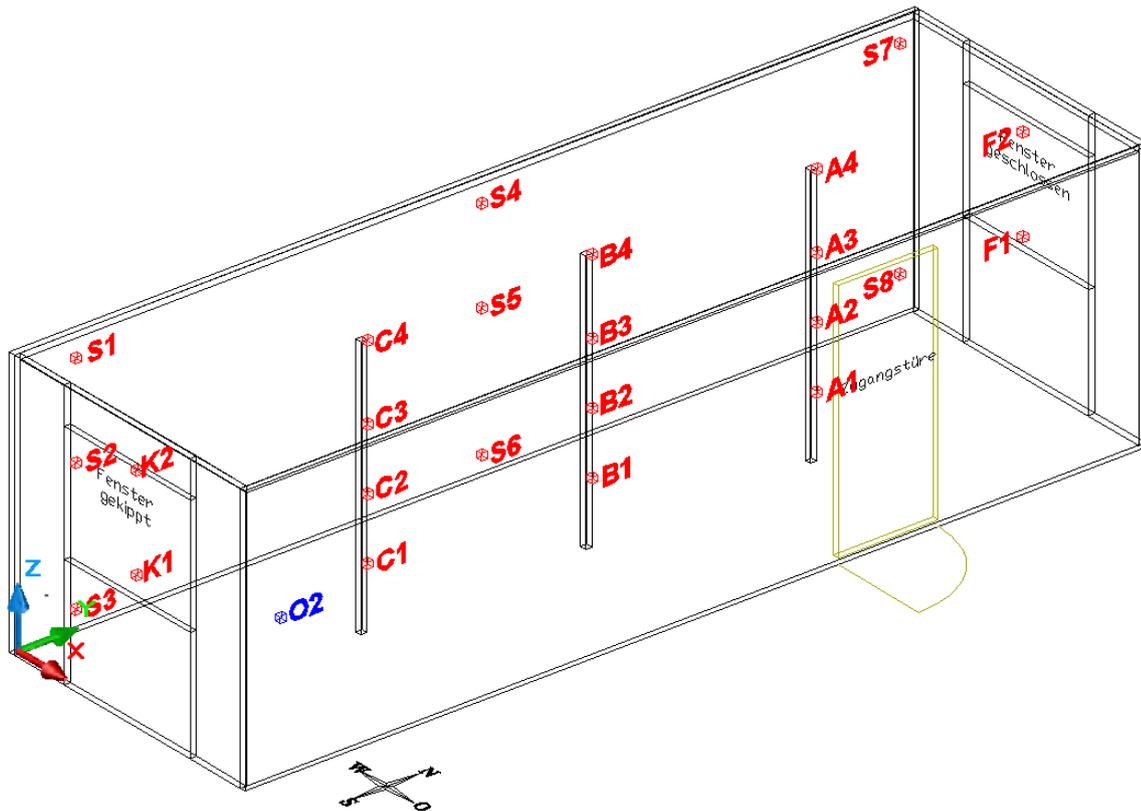


Abbildung 19: Planische Darstellung der Messstellen im Versuchsraum

Die beiden Wärmebildkameras (d) wurden jeweils auf einer Stirnseite neben dem Fenster fix positioniert und zeichneten das Brandgeschehen durch faustgroße Öffnungen in der Gipskartonwand auf. Da sie im Gegensatz zu den Videokameras nicht durch die Fensterscheiben geschützt waren, mussten sie rund 8 Minuten nach der Entzündung vom Brandraum entfernt werden. Die Kameras dienen vor allem zur Visualisierung der Temperatureinwirkungen auf die Bauteile und Einrichtungsgegenstände. Eine genaue Messung der Oberflächentemperatur ist hiermit jedoch nicht möglich.

Die Minikamera (e) war im südöstlichen Bereich des Brandraumes am Boden situiert und lieferte bis kurz vor dem Beginn des Löschangriffes eindrucksvolle Schwarzweißbilder vom Brandgeschehen und den Rauchdurchzündungen (Flashover) im Inneren des Versuchsraumes. Die Kamera war als „Opferkamera“ vorgesehen und wurde im Rahmen des Versuches zerstört.

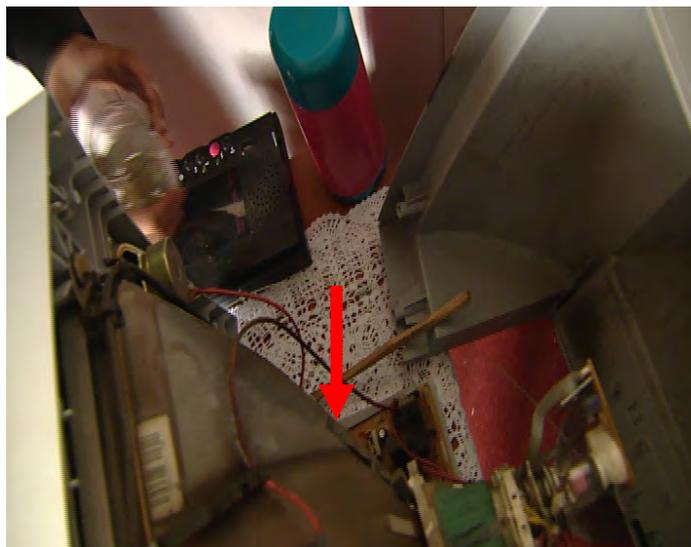
Die Videokameras (f) waren herkömmliche Camcorder, welche vor den nördlichen und südlichen Stirnseitenfenstern positioniert waren und vor allem von der Brandentstehungsphase sehr gute Bilder lieferten. Die südliche Kamera lieferte aufgrund der raschen Verrauchung nur in den ersten Minuten brauchbare Bilder, die nördliche Kamera lieferte bis zum großflächigen Herausbrechen des nördlichen Stirnfensters sehr gute und eindrucksvolle Bilder direkt vom Brandherd. Mit der mobilen Kamera wurden

der Brandversuch und die Löschmaßnahmen von außen aus unterschiedlichen Perspektiven aufgezeichnet.

## 2.3 Ablauf des Brandversuches

### 2.3.1 Entzündung

Als Brandursache wurde ein herkömmlicher Röhrenfernseher (Marke Pionier, Modell N5120T) mit 51 cm Bildschirmdiagonale angenommen, welcher aus vermeintlich unbekannter Ursache zu brennen begonnen hat. Inwieweit das Kunststoffgehäuse flammhemmende Eigenschaften hatte, konnte nicht festgestellt werden. Im Versuch erfolgte die Entzündung im Inneren des Fernsehers durch Napalm-B (Mischung aus Benzin, Benzol und Polystyrol), welches den Vorteil hat, dass es zähflüssig ist und sehr gute Hafteigenschaften sowie eine lange Brenndauer besitzt. Dadurch konnte eine Menge von rund 3 ml im linken unteren Bereich der Hauptprintplatte (unter der Bildröhre) sehr einfach appliziert werden und in weiterer Folge durch ein Feuerzeug entzündet werden. Das Gehäuse wurde unmittelbar nach der Zündung verschlossen und mit Isolierbändern fixiert, anschließend wurde der weitere Brandverlauf bis zum Beginn der Löschmaßnahmen nicht weiter beeinflusst.



**Abbildung 20: Zündquelle im linken unteren Bereich des Fernsehgerätes (mobile Videokamera)**

Da Napalm-B sehr stark rauchend verbrennt, war unmittelbar nach der Zündung bereits deutlich der aus dem Gehäuse austretende Rauch sichtbar.

Das Brandverhalten des Fernsehers war ein wesentliches Kriterium für den weiteren Verlauf des gesamten Brandversuches, wobei sich herausgestellt hat, dass der Brandverlauf typisch<sup>38</sup> für einen Röhrenfernseher war:

1. Das Kunststoffgehäuse begann zuerst im unmittelbaren Flammenbereich zu schmelzen.
2. Brennend abtropfender Kunststoff formte am Kästchen und in weiterer Folge am Boden eine brennende Kunststofffläche.
3. Diese Sekundärbrände beschleunigten wiederum die Brandausbreitung vom Fernseher selbst.

---

<sup>38</sup> Vgl. Shelley/Spearpoint/Bittern, 2006-2007, S. 53.

4. Immer wieder hörte man laute Knallgeräusche von Elektronikbauteilen.
5. Die Bildröhre bekam durch die Wärmeeinwirkung mehrere Sprünge verbunden mit knackenden Geräuschen, wobei es jedoch zu keiner Implosion kam.



**Abbildung 21: Aus dem TV-Gerät austretender Rauch 50 Sek. nach Entzündung (mobile Videokamera)**

### 2.3.2 Brandverlauf

Die wesentlichsten Beobachtungen und Ereignisse während des Brandversuches sind in der folgenden Liste angeführt, wobei die Zeitangaben die Minuten und Sekunden ab Zündung angeben.

- 0:00 Zündung
- 0:50 Rauch im Deckenbereich über dem Fernseher deutlich sichtbar.
- 1:40 Kleine Flammen im linken unteren Bereich des Fernsehers sichtbar.
- 3:16 Flammen treten im linken Seitenbereich aus dem Fernseher heraus.
- 3:49 Brennendes Abtropfen des Fernsehers bis zum Fußboden, Brand auf Fernseher beschränkt
- 4:15 Beginnender Vollbrand des Fernsehers, Brand breitet sich auf das Kästchen aus.
- 4:50 Größere abgeschmolzene Teile des Fernsehers bilden Stützfeuer im Bodenbereich.
- 5:06 Vorhang im Bereich des Fernsehers beginnt zu brennen.
- 5:40 Vorhang auf der Seite des Fernsehers im Vollbrand
- 5:53 Sprung in der Isolierglasscheibe (Innenseite) entsteht.
- 6:01 Bildröhre des Fernsehers kippt nach vorne auf den Boden.
- 6:39 Teile der inneren Isolierglasscheibe brechen heraus.
- 6:46 Innere Isolierglasscheibe bricht großflächig heraus.
- 6:57 Faustgroßes Loch in der äußeren Isolierglasscheibe bricht heraus.
- 7:32 Äußere Isolierglasscheibe bricht großflächig heraus.
- 8:30 Flammen züngeln im oberen Bereich der Türöffnung ins Freie.
- 8:46 Erstmals Rauchdurchzündungen im Deckenbereich sichtbar (Flashover)
- 9:20 Wiederholte Rauchdurchzündungen im gesamten Deckenbereich
- 9:30 Vollbrand vom Decken- bis zum Bodenbereich, Flammen schlagen massiv aus der Türöffnung.
- 10:20 Öffnung der Türe, Beginn des Löschangriffes über die Türöffnung
- 10:50 Rauchdurchzündungen wurden niedergeschlagen.
- 10:55 Erster Mann des Atemschutztrupps betritt den Brandraum.

11:40 Großteil der Flammen abgelöscht

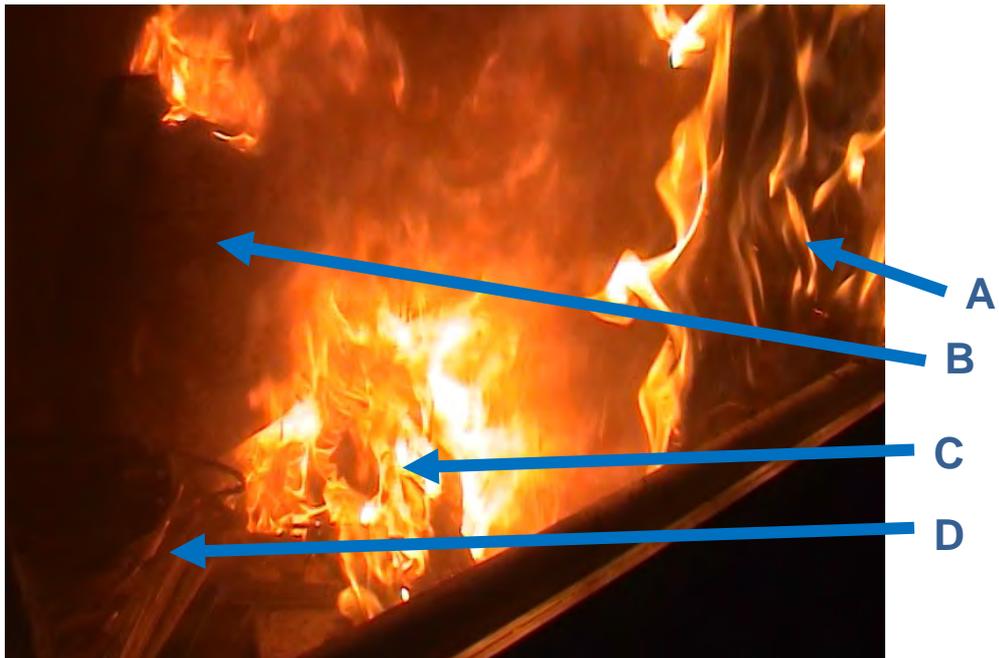
14:30 Brand abgelöscht, geringe hellgraue Verrauchung im gesamten Raum

Nach 3:20 Minuten sind deutliche Flammen im linken Seitenbereich des Fernsehers sichtbar.



**Abbildung 22: Flammen im linken Bereich des Fernsehers 3:20 Minuten nach Versuchsbeginn**

Im folgenden Bild von der Videokamera der nördlichen Stirnseite (5:30 Minuten nach der Entzündung) ist erkennbar, dass der Brand bereits auf den Vorhang vom nördlichen Fenster übergegriffen hat (A). Der vordere Teil des Gehäuses mit der Bildröhre steht noch am Kästchen (B). Sehr gut sichtbar ist, dass die Rückwand nach hinten weggekippt ist und der Brand bereits teilweise auf das Fernsehkästchen übergegriffen hat (C). Der Zeitschriftenstapel und das Flechtkörbchen auf dem Videorekorder wurden noch nicht in Brand gesetzt (D). Zu diesem Zeitpunkt herrschen im Deckenbereich über dem Brandherd (Thermoelement „S7“) bereits Temperaturen von rund 350 °C. Das Thermoelement „S1“, welches sich am anderen Ende des Raumes (Südseite) im Deckenbereich befindet, misst eine Temperatur von rund 125 °C. Zu diesem Zeitpunkt treten beim gekippten Fenster und bei der teilweise geöffneten Türe bereits dichte schwarze Rauchschwaden aus.



**Abbildung 23: Bild vom Brandherd nach 5:30 Minuten von der Videokamera an der nördlichen Stirnseite**

Im folgenden Bild der nördlichen Videokamera ist nach 7:32 Minuten sehr gut erkennbar, wie der Bereich vor dem Fenster der nördlichen Stirnseite bereits in Vollbrand steht und die äußere Isolierglasscheibe gerade zusammenbricht. Die innere Isolierglasscheibe ist bereits rund 50 Sekunden vor diesem Bild zerbrochen. Die Temperatur im Deckenbereich beträgt beim nördlichen Messbaum (Thermoelement „A4“) zu diesem Zeitpunkt rund 720 °C. Das Thermoelement „S1“, welches sich am anderen Ende des Raumes (Südseite) im Deckenbereich befindet, misst eine Temperatur von rund 240 °C.

Durch den Bruch der nördlichen Glasscheibe wird die Ventilation des Brandes wesentlich verbessert, wodurch die Temperaturen im Brandraum massiv ansteigen. Der Atemschutztrupp, welcher sich vor dem nördlichen Stirnfenster befand und die Video- bzw. Wärmebildkamera bediente, musste aufgrund des massiven Temperaturanstieges diesen Bereich kurz nach dem Brechen der Glasscheiben verlassen.



**Abbildung 24: 7:32 Minuten nach Brandbeginn bricht die äußere Scheibe des nördlichen Stirnfensters**

Etwas mehr als eine Minute nach dem Brechen der nördlichen Glasscheibe wurden von der Opferkamera (auf dem Boden der Südseite) im Inneren des Brandraumes die ersten Rauchdurchzündungen (Flashover) aufgezeichnet, welche bis zum Einsetzen der Löschmaßnahmen immer intensiver wurden und teilweise bis zur Südseite des Containers reichten (siehe Pfeil im folgenden Bild).



**Abbildung 25: Rauchdurchzündung rund 9:20 Minuten nach Brandbeginn**

Vom Versuchsleiter war zu diesem Zeitpunkt erkennbar, dass die Brandintensität aufgrund der laufenden Rauchdurchzündungen massiv zunahm und ein Vollbrand des Raumes unmittelbar bevorstand. Um optimale Voraussetzungen für die Auswertung der Brandspuren vorzufinden und um zu verhindern, dass die Gipskartonauskleidung aufgrund der Brandeinwirkung zusammenbricht, wurden die

Löschmaßnahmen rund 10 Minuten nach Brandbeginn eingeleitet. Unmittelbar vor dem Beginn der Löschmaßnahmen (10:20 Minuten) betrug die Deckentemperatur beim nördlichen Messbaum (Thermoelement „A4“) rund 930 °C und die Bodentemperatur rund 841 °C (Thermoelement „A1“). Beim südlichen Messbaum betrug die Bodentemperatur immer noch rund 268 °C.



**Abbildung 26: Löschangriff der Feuerwehr nach 10:20 Minuten**

Rund 1 ½ Minuten nach Beginn des Löschangriffes war ein Großteil der Flammen abgelöscht und rund 4 Minuten nach Beginn der Löschangriffes war der Brand komplett gelöscht.

## **2.4 Auswertung des Brandversuches**

### **2.4.1 Auswertung der Messergebnisse**

Die Auswertung der Temperaturverläufe und der Sauerstoffkonzentration deckt sich weitgehend mit den beobachteten Brandphänomenen. Nach rund 6:40 Minuten sinkt die Sauerstoffkonzentration massiv ab, was sehr gut mit der Auswertung der innenliegenden Opferkamera korreliert, welche zu diesem Zeitpunkt ein Absinken der Rauchsicht aufzeichnete. Die minimale Sauerstoffkonzentration erreichte in der maximalen Brandphase einen Wert von rund 1,3%. Die detaillierten Auswertungen der einzelnen Thermoelemente und der Sauerstoffmessung ist im Anhang B angeführt.

Das folgende Diagramm zeigt als Zusammenfassung und zur übersichtlichen Illustration der Messergebnisse die Durchschnittstemperatur im Decken- und Bodenbereich, die Sauerstoffkonzentration sowie zusätzlich die Eintragung der einzelnen bedeutenden Ereignisse im Zuge des Brandverlaufes. Die Durchschnittstemperatur im Deckenbereich ist der arithmetische Mittelwert der Sensoren A4, B4, S1, S4.

Die Durchschnittstemperatur im Bodenbereich ist der arithmetische Mittelwert der Sensoren A1, B1, C1, S3, S6. Demnach wurden bei der arithmetischen Mittelwertbildung die Thermoelemente S7 und S8 im unmittelbaren Bereich des Brandherdes nicht berücksichtigt.

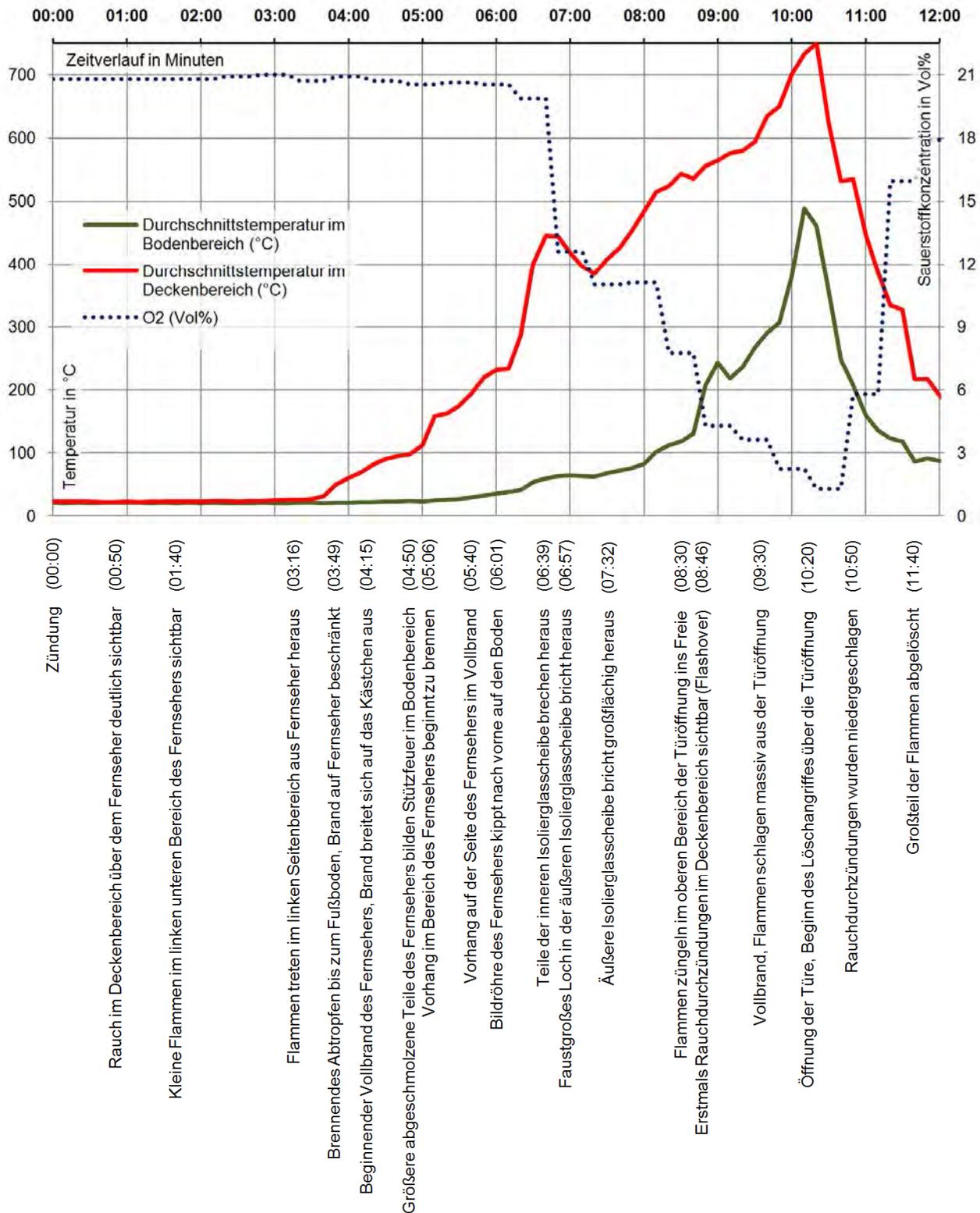


Abbildung 27: Zusammenfassung der Messergebnisse vom Brandversuch

### 2.4.2 Auswertung des Spurenbildes im Anschluss an den Brandversuch

Nachdem der Brand durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr abgelöscht wurde und der Brandraum abgekühlt war, wurden die Brandspuren aufgenommen und entsprechend dokumentiert. Im Wesentlichen wurden hierbei folgende Spuren an den baulichen Einrichtungen festgestellt:

- Wand-Gipskartonplatten im Bereich des Brandherdes völlig bzw. teilweise zerstört
- Teppich in der nördlichen Hälfte des Raumes komplett bzw. stark verbrannt
- Nördliches Fenster völlig zerstört
- Südliches (gekippertes) Fenster intakt, jedoch mit zahlreichen Sprüngen auf der inneren Isolierglasscheibe
- Charakteristische Rußspuren an den Wänden und Decken, Kartonschicht der Gipskartonplatten teilweise abgebrannt

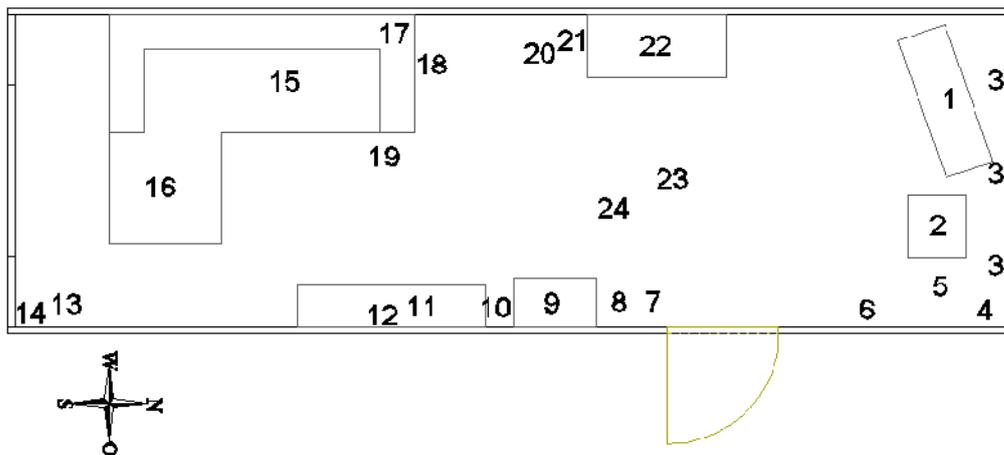


Abbildung 28: Grundriss des Versuchsraumes mit Darstellung der Brandlasten

Spuren an der Einrichtung bzw. Raumausstattung:

- Fernsehkästchen (1) und Drehstuhl (2) im nördlichen Bereich nahezu vollständig verbrannt
- Vorhang (3) komplett verbrannt
- Garderobebereich (4-6) nahezu vollständig verbrannt
- Bierkiste (7) nahezu vollständig zusammengeschmolzen / verbrannt
- Staubsauger (8) teilweise verbrannt
- Kästchen (9) stark verbrannt
- Mikrowellenherd (9f) stark verbrannt bzw. angeschmolzen
- PC (10) stark angeschmolzen
- Drucker, Tastatur, Monitor und Stereoanlage auf Kästchen (11) stark angeschmolzen bzw. teilweise verbrannt
- Kunststoffbehältnisse auf Ablagebrett (12) nahezu vollständig verbrannt
- Filmprojektor (13) leicht angeschmolzen
- Gießkanne (14) angeschmolzen
- Telefon und Radio auf der Couchlehne (15) stark angeschmolzen
- Sitzcouch (15,16) starke Rußspuren, jedoch nicht verbrannt
- Wandlampe (17) verbrannt bzw. zu Boden gefallen
- Kunststoffteile des Elektroheizkörpers (18) stark geschmolzen bzw. teilweise verbrannt
- Plastikhocker (19) leicht angeschmolzen
- Turnschuhe (20) verrußt

- PC (21) stark angeschmolzen bzw. verbrannt
- Kasten (22) angebrannt, Kasteninhalt im oberen Bereich stark verbrannt
- Deckenlampe (23) Glas abgeschmolzen

Die Auswertung des Spurenbildes sowohl an der baulichen Substanz als auch an der Einrichtung und Raumausstattung weist typisch darauf hin, dass der Brand vom nördlichen Bereich des Raumes ausgegangen sein muss.

### 2.4.3 Fotografische Dokumentation der kalten Brandstelle

In diesem Kapitel werden zur Illustration einige Bilder der kalten Brandstelle dargestellt, eine vollständige Fotodokumentation des Brandversuches ist im Anhang G zu finden.

Auf dem folgenden Bild ist im linken Bereich sehr gut die Wärmeeinwirkung auf die Gipskartonplatten zu erkennen, wo durch die Temperatur die Kartonschicht teilweise abgebrannt ist.



**Abbildung 29: Foto des Brandraumes, Blickrichtung Norden**

Das folgende Bild zeigt den völlig zerstörten Brandausbruchsbereich. Im Hintergrund ist die zerstörte Gipskartonplatte zu erkennen. Im rechten Bildbereich sind die metallenen Reste des Drehstuhles erkennbar.



**Abbildung 30: Foto des Brandherdes, Blickrichtung Nordwest**

Im folgenden Bild ist links das Kästchen mit dem Mikrowellenherd erkennbar. Rechts ist die Couch sichtbar, welche lediglich starke Rußspuren aufweist, jedoch nicht zu brennen begonnen hat.



**Abbildung 31: Foto des Brandraumes, Blickrichtung Süden**

Im folgenden Bild ist das Kästchen mit dem PC-Arbeitsplatz und der Stereoanlage an der östlichen Wandseite sichtbar. In diesem Bereich kam es zu starken Abschmelzungen und teilweisem Abbrand.



**Abbildung 32: Foto des PC-Arbeitsplatzes, Blickrichtung Südosten**

Im folgenden Bild ist die südliche gekippte Fensterscheibe sichtbar, wobei sehr gut die charakteristischen Sprünge erkennbar sind.



**Abbildung 33: Foto des südlichen gekippten Fensters mit den charakteristischen Sprüngen**

### 3 Simulation des Brandversuches

In diesem Kapitel ist die Rekonstruktion des Brandversuches mittels des Feldmodells FDS beschrieben. Allgemeine Informationen zu Brandsimulationsmodellen sind im Kapitel 1.2 angeführt. Die grundsätzlichen Überlegungen zur Rekonstruktion von Brandverläufen und Beispiele anderer Brandrekonstruktionen in der Vergangenheit wurden im Kapitel 1.3 bereits einer näheren Betrachtung unterzogen.

#### 3.1 Das Brandsimulationsmodell „Fire Dynamics Simulator“ (FDS)

##### 3.1.1 Allgemeines

Aufgrund des in Kapitel 1.3.2 beschriebenen Auswahlverfahrens wurde für die gegenständliche Arbeit das Feldmodell FDS in der Version 5.4.1 herangezogen, um Untersuchungen zur Rekonstruktion von Brandereignissen anzustellen.

FDS wurde vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelt und verfügt aufgrund seiner kostenlosen Verfügbarkeit über den weltweit größten Benutzerkreis. Neben dem kommerziellen Einsatz im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes wird FDS auch von vielen Ausbildungsinstitutionen und Forschungsgruppen eingesetzt, um verschiedenste Aufgabestellungen im Zusammenhang mit Brandsimulation zu bearbeiten. In einem eigenen Benutzerforum, welches von den Programmentwicklern administriert wird, tauschen sich über 1.000 Benutzer (1.020 per 12.02.2010) über Erfahrungen und Problemstellungen im Zusammenhang mit dem Programm aus. Viele Anfragen werden hierbei innerhalb kürzester Zeit direkt von den Programmentwicklern beantwortet und das Benutzerfeedback fließt laufend in die neuesten Releases mit ein. Weiters verfügt FDS über eigene Verifizierungs- und Validierungshandbücher, wodurch den Programmanwendern einheitliche Vorgaben für den Verifizierungs- und Validierungsprozess zur Verfügung stehen. Aufgrund dieser Tatsachen ist FDS das sicherlich am besten validierte CFD-Brandsimulationsprogramm, das derzeit verfügbar ist.

##### 3.1.2 Programmfeatures

Neben der Lösung der Erhaltungsgleichungen für die Masse, Energie und Impuls (Navier-Stokes-Gleichungen) verfügt das Programm FDS über eine Vielzahl von Untermodellen, mit deren Hilfe ein Brand und dessen Phänomene relativ umfassend simuliert werden können. Im Folgenden erfolgt eine Auflistung der wesentlichsten Features:

1. Hydrodynamisches Modell, optional kann eine direkte numerische Simulation (DNS) statt der standardmäßigen Large-Eddy-Simulation (LES) durchgeführt werden.
2. Simulation von Be- und Entlüftungseinrichtungen
3. Verbrennungsmodell (fixe oder variable Brandleistungen bzw. Abbrand von Brandlasten)
4. Strahlungsmodell
5. Definition der Oberflächen und Materialeigenschaften
6. Sprinklermodell zur Simulation der Wirkung von Sprinklern bzw. Wassertröpfchen
7. Detektorenmodell zur Simulation des Auslöseverhaltens unterschiedlicher Meldertypen
8. Steuerung von Ereignissen (Be- und Entlüftung, Sprinkler) durch Detektoren<sup>39</sup>

---

<sup>39</sup> Vgl. NIST FDS Technical Reference Guide, Volume 1, 2009, S. 15ff.

FDS verfügt aber auch über einige Einschränkungen, die im folgenden Abschnitt angeführt sind:

1. Das Modell gilt nur bis rund ein Drittel der Schallgeschwindigkeit (ca. 370 km/h), was jedoch für übliche Verbrennungsvorgänge (d. h. z. B. keine Explosionen) jedenfalls ausreichend ist.
2. Geometrien können nur orthogonal abgebildet bzw. simuliert werden. Bei schrägen oder runden Strukturen vermindert eine spezielle Korrekturfunktion den Einfluss der „sägezahnförmigen“ Oberfläche.
3. Das implementierte Verbrennungsmodell („Mixture Fraction“-Modell) kann einen tatsächlichen Verbrennungsvorgang nur annähernd simulieren. Bei großen und gut ventilierten Bränden liefert das Modell sehr realistische Ergebnisse. Im Gegensatz dazu ist der Unschärfefaktor bei kleinen und/oder schlecht ventilierten Bränden relativ groß und fehlerbehaftet.
4. Einschränkungen bei der Simulation der Brandleistung und Brandausbreitung aufgrund des Abbrandes der vorhandenen Brandlasten. Da auch bei realen Brandverläufen diese Faktoren stark abhängig sind von Material, Oberflächenbeschaffenheit, Anordnung usw., können auch in der Simulation diese Faktoren niemals genau reproduziert werden. Weiters ist eine Verbrennung an sich ein sehr komplexer chemisch-physikalischer Vorgang, welcher durch das integrierte Brandmodell nur näherungsweise und vereinfacht simuliert werden kann.
5. Auch das Strahlungsmodell ist bestimmten Einschränkungen unterworfen, da die Strahlungsimmission unter anderem z. B. auch von der Dichte bzw. dem Absorptionsgrad der Rauchsicht abhängig ist. Diese Faktoren sind wiederum stark abhängig vom Verbrennungsmodell (siehe voriger Punkt).<sup>40</sup>

### 3.1.3 FDS – Hardware

Grundsätzlich stellt die Simulation mittels CFD-Modellen sehr hohe Anforderungen an die verwendete Hardware. Die Rechenzeit wird am wesentlichsten beeinflusst von der Anzahl der Rechenzellen, aber auch von anderen Faktoren, z. B. erhöhen sehr dynamische Vorgänge (hohe Brandintensität, große Strömungsgeschwindigkeiten) erhöhen die Rechenzeit wesentlich.

Für die gegenständliche Arbeit wurde ein Intel i7 920 2,66 GHz Quadcore-System mit 12 GB DDR3 RAM Speicher und Linux-Betriebssystem eingesetzt. Trotz Nutzung dieses modernen Vierkern-Systems betrug die durchschnittliche Rechenzeit pro Simulationsdurchgang rund 50 Stunden.

### 3.1.4 FDS - Eingabeschnittstelle

FDS besteht grundsätzlich aus zwei Funktionseinheiten:

1. Das Simulationsprogramm mit textbasierender Eingabeschnittstelle
2. Das Auswertetool „Smokeview“ mit der grafischen Oberfläche für die Datenauswertung

Einen sehr aufwendigen Teil einer Brandsimulation mittels FDS stellt die Eingabe der Eingangsparameter dar. Dies erfolgt über eine einfache Textdatei, in die mittels einer speziellen Programmiersprache sämtliche für die Simulation relevanten Parameter eingegeben werden. Im Wesentlichen können dies die folgenden Parameter sein:

---

<sup>40</sup> Vgl. NIST FDS Technical Reference Guide, Volume 1, 2009, S. 9f.

1. Allgemeine Angaben zur Simulation (Bezeichnung der Simulation, Simulationsdauer,...)
2. Angaben zur Rechendomäne (Größe und Ausdehnung des 3D-Rechengitters)
3. Rahmenbedingungen (Umgebungstemperatur, Windgeschwindigkeit,...)
4. Geometriedaten (in 3D)
5. Material- und Oberflächeneigenschaften
6. Angaben zur Verbrennungsreaktion
7. Angaben zum Brand (Brandgröße, Brandleistungskurve, Initialbrand,...)
8. Zeit- oder ereignisgesteuerte Aktionen wie z. B. Öffnen einer Brandrauchentlüftung
9. Löschanlagen (Sprinkler, CO<sub>2</sub>,...)
10. Angabe, welche Parameter wie gespeichert werden sollen (physikalische und chemische Größen als Punkt, Schnitt oder Oberflächeneigenschaft). Beispielsweise Schnittdarstellung der Temperatur oder Windgeschwindigkeit, oder Sauerstoffkonzentration an einem bestimmten Punkt usw.

Wesentliche Eigenschaft des Programmes ist, dass bereits vor der Simulation angegeben werden muss, welche Parameter wo bzw. wie ausgewertet werden sollen, d. h. es muss z. B. schon vorher angegeben werden, an welchen Koordinaten Schnittbilder für bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften ausgewertet werden sollen.

Für die Eingabe der Geometriedaten wurde das selbst entwickelte Programm „FDS5DataCreator“ verwendet, mit dessen Hilfe die dreidimensionalen Geometriedaten relativ einfach und rasch von einer CAD-Anwendung übernommen werden können.

### 3.1.5 FDS – Simulationsdurchführung

Die Durchführung der eigentlichen Brandsimulation erfolgt in einem Kommandozeileninterpreter. Während der Simulation werden im Kommandozeileninterpreter die bereits berechnete Simulationsdauer sowie die Anzahl der Iterationsschritte angezeigt. Bereits während der Simulation können die bereits berechneten Simulationsergebnisse in Smokeview jederzeit betrachtet werden, ebenso ist der Abbruch einer laufenden Simulation jederzeit möglich. Bei der gegenständlichen Arbeit wurde diese Funktionalität insofern genutzt, dass eine laufende Simulation vorzeitig beendet wurde, sobald erkennbar war, dass das gewünschte Simulationsergebnis nicht erreicht wird (z. B. Brand breitet sich nicht aus, oder erlischt vorzeitig).

### 3.1.6 FDS – Auswertung

Das wesentlichste Tool zur Auswertung der Brandsimulation ist das Programm Smokeview welches im Rahmen der gegenständlichen Arbeit in der Version 5.3.10 eingesetzt wurde. Dieses Programm verfügt über eine grafische Oberfläche, in der das gesamte Szenario dreidimensional dargestellt werden kann. Neben der Visualisierung des Flammenbildes und der Verrauchung können eine Vielzahl von Parameter wie z. B. Temperatur, Gaskonzentrationen, Rauchdichte, Wärmestrahlung, Strömungsgeschwindigkeiten uvm. in Form von Schnitten, Richtungsvektoren und Oberflächeneinfärbungen dargestellt werden. Neben der grafischen Auswertung können numerische Größen wie z. B. Brandleistung, Strahlungsleistung oder punktuelle Messungen (z. B. Temperatur oder Gaskonzentration an einem bestimmten Punkt) in Form von Wertetabellen gespeichert werden.

In der gegenständlichen Arbeit erfolgte neben einem visuellen Vergleich von Simulation und Realbrand auch eine Gegenüberstellung der Temperaturverläufe und Sauerstoffkonzentration an den einzelnen Messpunkten.

## 3.2 Eingangsparmeter für die Brandsimulationen

Grundsätzlich wurden in der ersten Phase die Eingangsparmeter für die Brandsimulation aufgrund der Untersuchung der „kalten Brandstelle“ generiert, d. h. in die Brandsimulationen flossen keine Daten ein, welche nicht durch die Analyse der Brandstelle hätten festgestellt werden können.

### 3.2.1 Allgemeine Simulationsdaten

Die Simulationszeit wurde auf 1.800 Sekunden festgesetzt. Sobald sich jedoch im Rahmen des Simulationsverlaufes herauskristallisierte, dass das gewünschte Simulationsziel nicht erreicht wird, wurde der Simulationslauf abgebrochen.

Die Gesamtanzahl der Ausgabewerte (Frames) wurde auf 1.800 festgelegt, d. h. auf einen Frame pro Sekunde.

Um dem hohen Kunststoffanteil bzw. dem Schaumstoff in der Couch gerecht zu werden, wurde Polyurethan als dominierende Verbrennungsreaktion in den Simulationen verwendet:

```
&REAC ID      = 'POLYURETHANE'  
FYI          = 'C_6.3 H_7.1 N_1.0 O_2.1, NFPA Handbook, Babrauskas'  
SOOT_YIELD = 0.10  
N            = 1.0  
C            = 6.3  
H            = 7.1  
O            = 2.1 /
```

Am Versuchstag herrschte eine Temperatur von rund 20°C und es war nahezu windstill, aus diesem Grund wurden die Wetterdaten nicht weiter berücksichtigt und die Standardwerte verwendet (Windstille, 20°C).

### 3.2.2 Gitternetz

Das gesamte Gitternetz hatte folgende Abmessung:

L = 8,25 m

B = 3,45 m

H = 3,20 m

Die gesamte Zellenanzahl betrug 741.888 Zellen á 5 cm Kantenlänge.

Das Gitternetz überragte somit den Versuchsraum im Seitenbereich um jeweils 0,5 Meter und im Deckenbereich um einen Meter. Dadurch war sichergestellt, dass auch die Turbulenzen und der Rauchaustritt außerhalb des Versuchsraumes entsprechend erfasst und abgebildet wurden.

Als Zellengröße wurde eine Seitenlänge von 5 cm gewählt, was für die gegenständliche Raumgröße einen relativ guten Detaillierungsgrad ermöglichte.

Da die Simulation auf einem Vierkern Rechnersystem (i7 Quadcore CPU) durchgeführt wurde, musste das Gitternetz auf 4 einzelne Gitternetze aufgeteilt werden um die Rechnerleistung optimal ausnutzen zu können. Diese einzelnen Netze überlappten sich um eine Zellengröße (5 cm), damit der Datenaustausch zwischen den Netzen gesichert erfolgen kann. Die vier einzelnen Gitternetze hatten somit eine Zellenanzahl von jeweils 207.552 bzw. 163.392 Zellen, woraus sich die gesamte Anzahl von 741.888 Zellen ergibt.

Bei sehr dynamischen Vorgängen (z. B. hohe Strömungsgeschwindigkeiten oder Flammen) im Bereich der Gitternetzgrenzen neigt FDS zu numerischen Instabilitäten und es kommt somit zu einem Programmabsturz. Da es bei einigen Simulationsläufen zum Flashover bzw. Raumvollbrand kam, war es unvermeidlich, dass in einigen Fällen Abstürze auftraten.

Im Rahmen der Parameterstudie (Kapitel 3.3) wurden Simulationen auch mit einem 10 cm Gitternetz durchgeführt, wobei sich die Rechenzeiten hierbei auf rund 8 Stunden pro Simulationslauf reduzierten.

### 3.2.3 Baulichen Gegebenheiten

Aufgrund der kleinen Gitternetzgröße konnte der Brandraum relativ detailliert rekonstruiert werden. Als Vereinfachung wurden das gekippte südliche Fenster bzw. die einen Spalt geöffnete Tür nicht schräg, sonder orthogonal dargestellt. Um die Ventilationsflächen annähernd zu berücksichtigen, wurde beim Fenster im oberen Bereich ein Spalt von 20 cm freigelassen (grüner Kreis in der Abbildung) und bei der Tür im oberen Bereich ein Spalt von 5 cm und im Seitenbereich ein Spalt von 25 cm (roter Kreis in der Abbildung).

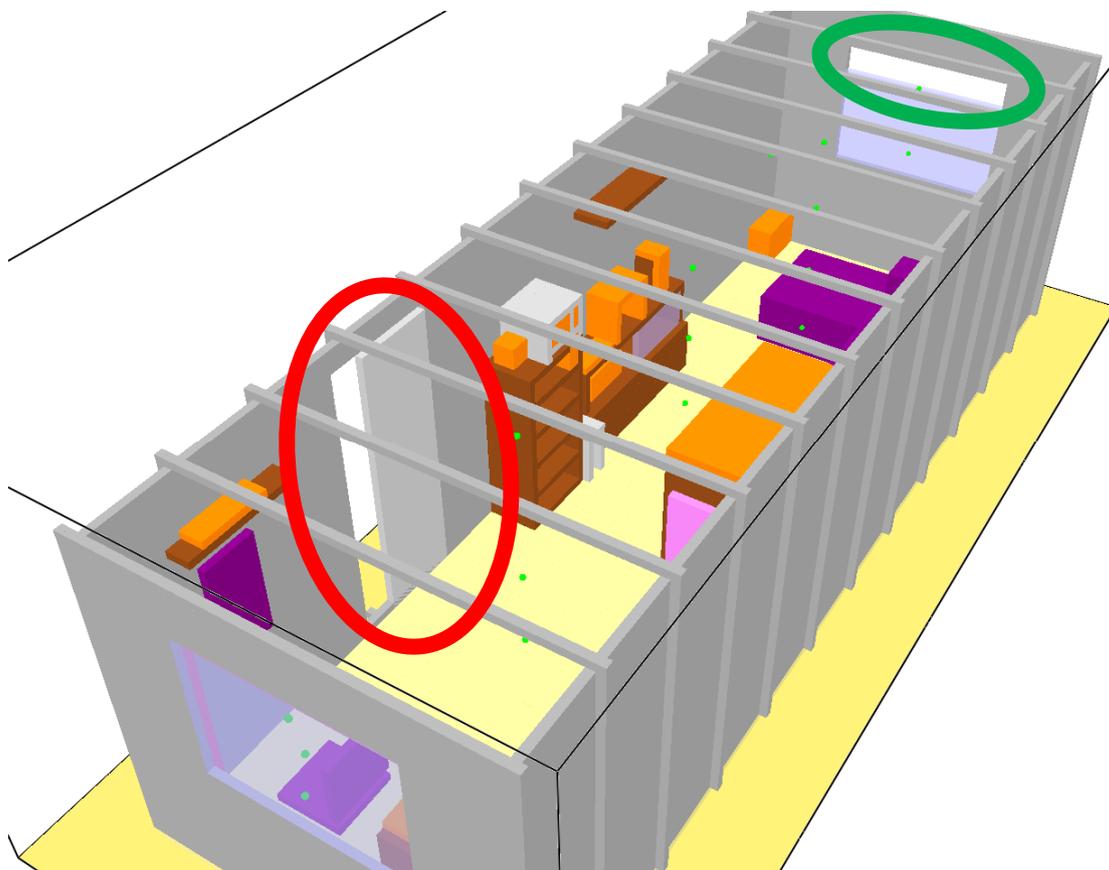


Abbildung 34: Brandraum mit gekipptem Fenster und einen Spalt geöffneten Türe, Blickrichtung Süden

Die Wände und Decken wurden wie im Versuch als Gipsputz mit entsprechender Stärke definiert. Die Kartonschicht der Gipskartonplatten wurde nicht berücksichtigt:

#### Wände:

&SURF ID = 'GYPSUM BOARD1'

RGB = 160,160,160

MATL\_ID = 'GYPSUM PLASTER'

THICKNESS = 0.0095 /

[m]

Decke:

```
&SURF ID = 'GYPSUM BOARD2'
  RGB                = 160,160,160
  MATL_ID            = 'GYPSUM PLASTER'
  THICKNESS          = 0.019 / [m]
```

Materialeigenschaft (gültig für Wände und Decke):

```
&MATL ID             = 'GYPSUM PLASTER'
  FYI                = 'Quintiere, Fire Behavior'
  CONDUCTIVITY        = 0.48 [W/m·K]
  SPECIFIC_HEAT        = 0.84 [kJ/kg/K]
  DENSITY              = 1440. / [kg/m³]
```

Die Türe wurde als einfaches Blech mit folgenden Eigenschaften angenommen:

```
&SURF ID = 'SHEET METAL'
  MATL_ID            = 'STEEL'
  COLOR              = 'SILVER'
  THICKNESS          = 0.001 / [m]
```

```
&MATL ID             = 'STEEL'
  FYI                = 'Quintiere, Fire Behavior'
  EMISSIVITY          = 0.8 [0 – 1]
  DENSITY              = 7850. [kg/m³]
  CONDUCTIVITY        = 45.8 [W/m·K]
  SPECIFIC_HEAT        = 0.46 / [kJ/kg/K]
```

Für die beiden Glasflächen wurden keine thermophysikalischen Eigenschaften definiert:

```
&SURF ID = 'GLAZING', RGB = 170,170,255, TRANSPARENCY=0.6 /
```

Diese Vereinfachungen bei den thermophysikalischen Eigenschaften der Fenster- und Türflächen können aufgrund des relativ geringen Flächenanteils im Vergleich zu den Wänden und der Decke ohne weiteres akzeptiert werden.

Der Teppichbelag wurde wie folgt definiert:

```
&SURF ID             = 'CARPET'
  MATL_ID            = 'CARPET PILE'
  COLOR              = 'KHAKI'
  BURN_AWAY          = .TRUE.
  BACKING            = 'INSULATED'
  THICKNESS          = 0.006 / [m]

&MATL ID             = 'CARPET PILE'
  FYI                = 'Completely made up'
  CONDUCTIVITY        = 0.16 [W/m·K]
  SPECIFIC_HEAT        = 2.0 [kJ/kg/K]
  DENSITY              = 750. [kg/m³]
  N_REACTIONS         = 1 [Anzahl der Reaktionen]
  NU_FUEL             = 1. [kg/kg]
  REFERENCE_TEMPERATURE = 290. [°C]
  HEAT_OF_COMBUSTION  = 22300. [kJ/kg]
  HEAT_OF_REACTION    = 2000. / [kJ/kg]
```

Bei den Simulationen wurde je nach Brandintensität ein ähnlicher Abbrand des Teppichbelages wie beim realen Brandversuch festgestellt, wobei dieser Effekt in den Simulationen im Vergleich zum Realbrand erst zeitlich verzögert eintrat.



Abbildung 35: Abbrand des Teppichs im Versuch bzw. in der Simulation Nr. 9 nach 17:30 Minuten

### 3.2.4 Initialbrand – Grundsätzliche Überlegungen

Eine der zentralen Fragestellungen bei den Simulationen war die Rekonstruktion des Initialbrandes. Wie aus den folgenden Erläuterungen hervorgeht, ist es beim gegenständlichen Brandszenario jedoch aus mehreren Gründen unmöglich, den Brandverlauf in den ersten Minuten der Brandentstehungsphase zu rekonstruieren. Dies gilt aus folgenden Gründen sowohl für die Rekonstruktion mittels eines Vergleichsversuches als insbesondere auch für die Rekonstruktion mittels Brandsimulationsverfahren:

1. Die genaue Beschaffenheit, Geometrie und Lage der Brandlasten im Brandentstehungsbereich ist nicht mehr nachvollziehbar.
2. Brandversuche haben gezeigt, dass auch nahezu identische Versuchsaufbauten mitunter komplett unterschiedliche Brandverläufe zeigen.
3. FDS, aber auch andere CFD-Modelle sind insbesondere bei pyrolysierenden Stoffen aus mehreren Gründen nicht in der Lage, die Brandausbreitung in so kleinen Maßstäben der Realität entsprechend zu simulieren.
4. Brandphänomene wie z. B. das Abtropfen thermoplastischer Kunststoffe können durch das Brandsimulationsmodell ebenfalls nicht simuliert werden.

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Positionen einer näheren Betrachtung unterzogen:

Zu 1.:

Wie die folgende Abbildung zeigt, ist es unmöglich, aufgrund der kalten Brandstelle festzustellen, um welche Brandlasten es sich im Detail gehandelt hat bzw. wie die Brandlasten vor dem Beginn des Versuches situiert waren. Diese Daten sind jedoch wesentlich, um insbesondere in der Erstphase die Brandausbreitung rekonstruieren zu können.



**Abbildung 36: Bild der erkalteten Brandausbruchsstelle unmittelbar nach den Löscharbeiten**

Zu 2.:

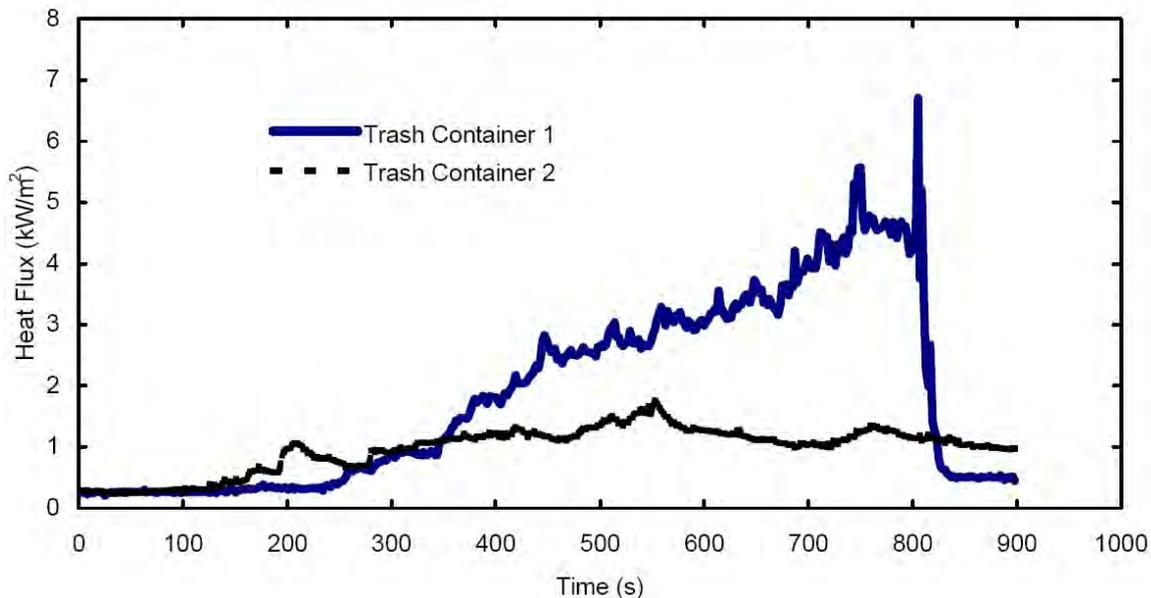
Selbst wenn Fotos eine genaue Rekonstruktion der Brandlasten zulassen würden, so wäre es unmöglich, den Brandverlauf verlässlich nachzuvollziehen, da bereits kleinste Änderungen der Eingangsparameter einen komplett anderen Brandverlauf bewirken können (chaotisches System). Dies begründet sich hauptsächlich auf der Tatsache, dass im Zuge des Verbrennungsvorganges auch mechanische Verformungen und Lageänderungen stattfinden.

Als Beispiel werden Brandversuche vom NIST über die Ermittlung der Wärmefreisetzungsrates von Plastikmistkübeln angeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurden zwei Mistkübeln aus HDPE (High Density Polyethylen) mit der gleichen Art und Menge herkömmlichen Abfalls befüllt. Bei beiden Versuchen wurde der Abfall an der nahezu gleichen Stelle mit einer gleich großen Flamme entzündet, woraufhin der weitere Brandverlauf beobachtet wurde und die Brandleistung bzw. die Wärmestrahlung gemessen wurden.

Der erste Mistkübel brannte hierbei mit einer maximalen Brandleistung von ca. 300 kW und einer maximalen Wärmestrahlung von rund 5 kW/m<sup>2</sup> (in 1,07 m Abstand) ab. Beim zweiten Mistkübel schmolz im Zuge des Brandverlaufes ein Loch in der Seitenwand, woraufhin der obere Wandbereich umknickte

und die Brandlast zum großen Teil abdeckte, wodurch die maximale Brandleistung nur rund 150 kW und die maximale Wärmestrahlung weniger als 2 kW/m<sup>2</sup> (in 1,07 m Abstand) betrug.<sup>41</sup>

Das folgende Diagramm illustriert die Wärmestrahlung der beiden Mistkübelbrände:



**Abbildung 37: Wärmestrahlung von zwei gleichen Mistkübeln im Rahmen eines NIST-Brandversuches<sup>42</sup>**

Hätten sich diese beiden Mistkübel in einem entsprechend ausgestatteten Raum befunden, so wäre es unter Umständen möglich gewesen, dass es beim ersten Kübel zu einer weiteren Brandausbreitung auf benachbarte Brandlasten gekommen wäre und beim zweiten Kübel der Brand auf die Brandausbruchsstelle beschränkt gewesen bzw. von selbst erloschen wäre.

Zusammenfassend wird daher festgestellt, dass es nahezu unmöglich ist, reale Brandverläufe, bei denen komplex aufgebaute Brandlasten beteiligt sind, mit CFD-Simulationen im Detail zu rekonstruieren, da bereits kleinste Änderungen der Eingangsparameter einen komplett unterschiedlichen Brandverlauf bewirken können.

Zu 3.:

Die Entzündung und Brandausbreitung von festen Stoffen ist grundsätzlich sehr stark von der Materialoberfläche und von der Art des Materials abhängig. So entzündet sich z. B. sägerauhes Holz aufgrund der Oberflächenstruktur viel rascher als glatt gehobeltes Holz. Aufgrund der relativ groben Gitterauflösung bei CFD-Brandsimulation (welche üblicherweise im Zentimeterbereich liegt), können diese feinen Holzoberflächenstrukturen im Bereich von Millimeter-Bruchteilen nicht genau genug modelliert werden, um diesen Effekt realistisch zu simulieren. Als Alternative dazu wird in FDS ein Verbrennungsmodell eingesetzt, welches Entzündung, Pyrolyse und Abbrand von festen Stoffen aufgrund der jeweiligen stoff- und oberflächenspezifischen thermophysikalischen Eigenschaften berechnet. Diese thermophysikalischen Eigenschaften wiederum sind jedoch sehr stark abhängig vom Material bzw. der

<sup>41</sup> Vgl. NIST FR4018, 2003, S. 1ff.

<sup>42</sup> Abbildung: Ebenda, S. 6.

Oberflächenbeschaffenheit und müssten prinzipiell von jedem einzelnen beim Brand beteiligten Stoff (bzw. Oberfläche) bestimmt werden. Aufgrund dieser Problematik wurde z. B. bei der Rekonstruktion des Station-Night-Club-Brandes eine Versuchsreihe durchgeführt, um die thermophysikalischen Eigenschaften wie z. B. Verdampfungswärme oder Zündtemperatur von den dominierenden Stoffen zu bestimmen.<sup>43</sup>

Bei der derzeit aktuellen Version 5.4.1 von FDS besteht das Problem, dass die thermophysikalischen Stoffdaten entsprechend angepasst und modifiziert werden müssen, um im kleinmaßstäblichen Bereich eine der Realität entsprechende Brandausbreitung simulieren zu können. Als Beispiele werden hierfür entsprechende Fachforenbeiträge in der „FDS and Smokeview Discussion“-Google-group angeführt:

1. Ein User hat das Problem, dass in der Simulation beim Entzünden einer vertikalen PMMA (Acrylglas)-Wand das Feuer nach Entfernen der Stützflamme wieder erlischt. Seitens des NIST wird rückgefragt, ob ein solcher Brand überhaupt möglich sein kann, ob die Eingangsparameter experimentell überprüft wurden und ob eine Studie über den Einfluss der Gittergröße durchgeführt wurde.<sup>44</sup>
2. Ein User hat das Problem, dass in der Simulation beim Entzünden von Aktenschachteln die Flammen sich nur in einem sehr schmalen Bereich nach oben ausbreiten, im Gegensatz zum realen Test, wo die Ausbreitung V-förmig nach oben erfolgt. Seitens des NIST wird rückgefragt, ob entsprechende Brandversuche zur Erhebung der thermophysikalischen Eigenschaften bzw. des Pyrolyseverhaltens durchgeführt wurden, bzw. wurde unter anderem geraten, die Wärmeleitfähigkeit entsprechend anzupassen, um ein realistisches Brandverhalten zu erzielen.<sup>45</sup>

Diese Thematik ist selbstverständlich auch den Programmentwicklern von FDS bewusst, wobei einerseits an einer Verbesserung des Verbrennungsmodells geforscht wird<sup>46</sup> und andererseits Verfahren eingesetzt werden, mit deren Hilfe die zur Verfügung stehenden thermophysikalischen Materialkenndaten optimal für den Einsatz in FDS aufbereitet werden.<sup>47</sup>

Bei den Brandsimulationen, die im Rahmen der gegenständlichen Arbeit durchgeführt wurden, erfolgte keine Anpassung der Material- oder Oberflächeneigenschaften, sondern es wurden die Daten originalgetreu aus den unterschiedlichsten Quellen wie z. B. Fachforenbeiträgen oder dem FDS-Benutzerhandbuch entnommen. Wären die Oberflächen- und Materialeigenschaften entsprechend angepasst worden, hätte der Brandverlauf viel genauer der Realität angepasst werden können (z. B. Abbrand des Teppichbelages). Diese Vorgehensweise war jedoch nicht Ziel der Arbeit und ist auch im realen Anwendungsfall nicht durchführbar.

Zu 4.:

Bei nahezu allen Bränden sind thermoplastische Kunststoffe involviert, welche im Zuge des Brandverlaufes abtropfen oder abfließen und dadurch Stützfeuer bzw. Sekundärbrände bilden, welche wesentlich zur rascheren Brandausbreitung beitragen. Beim gegenständlichen Brandversuch war dies z. B. sehr gut zwischen der 4. und 5. Minute sichtbar, als Teile des Fernsehgerätes bereits abgeschmolzen waren und im Bodenbereich ein ausgedehntes Stützfeuer bildeten. Dieser für die

---

<sup>43</sup> Vgl. NIST NCSTAR 2, 2005, S. 4-7ff.

<sup>44</sup> Vgl. [http://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/6dbc02fe400a8b11/72f103e91fc8bd32#72f103e91fc8bd32](http://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/6dbc02fe400a8b11/72f103e91fc8bd32#72f103e91fc8bd32) [18.02.2010]

<sup>45</sup> Vgl. [http://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/8ac05fadcb58/ed1bad8243525c2c?lnk=gst&q=flame+spread+#ed1bad8243525c2c](http://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/8ac05fadcb58/ed1bad8243525c2c?lnk=gst&q=flame+spread+#ed1bad8243525c2c) [18.02.2010]

<sup>46</sup> Vgl. NIST FDS Technical Reference Guide, Volume 1, 2009, S. 9f.

<sup>47</sup> Vgl. NIST FDS Technical Reference Guide, Volume 2, 2009, S. 8.

Brandausbreitung sehr wesentliche Effekt kann mit den derzeitigen CFD-Brandsimulationen nicht simuliert werden.



**Abbildung 38: Abtropfen und Bildung eines Sekundärbrandes 5 Minuten nach Entzündung**

Zusammenfassend wird festgehalten, dass folgende Bedingungen erfüllt sein müssen, um die Brandentstehungsphase aufgrund eines Abbrandmodells simulieren zu können:

1. Es müssen detaillierte Informationen über Lage, Größe, Art und Aufbau des Brandszenarios vorhanden sein.
2. Brandlasten müssen möglichst einfache Geometrien aufweisen und dürfen im Zuge des Abbrandes ihre Lage im Wesentlichen nicht ändern. Falls dies doch der Fall ist (z. B. durch Umfallen) muss dies entsprechend in der Simulation berücksichtigt werden. In FDS können hierfür Objekte (Brandlasten) z. B. zeit- oder temperaturgesteuert auftauchen oder eliminiert werden.
3. Das Verhalten etwaig vorhandener thermoplastischer Kunststoffe muss berücksichtigt werden (Abtropfen, Stützfeuer).
4. Die thermophysikalischen Eigenschaften der vorhandenen Stoffe müssen entweder bekannt sein oder experimentell ermittelt werden.
5. Der simulierte Brandverlauf muss durch Vergleichsversuche entsprechend validiert werden, d. h. es muss üblicherweise eine Anpassung der Eingangsparameter (Materialeigenschaften) erfolgen, um ein der Realität entsprechendes Ergebnis zu erhalten.
6. Der Abbrand brennbarer Flüssigkeiten kann relativ realitätsnahe als Lachenbrand („Pool-Brand“) simuliert werden. Es sind jedoch Angaben über die Art der brennbaren Flüssigkeit, sowie Größe und Höhe der Lache erforderlich. Dies gilt nicht für den Abbrand voll gesogener Oberflächen wie

z. B. bezingetränkte Teppiche oder Holzböden, hier muss der simulierte Brandverlauf wiederum entsprechend validiert sein.

7. Der Abbrand brennbarer Gase kann relativ realitätsnahe simuliert werden. Es sind jedoch Angaben über die Art des Gases sowie die Ausströmöffnung und die Druckverhältnisse erforderlich.

Aus obiger Auflistung geht hervor, dass die Rekonstruktion des Brandes in der Entstehungsphase von sehr vielen Faktoren abhängig ist. Aus diesem Grund ist es in der Mehrheit der Fälle sinnvoller und genauer, wenn die Brandentstehungsphase durch eine Brandleistungskurve (Design Fire) ersetzt wird.

### 3.2.5 Initialbrand - Brandleistungskurve

Wie aus dem vorigen Kapitel 3.2.4 hervorgeht, ist es bis auf wenige Ausnahmen nicht möglich, die Erstphase des Brandes mit dem im FDS implementierten Abbrandmodell zu beschreiben. Aus diesem Grund wurde bei gegenständlicher Arbeit die Brandentstehungsphase durch eine definierte Brandleistungskurve ersetzt und die weitere Brandausbreitung durch das in FDS implementierte Abbrand- bzw. Verbrennungsmodell simuliert.

Beim Brandversuch wurde ein Fernseherbrand als Zündquelle angenommen. In der einschlägigen Literatur sind sehr unterschiedliche Angaben über die Wärmefreisetzungsrate von Fernsehgeräten zu finden. Im folgenden Diagramm sind die maximalen Wärmefreisetzungsrate für Fernseher mit und ohne flammhemmenden Kunststoff („flame retardant“ und „non flame retardant“) dargestellt, welche bei diversen Brandversuchen ermittelt wurden. Wobei aufgrund der gesetzlichen Regelungen in Amerika flammhemmende Kunststoffe (FR) und im europäischen Raum nicht flammhemmende Kunststoffe (NFR) üblich sind.<sup>48</sup> Bei dem im Brandversuch verwendeten Fernseher konnte nicht festgestellt werden, um welche Kunststoffarten es sich handelt.

---

<sup>48</sup> Vgl. Shelley/Spearpoint/Bittern, 2006-2007, S. 38.

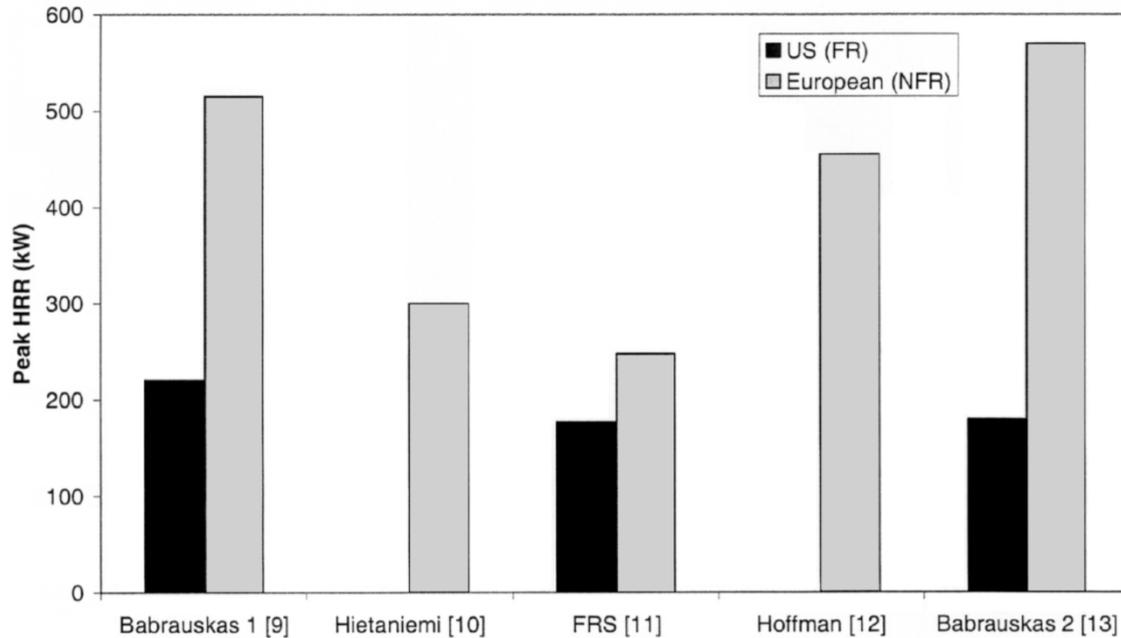
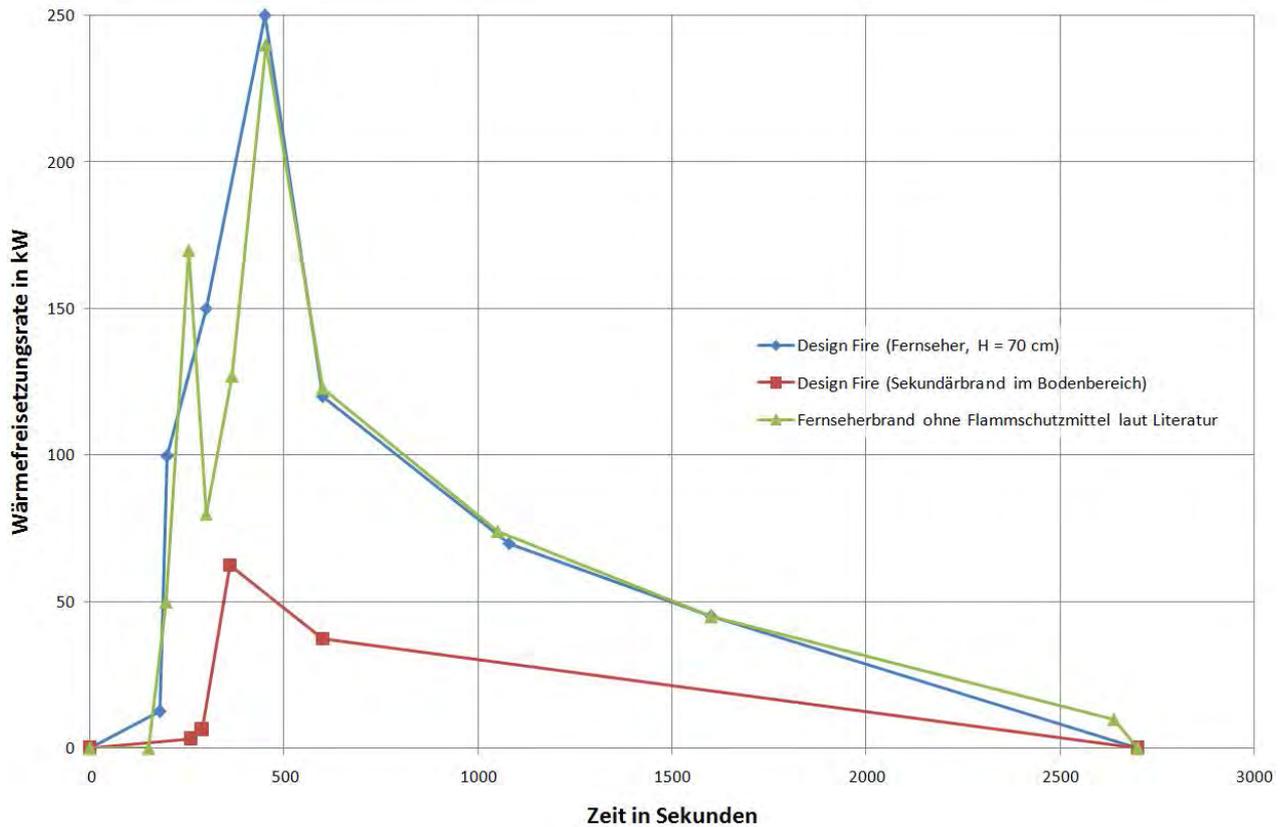


Abbildung 39: Maximale Wärmefreisetzungsrate bei Fernseherbränden<sup>49</sup>

Wie im Diagramm ersichtlich, variiert die bei Brandversuchen ermittelte maximale Wärmefreisetzungsrate bei Bränden von TV-Geräten sehr stark. Als Ausgangsbasis für die Brandsimulationen wurde eine im Rahmen von Brandversuchen ermittelte Brandleistungskurve mit einer maximalen Wärmefreisetzungsrate von 240 kW herangezogen (grüne Kurve im folgenden Diagramm).<sup>50</sup> Die Initialbrandleistung wurde in FDS entsprechend dieser Kurve in vereinfachter Form reproduziert (blaue Kurve im Diagramm), bzw. wurde im Bodenbereich eine Sekundärbrandquelle angenommen (rote Kurve im Diagramm), welche das durch Abtropfen und Abfließen des Kunststoffes entstehende Stützfeuer repräsentiert. Die Brandfläche der Primär- als auch der Sekundärbrandquelle betrug jeweils  $0,5 \times 0,25 \text{ m} (= 0,125 \text{ m}^2)$ , wobei die Grundfläche der beiden Brandquellen über die gesamte Branddauer gleich war. Die Unterkante der Primärbrandquelle wurde in 0,7 m Höhe angenommen, da sich der Fernseher im Versuchsaufbau ebenfalls auf einem Tisch dieser Höhe befunden hat. Die Sekundärbrandquelle wurde im Bodenbereich angenommen, wobei der Sekundärbrand bereits nach 6 Minuten sein Maximum von 62,5 kW erreicht und anschließend wieder vermindert wird. Begründet wird dies aufgrund der Tatsache, dass sich nach dieser Zeit bereits das Kästchen, auf dem der Fernseher steht, entzündet und der weitere Brandverlauf durch das Abbrand- und Verbrennungsmodell von FDS bestimmt wird.

<sup>49</sup> Abbildung: Shelley/Spearpoint/Bittern, 2006-2007, S. 39.

<sup>50</sup> Vgl. Hofmann/Knaust/Beard, 2007, S. 1.



**Abbildung 40: Gegenüberstellung der simulierten Brandleistungskurven zu einer in der Literatur dokumentierten Brandleistungskurve eines TV-Gerätes ohne flammhemmenden Kunststoff<sup>51</sup>**

Angemerkt wird, dass bei Summieren der Primär- und Sekundärbrandquelle eine maximale Brandleistung von rund 300 kW erreicht wird. Diese maximale Gesamtbrandleistung korreliert mit den in Fernsehbrandversuchen ermittelten maximalen Brandleistungen, welche im Bereich von rund 180 kW bis 560 kW liegen.<sup>52</sup>

Im Zuge einer Parameterstudie wurden auch Simulationsläufe ohne Sekundärbrandquelle durchgeführt, wobei sich herausstellte, dass es hierbei zu keiner Entzündung von Brandlasten und der damit verbundenen Brandausbreitung kommt.

### 3.2.6 Ventilationsbedingungen

Bei natürlichen Brandverläufen wird grundsätzlich zwischen brandlastgesteuerten und ventilationsgesteuerten Bränden unterschieden.

Bei brandlastgesteuerten Bränden ist die Brandausbreitung und -intensität im Wesentlichen nur von der Art, Anordnung und Menge der Brandlast abhängig und dass eine ausreichende Menge Sauerstoff vorhanden ist, um eine möglichst vollständige Verbrennung der Brandlasten zu gewährleisten. Brände im Freien oder Brände in Räumen mit großen Belüftungsöffnungen verlaufen üblicherweise

<sup>51</sup> Vgl. Hofmann/Knaust/Beard, 2007, S. 1.

<sup>52</sup> Shelley/Spearpoint/Bittern, 2006-2007, S. 39.

brandlastgesteuert. Ebenso verlaufen nahezu alle Brände in der Entstehungsphase brandlastgesteuert, da sich in diesem Stadium noch ausreichend Sauerstoff in der Umgebungsluft befindet.

Sobald in der Umgebungsluft nicht mehr ausreichend Sauerstoff vorhanden ist, um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten, spricht man von einem ventilationsgesteuerten Brand. Bei dieser Art von Bränden wird die Brandausbreitung und –intensität wesentlich von der Menge des zur Verfügung stehenden Sauerstoffes bestimmt. Durch die unvollständige Verbrennung wird u. a. vermehrt Kohlenmonoxid gebildet, welches wiederum ein wesentliches Kriterium für die Entstehung eines Flashovers darstellt. Üblicherweise verläuft in einem herkömmlichen Wohnraum ein voll entwickelter Brand ventilationsgesteuert, da die Fenster- und Türöffnungen nicht ausreichend groß genug sind, um eine optimale Sauerstoffversorgung zu gewährleisten. Auch beim Brandversuch füllte sich der Raum zwischen der 6. und 8. Minute nahezu vollständig mit Rauch, was neben der visuellen Wahrnehmung auch durch die Messung des massiven Sauerstoffabfalls belegt ist (Abbildung 27, S. 42).

Diese Abhängigkeit des Brandverlaufes von den Ventilationsbedingungen zeigt, wie essentiell dieser Einflussfaktor bei der Rekonstruktion von Brandereignissen ist, wobei grundsätzlich mehrere Möglichkeiten in Frage kommen um an diesbezügliche Informationen zu gelangen:

1. Foto- und Videoaufnahmen vom Brand, wo die entsprechenden Fenster und Türen sichtbar sind (z. B. durch Presse, Passanten, Überwachungskameras usw.)
2. Visuelle Wahrnehmungen von Zeugen über die Stellung von Fenstern und Türen
3. Akustische Wahrnehmungen von Zeugen wie z. B. das Brechen von Glas
4. Auf der Brandmeldeanlage protokollierte Auslösung von Brandfallsteuerungen (z. B. Öffnung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Aktivierung einer Brandrauchabsaugung)
5. Wahrnehmungen von Einsatzkräften, welche Türen oder Fenster z. B. gewaltsam geöffnet haben
6. Rückschluss auf die Stellung von Fenstern und Türen aufgrund des Spurenbildes

Sowohl bei der Untersuchung des Station-Night-Club-Brandes, als auch beim World Trade Center wurden überwiegend Foto- und Videoaufnahmen herangezogen, um die Ventilationsverhältnisse realitätsnahe rekonstruieren zu können.

Liegen solche Daten nicht vor, ist es naheliegend, den Zeitpunkt des Glasbruches direkt durch das Feldmodell simulieren zu lassen. Angemerkt wird, dass dieses Verfahren jedoch aus folgenden Gründen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet ist:

Das Bruchverhalten von Glas bei Wärmebeaufschlagung ist von sehr vielen Rahmenbedingungen abhängig. Neben der Art des Glases (z. B. Floatglas, Verbundsicherheitsglas, Einscheibensicherheitsglas,...) und der Anzahl der Scheiben (z. B. zwei- oder mehrscheibige Isolierverglasungen) spielen auch die Rahmenkonstruktion bzw. der Glaseinstand und deren Verhalten im Brandfall (z. B. Verspannungen) eine wesentliche Rolle. In der Literatur wird z. B. angegeben, dass bei einer herkömmlichen Floatglasscheibe bei rund 150 – 200°C Sprünge entstehen. Die Ventilationsbedingungen werden jedoch erst beeinflusst, wenn entsprechend große Stücke aus der Scheibe herausbrechen. Bei mehrscheibigen Verglasungen müssen demnach aus allen Glasscheiben Stücke herausbrechen.

In der einschlägigen Literatur<sup>53</sup> sind die verschiedensten Ansätze und Versuchsergebnisse dokumentiert, welche das Glasbruchverhalten von Floatglas im Brandfall vorhersehbar machen sollen. Im Wesentlichen sind dies für einscheibige Verglasungen unterschiedlicher Stärken folgende Werte:

1. Temperaturunterschiede von 58 – 80 °C zwischen wärmeexponierter Glasscheibe und wärmegeschützter Glasscheibe (im Rahmen) führen zum Glasbruch.

---

<sup>53</sup> Vgl. Babrauskas, 2005

2. Wärmestromdichten von 4 – 16 kW/m<sup>2</sup> führen zum Glasbruch, wobei gelegentlich auch Glasstücke herausbrechen.
3. Es kommt zum Glasbruch, wenn auf der exponierten Seite Temperaturen von 150 – 175°C und auf der feuerabgewandten Seite Temperaturen von 75 – 150°C herrschen.
4. Sprünge treten nicht auf bei weniger als 110°C Glastemperatur, was mit einer Wärmestromdichte von rund 3 kW/m<sup>2</sup> korreliert.
5. Das Glas zerspringt, wenn rund 300°C Gastemperatur im Raum herrschen.
6. Bei einer Gastemperatur von rund 450°C brechen bei rund 1/6 der Verglasungen Teile heraus.
7. 447°C wurde als niedrigste Oberflächentemperatur gemessen, bei welcher im Rahmen einer Testreihe die Verglasung herausbrach.

Ebenso wurden in der Vergangenheit auch für zweischiebige Isolierverglasungen eine Reihe an Tests durchgeführt, wobei zusammenfassend nach Babrauskas Folgendes festgehalten wird:

1. 300 °C ist die untere Grenze, bei der Floatverglasungen herausbrechen können.
2. 3 mm Glasscheiben brechen bei rund 340°C.
3. 4 – 6 mm starke Scheiben brechen bei rund 450°C.
4. Zweischiebigen Isolierverglasungen brechen bei rund 600°C heraus.
5. Vorgespanntes Glas bricht erst in der Flashover-Phase.
6. Herkömmliches Floatglas kann bereits bei 9 kW/m<sup>2</sup> herausbrechen, bis zu 35 kW/m<sup>2</sup> ist die Wahrscheinlichkeit des Herausbrechens jedoch eher gering.
7. Zweischiebigen Isolierverglasungen widerstehen üblicherweise 25 kW/m<sup>2</sup>
8. Unter bestimmten Voraussetzungen widersteht vorgespanntes Glas auch Wärmestromdichten von 43 kW/m<sup>2</sup>.

Weitere Faktoren, welche das Glasbruchverhalten bestimmen, sind Fenstergröße, Rahmentyp, Glasstärke, Schäden im Glas und Temperaturunterschiede innerhalb der Scheibe.<sup>54</sup>

Im Brandversuch kam es zum vollständigen Herausbrechen der äußeren Isolierglasscheibe nach 7:32 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt wurde bei den beiden Temperatursensoren, die im Brandraum direkt vor der Scheibe situiert waren, Temperaturen von 700 – 800°C gemessen. Angemerkt wird, dass es sich hierbei jedoch nicht um die Oberflächentemperatur des Glases handelte, sondern um die Gastemperatur inkl. Strahlungswärme.

Festgehalten wird, dass das Glasbruchverhalten demnach nur sehr ungenau vorausgesagt werden kann und nur simuliert werden sollte, wenn keine sonstigen Informationen über den Zeitpunkt des Glasbruches zur Verfügung stehen. Optimalerweise sollten die Daten für das Glasbruchverhalten anhand von Versuchen an einer baugleichen Glas-Rahmen-Konstruktion ermittelt werden.

Analog dem Glasbruchverhalten muss auch die thermische Zerstörung von sonstigen Gebäudeöffnungen wie z. B. Kunststoff-Lichtkuppeln berücksichtigt werden. Die erforderlichen Parameter können z. B. aufgrund von Herstellerangaben oder entsprechenden Brandversuchen ermittelt werden.

### 3.2.7 Einrichtungsgegenstände

Neben dem Initialbrand und den Ventilationsbedingungen sind die vorhandenen Brandlasten der dritte Faktor, welcher Brandintensität und Brandausbreitung am wesentlichsten beeinflusst. Unter Laborbedingungen und bei homogenen Brandlasten kann dieser Faktor relativ einfach bestimmt werden. In

---

<sup>54</sup> Vgl. Babrauskas, 2005

realen Situationen wie z. B. einem durchschnittlichen Haushalt sind die Brandlasten üblicherweise sehr inhomogen und lassen sich nur näherungsweise qualifizieren bzw. quantifizieren.

Im Simulationsmodell wurden im Wesentlichen folgende Brandlasten nachgebildet:

Die Couch, der Drehstuhl und die Taschen bei den Garderoben wurden mit folgenden thermophysikalischen Eigenschaften simuliert (violett in der Abbildung):

```
&SURF ID = 'UPHOLSTERY'
  FYI = 'Properties completely fabricated'
  COLOR = 'PURPLE'
  BURN_AWAY = .TRUE.
  MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
  THICKNESS(1:2) = 0.002,0.1 [m]
  PART_ID = 'smoke' /

&MATL ID = 'FABRIC'
  FYI = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT = 1.0 [kJ/kg/K]
  CONDUCTIVITY = 0.1 [W/m·K]
  DENSITY = 100.0 [kg/m³]
  N_REACTIONS = 1 [Anzahl der Reaktionen]
  NU_FUEL = 1. [kg/kg]
  REFERENCE_TEMPERATURE = 350. [°C]
  HEAT_OF_REACTION = 3000. [kJ/kg]
  HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. / [kJ/kg]

&MATL ID = 'FOAM'
  FYI = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT = 1.0 [kJ/kg/K]
  CONDUCTIVITY = 0.05 [W/m·K]
  DENSITY = 40.0 [kg/m³]
  N_REACTIONS = 1 [Anzahl der Reaktionen]
  NU_FUEL = 1. [kg/kg]
  REFERENCE_TEMPERATURE = 350. [°C]
  HEAT_OF_REACTION = 1500. [kJ/kg]
  HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. / [kJ/kg]
```

Alle Holzteile (Regale und Kästen) wurden mit folgenden thermophysikalischen Eigenschaften simuliert (braun in der Abbildung):

```
&SURF ID = 'SPRUCE'
  STRETCH_FACTOR = 1. [m/m]
  CELL_SIZE_FACTOR = 0.5 [m/m]
  BURN_AWAY = .TRUE.
  MATL_ID(1,1:3) = 'CELLULOSE','WATER','LIGNIN'
  MATL_MASS_FRACTION(1,1:3) = 0.70,0.1,0.20
  MATL_ID(2,1) = 'CASI'
  THICKNESS(1:2) = 0.01,0.01 [m]
  COLOR = 'CHOCOLATE 4' /

&MATL ID = 'CELLULOSE'
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_cell'
  SPECIFIC_HEAT = 2.3 [kJ/kg/K]
  DENSITY = 400. [kg/m³]
  N_REACTIONS = 1 [Anzahl der Reaktionen]
  A = 2.8E19 [1/s]
  E = 2.424E5 [kJ/kmol]
  HEAT_OF_REACTION = 0. [kJ/kg]
  NU_RESIDUE = 1.0 [kg/kg]
  RESIDUE = 'ACTIVE' /

&MATL ID = 'ACTIVE'
  EMISSIVITY = 1.0
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_cell'
```

```

SPECIFIC_HEAT      = 2.3                [kJ/kg/K]
DENSITY            = 400.                [kg/m³]
N_REACTIONS        = 2                  [Anzahl der Reaktionen]
A(1:2)             = 1.3E10, 3.23E14    [1/s]
E(1:2)             = 1.505E5, 1.965E5   [kJ/kmol]
HEAT_OF_REACTION(1:2) = 418., 418.     [kJ/kg]
NU_RESIDUE(1:2)   = 0.35, 0.0          [kg/kg]
NU_FUEL(1:2)      = 0.65, 1.0          [kg/kg]
RESIDUE(1)        = 'CHAR' /

&MATL ID           = 'WATER'
EMISSIVITY         = 1.0
DENSITY            = 1000.              [kg/m³]
CONDUCTIVITY       = 0.6                [W/m·K]
SPECIFIC_HEAT     = 4.19                [kJ/kg/K]
N_REACTIONS        = 1                  [Anzahl der Reaktionen]
A                  = 1E20                [1/s]
E                  = 1.62E+05           [kJ/kmol]
NU_WATER           = 1.0                [kg/kg]
HEAT_OF_REACTION  = 2260. /

&MATL ID           = 'CASI'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_CASI'
DENSITY            = 200.                [kg/m³]
SPECIFIC_HEAT     = 1.0 /               [kJ/kg/K]

&MATL ID           = 'LIGNIN'
EMISSIVITY         = 1.0
DENSITY            = 550.                [kg/m³]
CONDUCTIVITY       = 0.1                [W/m·K]
SPECIFIC_HEAT     = 1.1 /               [kJ/kg/K]

&MATL ID           = 'CHAR'
EMISSIVITY         = 1.0
DENSITY            = 140.                [kg/m³]
CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_char'
SPECIFIC_HEAT     = 1.1 /               [kJ/kg/K]

&RAMP ID='k_cell', T= 20., F=0.15 /
&RAMP ID='k_cell', T=500., F=0.29 /
&RAMP ID='k_char', T= 20., F=0.08 /
&RAMP ID='k_char', T=900., F=0.25 /
&RAMP ID='k_CASI', T= 20., F=0.06 /
&RAMP ID='k_CASI', T=400., F=0.25 /

```

Aufgrund des Verkohlungs- und Pyrolyseprozesses sind die chemisch-thermophysikalischen Eigenschaften von Holz entsprechend umfangreich.

Neben Möbel und Couch stellen die diversen Kunststoffbrandlasten wie Kaffeemaschine, Mikrowellenherd, diverse Gefäße, Monitor, Drucker usw. den größten Anteil an mobilen Brandlasten dar. Aufgrund des Umfangs und der Inhomogenität der Brandlasten wurde weder zwischen den Kunststoffarten unterschieden, noch wurden die Mengen entsprechend quantifiziert. Diese Vorgehensweise entspricht der Annahme, dass auch bei einer realen Brandstelle aufgrund der Zerstörung diese Daten nicht mehr rekonstruiert werden können, wodurch es in weiterer Folge auch nicht möglich bzw. nicht zielführend ist die chemisch-physikalischen Verbrennungseigenschaften der einzelnen Kunststoffarten zu unterscheiden.

Um trotz dieser Vereinfachung zu einem adäquaten Ergebnis zu gelangen wurden grundsätzlich folgende zwei Varianten einer näheren Betrachtung unterzogen:

1. Es könnten die Kunststoffmaterialien analog der Holzmaterialien oder der Couch durch Angabe der chemisch-physikalischen Verbrennungsparameter, mitunter sogar unter Berücksichtigung von

Pyrolysevorgängen, definiert werden. Diese Vorgangsweise wurde bei Simulation Nr. 4 gewählt wo die primäre Kunststoffbrandlast als PMMA bzw. als PE definiert wurde, wobei es jedoch im Laufe der Simulation zu keiner weiteren Brandausbreitung kam. Wie bereits im Kapitel 3.2.4 (Initialbrand – Grundsätzliche Überlegungen) beschrieben wurde liegt das Problem darin, dass für diese Art der Simulation nur unzureichende Informationen zum Material, Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie der Brandlast vorliegen.

2. Da mit der im vorigen Punkt beschriebenen Vorgehensweise keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden konnten wurde in weiterer Folge definiert, dass sich jede Kunststoffbrandlast ab einer bestimmten Temperatur entzündet und in weiterer Folge mit einer fixen Wärmefreisetzungsrate (pro Flächeneinheit) verbrennt. Die Verbrennung erfolgt hierbei gemäß der global definierten PU-Verbrennungsreaktion welche in der REAC Line definiert ist (siehe Kapitel 3.2.1). Die fixe Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit wird in FDS als HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area) bezeichnet, wodurch in den folgenden Textteilen für diese Art der Materialdefinition die Bezeichnung "Kunststoff als HRRPUA" gewählt wurde.

Die unter Punkt 2 beschriebene Art der Materialdefinition ist sehr trivial wobei die Verbrennungsintensität und -geschwindigkeit im Wesentlichen von der Zündtemperatur (IGNITION\_TEMPERATURE) und der Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit (HRRPUA) abhängig. Diese beiden Eigenschaften wurden wie folgt definiert:

Die Zündtemperatur von Kunststoffen ist neben der Art des Kunststoffes auch von Faktoren wie Zusatzstoffen, Oberflächenbeschaffenheit, Beflammungszeit usw. abhängig. In folgender Tabelle sind beispielhaft die Zündtemperaturen ausgewählter Kunststoffe angeführt:

Bezeichnung	Zündtemperatur mit Pilotflamme <sup>55</sup>	Zündtemperatur ohne Pilotflamme <sup>56</sup>
Polyurethan (PU) weich	270 °C	415 °C
Polymethylmethacrylat (PMMA)	270 °C	450 °C
Polyvinylchlorid (PVC)	220 – 350 °C	450 °C

**Tabelle 4: Schmelz- und Zündtemperatur ausgewählter Kunststoffe**

Da in der Brandsimulation der eigentliche Brand auch gleichzeitig die Wirkung einer Pilotflamme hat, wurden diese Werte für die Festlegung der Zündtemperatur herangezogen. Die hierbei angenommenen 250 °C haben sich bei der Simulation Nr. 14 als ein sehr guter Mittelwert erwiesen welcher realitätsnahe Ergebnisse liefert.

Die Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit (HRRPUA) bestimmt wie stark das jeweilige Kunststoffteil verbrennt (Wärme freisetzt) sobald es über die Zündtemperatur erhitzt wurde. In der Realität ist dieser Wert neben der Art des Kunststoffes vor allem von der Geometrie, Lage, Verpackung und vielen weiteren Faktoren abhängig. So verbrennt z.B. eine leere PET Flasche in kürzerer Zeit mit einer viel höheren Wärmefreisetzungsrate als die gleiche Menge PET in Würfelform.

Für die Bildung eines Mittelwertes wurden folgende Überlegungen berücksichtigt:

- PMMA setzt bei einem Poolbrand rund 500 kW/m<sup>2</sup> frei.
- Benzin setzt bei einem Poolbrand rund 2.500 kW/m<sup>2</sup> frei.
- Kerosin/Petroleum setzt bei einem Poolbrand rund 1.700 kW/m<sup>2</sup> frei.

<sup>55</sup> Vgl. Schneider/Franssen/Lebeda, 2008, S. 127

<sup>56</sup> Vgl. Fischer/Jenisch/Stohrer/Homann/Freyhuth/Richter/Häupl, 2008, S. 601

- Eine Regallagerung von PE-Flaschen in unterteilten Kartons (4,6 m Lagerhöhe) setzt im Brandfall rund 6.242,5 kW/m<sup>2</sup> frei.
- Eine Regallagerung von PS-Becher in unterteilten Kartons (4,6 m Lagerhöhe) setzt im Brandfall rund 13.620 kW/m<sup>2</sup> frei.
- Die Wärmefreisetzung bei einem durchschnittlichen Wohnraumbrand beträgt rund 250 kW/m<sup>2</sup>.<sup>57</sup>

Anhand dieser Beispiele ist erkennbar wie unterschiedlich die HRRPUA je nach Material, Lage und Geometrie sein kann. Als Mittelwert wurde für die Brandsimulationen eine Wärmefreisetzungsrates von 1.000 kW/m<sup>2</sup> angenommen wobei sich bei der Simulation Nr. 14 gezeigt hat, dass der Brandverlauf bei diesem Wert relativ gut mit dem Brandversuch korreliert.

Die Dichte (DENSITY) wurde mit 100 kg/m<sup>3</sup> relativ gering angesetzt um auch aufgeschäumten Kunststoffen und den vielen Hohlräumen in den Kunststoffteilen entsprechend Rechnung zu tragen.

```
&SURF ID = 'KUNSTSTOFF'
  MATL_ID           = 'KUNSTSTOFF'
  COLOR             = 'ORANGE'
  HRRPUA            = 1000           [kW/m2]
  BURN_AWAY         = .TRUE.
  IGNITION_TEMPERATURE = 250.       [°C]
  THICKNESS         = 0.05/         [m]

&MATL ID           = 'KUNSTSTOFF'
  SPECIFIC_HEAT     = 0.88           [kJ/kg/K]
  CONDUCTIVITY      = 0.1900        [W/m·K]
  DENSITY           = 100            [kg/m3]
```

Wie in der „THICKNESS“ Eigenschaft ersichtlich ist, entspricht jede als HRRPUA-Kunststoff definierte Zelle tatsächlich einem homogenen Kunststoff-Würfel in der Größe 5x5x5 cm. Als Kompensation für diese doch relativ große Brandlast wurden nicht alle einzelnen kleineren Brandlasten wie z. B. Sackerl, PET-Flaschen usw. simuliert, sondern nur die relevanten Brandlasten erfasst.

Auf der Couchlehne befand sich ein Papierstapel, welcher mit folgenden Eigenschaften definiert wurde (beige in der Abbildung):

```
&SURF ID = 'PAPIER'
  MATL_ID           = 'PAPIER_CELLULOSE'
  THICKNESS         = 0.05           [m]
  BURN_AWAY         = .TRUE.
  COLOR             = 'BEIGE' /

&MATL ID           = 'PAPIER_CELLULOSE'
  DENSITY           = 1550.          [kg/m3]
  SPECIFIC_HEAT     = 1.33           [kJ/kg/K]
  CONDUCTIVITY      = 0.06           [W/m·K]
  N_REACTIONS       = 1              [Anzahl der Reaktionen]
  HEAT_OF_REACTION  = 3600.          [kJ/kg]
  A                 = 6.79E9         [1/s]
  E                 = 1.4E5           [kJ/kmol]
  NU_FUEL           = 0.1             [kg/kg]
  NU_RESIDUE        = 0.9            [kg/kg]
  RESIDUE           = 'PAPIER_KOHLE/'
```

<sup>57</sup> Vgl. Hosser, 2009, S. 90ff.

```

&MATL ID           = 'PAPIER_KOEHLE'
  DENSITY           = 120.                [kg/m³]
  SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_char_3'
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_char_3' /

```

```

&RAMP ID = 'c_char_3', T = 20., F = 0.68 /
&RAMP ID = 'c_char_3', T = 400., F = 1.5 /
&RAMP ID = 'c_char_3', T = 900., F = 1.8 /
&RAMP ID = 'k_char_3', T = 20., F = 0.077 /
&RAMP ID = 'k_char_3', T = 900., F = 0.16 /

```

Wie aus den Materialeigenschaften hervorgeht, handelt es sich um verkohlendes Material mit entsprechenden Pyrolyseeigenschaften. Aufgrund der geringen Brandlast ist der Papierstapel weniger für die Brandausbreitung interessant als für die Analyse des Abbrandverhaltens.

Beim nördlichen Fenster befand sich ein Vorhang, der aufgrund der örtlichen Nähe zum Brandherd wesentlich zur Brandausbreitung beigetragen hat. Die Eigenschaften des Vorhanges wurden wie folgt definiert (rosa in der Abbildung):

```

&SURF ID = 'VORHANG'
  FYI           = 'Properties completely fabricated'
  COLOR         = 'PALE VIOLET RED'
  BURN_AWAY     = .TRUE.
  MATL_ID       = 'VORHANGSTOFF'
  THICKNESS     = 0.005 (bzw. 0.002)[m]
  PART_ID       = 'smoke' /

&MATL ID       = 'VORHANGSTOFF'
  FYI           = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT = 1.0                [kJ/kg/K]
  CONDUCTIVITY  = 0.1                [W/m·K]
  DENSITY       = 100.0              [kg/m³]
  N_REACTIONS   = 1                  [Anzahl der Reaktionen]
  NU_FUEL       = 1.                 [kg/kg]
  REFERENCE_TEMPERATURE = 350.       [°C]
  HEAT_OF_REACTION = 3000.           [kJ/kg]
  HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /     [kJ/kg]

```

Die Dicke (THICKNESS) des Vorhanges wurde im Rahmen der Parameterstudie abgeändert, da sich herausgestellt hat, dass bei einer realistischen Dicke von 2 mm der Abbrand sehr schnell erfolgte und der Brand sich nicht über den Vorhang ausbreitete. Um die Brandlast des Vorhanges entsprechend zu erhöhen, wurde die Dicke für weitere Simulationen mit 5 mm definiert.

An der nördlichen Seite des Kastens wurde die Jacke mit folgenden Stoffeigenschaften definiert (hellrosa in der Abbildung):

```

&SURF ID = 'JACKE'
  FYI           = 'Properties completely fabricated'
  COLOR         = 'VIOLET'
  BURN_AWAY     = .TRUE.
  MATL_ID       = 'GEWANDSTOFF'
  THICKNESS     = 0.05                [m]
  PART_ID       = 'smoke' /

&MATL ID       = 'GEWANDSTOFF'
  FYI           = 'Properties completely fabricated'
  SPECIFIC_HEAT = 1.0                [kJ/kg/K]
  CONDUCTIVITY  = 0.1                [W/m·K]
  DENSITY       = 100.0              [kg/m³]

```

N_REACTIONS	= 1	[Anzahl der Reaktionen]
NU_FUEL	= 1.	[kg/kg]
REFERENCE_TEMPERATURE	= 350.	[°C]
HEAT_OF_REACTION	= 3000.	[kJ/kg]
HEAT_OF_COMBUSTION	= 15000. /	[kJ/kg]

### 3.2.8 Volumen- und Massenaufstellung der in der Simulation verwendeten Materialien

In der folgenden Tabelle 5 sind die Volumen und Massen der einzelnen Materialien zusammengefasst wobei sich diese Aufstellung auf die Simulation Nr. 14 bezieht welche am ehesten dem realen Brandverlauf entspricht. Die Berechnung der Masse erfolgt durch multiplizieren des Volumens mit der Dichte des jeweiligen Materials unter Berücksichtigung des „THICKNESS“-Eigenschaft. Zusätzlich sind in der letzten Spalte die Farben angeführt mit welcher das jeweilige Material in den Abbildungen dargestellt wird:

Material	Volumen (m <sup>3</sup> )	Masse (kg)	Farbe
Teppichbelag	0,102	76,7	Gelb
Glas	undefiniert	undefiniert	Hellblau
Gipskarton	0,737	1062,1	Grau
Bekleidung	0,011	1,1	Violett
Papier	0,003	4,6	Beige
Kunststoff	0,115	11,5	Orange
Metall (Blech)	0,035	277,9	Weiß
Holz	0,244	97,5	Braun
Polstermaterial	2,786	111,4	Violett
Vorhangstoff	0,003	0,3	Rosa

**Tabelle 5: Volumen- und Massenaufstellung der Materialien bei der Simulation Nr. 14**

In den folgenden Abbildungen sind Fotografien des Versuchsraumes vor dem Versuch sowie die entsprechenden Abbildungen der Brandsimulation dargestellt:



**Abbildung 41: Versuchsraum (Foto und Simulation) Blickrichtung Norden**



Abbildung 42: Versuchsraum (Foto und Simulation) Blickrichtung Süden



Abbildung 43: Versuchsraum (Foto und Simulation) Blickrichtung Südosten

### 3.3 Brandsimulationen – Parameterstudie

Um eine möglichst realistische Rekonstruktion des Brandversuches zu erreichen, mussten diverse Eingangsparameter entsprechend angepasst werden bzw. wurde untersucht, welchen Einfluss die Änderungen von Eingangsparametern auf das Endergebnis haben.

Im Wesentlichen wurden basierend auf den Erfahrungen des Erstellers folgende Parameter verändert, um zu einem der Realität angenäherten Ergebnis zu gelangen:

Stellung der Türen:

1. Komplette geöffnet
2. Spalt geöffnet (ähnlich des realen Versuchsaufbaues)
3. Komplette geschlossen

Lage und Örtlichkeit des Initialbrandes:

1. TV-Primärbrand (max. 250 kW)
2. TV-Primärbrand (max. 250 kW) und Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW) (ähnlich des realen Versuchsaufbaues)
3. Monitor Primärbrand (max. 140 kW)

4. Monitor Primärbrand (max. 210 kW) und Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 52,5 kW)

Art des Glasbruches:

1. Kein Glasbruch definiert
2. Nördliches Fensterglas bricht zeitgesteuert nach 6:40 Minuten (wie beim Brandversuch beobachtet)
3. Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C
4. Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 600°C
5. Nördliches und südliches Glas brechen temperaturgesteuert bei 160°C

Anm.: Mit „Glas bricht“ ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass das Glas vollständig zu 100% entfernt wird.

Brandlast:

1. Kunststoffe als PE bzw. PMMA definiert
2. Kunststoffe definiert mit fixer Wärmefreisetzungsrate (HRRPUA) und definierter Zündtemperatur
3. Kunststoffbrandlast im unmittelbaren Bereich neben dem Fernseher vorhanden bzw. nicht vorhanden
4. Dicke des Vorhanges

In der folgenden Tabelle erfolgt eine Zusammenfassung der Simulationsdurchläufe mit Angabe der jeweils relevanten Eingangsparameter sowie einer verbalen Kurzzusammenfassung des Simulationsergebnisses.

Nr.	Türe	Initialbrand	Fenster	Brandlast	Ergebnis
1	Komplett geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW)	Kein Glasbruch	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 2mm	Vorhang verbrennt teilweise, Brand erlischt gemeinsam mit Initialbrand
2	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW)	Kein Glasbruch	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 2mm	Vorhang verbrennt teilweise, Brand erlischt gemeinsam mit Initialbrand
3	Komplett geschlossen	TV-Primärbrand (max. 250 kW)	Kein Glasbruch	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 2mm	Flashover beginnt nach rund 6:40 Minuten und dauert bis 30:00 Minuten (Simulationseende), de facto fast kein Abbrand von Brandlasten sichtbar
4	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW)	Kein Glasbruch	Kunststoff als PE bzw. PMMA, Vorhang 2mm	Vorhang verbrennt teilweise, Brand erlischt gemeinsam mit Initialbrand
5	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW)	Kein Glasbruch	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x10 cm neben der Primärbrandquelle	Vorhang verbrennt teilweise, Rücklehne des Schreibtischsessels beginnt zu brennen, Brand erlischt gemeinsam mit Initialbrand

6	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW)	Nördliches Fensterglas bricht zeitgesteuert nach 6:40 Minuten	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x10 cm neben der Primärbrandquelle	Vorhang verbrennt teilweise, Rücklehne des Schreibtischsessels beginnt zu brennen, Brand erlischt gemeinsam mit Initialbrand
7	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x10 cm neben der Primärbrandquelle	Nach 5:10 Minuten bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 6:55 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten
8	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, weniger Kunststoff-Brandlast mit 20x30x5 cm neben der Primärbrandquelle	Nach 5:26 Minuten bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 6:50 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten
9	Komplett geschlossen	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x5 cm neben der Primärbrandquelle	Nach 5:30 Minuten bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 6:40 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten
10	Spalt geöffnet	Monitor im östlichen Bereich als Primärbrand (max. 140 kW)	Nördliches und südliches Glas brechen temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Drucker und Stereoanlage unmittelbar neben dem Primärbrand	Kunststoff von Drucker und Stereoanlage verbrennen komplett, keine weitere Brandausbreitung
11	Spalt geöffnet	Monitor im östlichen Bereich als Primärbrand (max. 210 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 52,5 kW)	Nördliches und südliches Glas brechen temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Drucker und Stereoanlage unmittelbar neben dem Primärbrand	Nach 6:38 Minuten bricht südliches und nach 6:41 bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 7:35 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten
12	Komplett geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x5 cm neben der Primärbrandquelle	Nach 6:11 Minuten bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 8:36 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten

13	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x5 cm neben der Primärbrandquelle, kein Kunststoff über dem Kasten	Der Brand greift auf den Schreibtischsessel sowie Teile der nordöstlichen Garderobe über, das Fenster bricht nach 5:14 Minuten. Brand erlischt in weiterer Folge von selbst.
14	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 600°C	Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, Kunststoff-Brandlast mit 20x30x5 cm neben der Primärbrandquelle, ca. die Hälfte Kunststoff über dem Kasten	Nach 7:21 Minuten bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 7:30 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten
15	Spalt geöffnet	TV-Primärbrand (max. 250 kW), Sekundärbrand im Bodenbereich (max. 62,5 kW)	Nördliches Fensterglas bricht temperaturgesteuert bei 160°C	Zellengröße 10 cm, Kunststoff als HRRPUA, Vorhang 5mm, weniger Kunststoff-Brandlast mit 20x30x5 cm neben der Primärbrandquelle	Nach 3:16 Minuten bricht nördliches Fensterglas, Flashover nach 6:50 Minuten, realistischer Abbrand der Brandlasten

**Tabelle 6: Zusammenfassung der Parameterstudie zur Rekonstruktion des Brandszenarios**

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine kurze Beschreibung der Simulationsdurchgänge und eine Begründung, warum einzelne Parameter abgeändert wurden:

#### 1. Simulationsdurchgang:

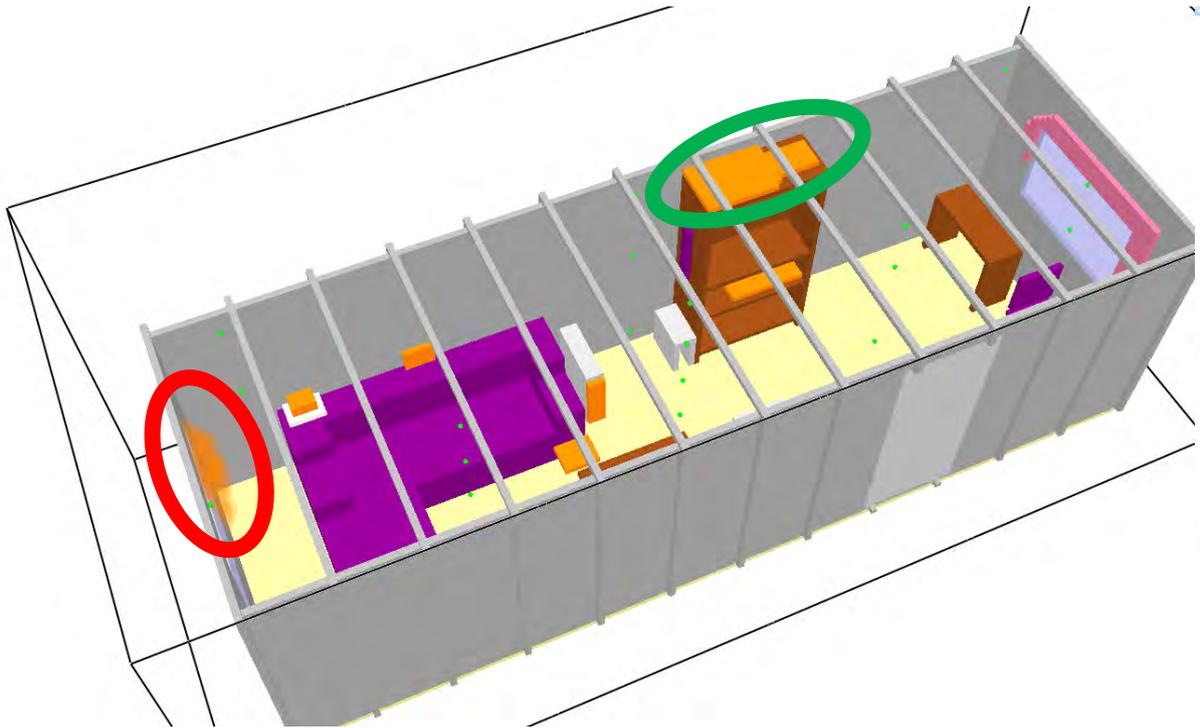
Es wurden nur jene Parameter berücksichtigt, welche aufgrund der Besichtigung der kalten Brandstelle augenscheinlich rekonstruiert werden konnten. Als konservative Annahme wurde die Türe als geöffnet simuliert, um durch die besseren Ventilationsverhältnisse eine entsprechende Brandausbreitung zu erreichen. Als Ergebnis der Simulation stellte sich heraus, dass der Initialbrand Teile des Vorhanges in Brand setzte, es jedoch zu keiner weiteren Brandausbreitung kam.

#### 2. Simulationsdurchgang:

Es wurde die Türe wie beim Brandversuch mit einem Spalt geöffnet simuliert. Das Brandverhalten entsprach annähernd dem 1. Simulationslauf.

#### 3. Simulationsdurchgang:

Es wurde die Türe komplett geschlossen simuliert. Die Belüftung erfolgte demnach lediglich durch den Spalt im südlichen gekippten Fenster. Bei diesem extrem unterventilierten Brand wurde festgestellt, dass die Gesamtbrandleistung außer einem kurzen Anstieg während der Verbrennung des Vorhanges im Wesentlichen weit unter der durch das Design Fire vorgegebenen Brandleistung liegt. Bis zum Abklingen des Brandes waren kleine Flammeneerscheinungen im Bereich des gekippten Fensters sichtbar (roter Kreis). Ebenso verbrannte der Kunststoff auf dem Kasten sehr langsam (grüner Kreis).



**Abbildung 44: 3. Simulationsdurchgang 20:00 Minuten nach Zündung**

4. Simulationsdurchgang:

Aufbau analog dem 2. Simulationsdurchgang mit der Abänderung, dass die Kunststoffbrandlast als HRRPUA durch PE bzw. PMMA ersetzt wurde. Wiederum kam es zu keiner weiteren Brandausbreitung.

5. Simulationsdurchgang:

Unmittelbar neben dem Fernseher (östliche Seite) wurde Kunststoff als HRRPUA als Brandlast situiert, welche die Brandausbreitung gewährleisten sollte. Obwohl sich der Brand teilweise bis auf den Schreibtischstuhl ausbreitete, erlosch der Brand wieder.

6. Simulationsdurchgang:

Aufbau analog dem 5. Simulationsdurchgang mit der Abänderung, dass die nördliche Glasscheibe wie im Versuch nach 6:40 Minuten zeitgesteuert entfernt wurde. Trotz der zusätzlichen Belüftung keine weitere Brandausbreitung.

Nachdem es trotz zusätzlicher Brandlasten und besserer Belüftung zu keiner weiteren Brandausbreitung kam, wurde (wie beim Versuch beobachtet) im Bodenbereich ein zusätzliches Design Fire modelliert, welches den Sekundär- bzw. Stützbrand durch das Abtropfen von Kunststoffen simulieren sollte:



**Abbildung 45: Zusätzliches Design Fire im Bodenbereich (7. Simulation, 6:00 Minuten nach Zündung)**

#### 7. Simulationsdurchgang:

Aufbau analog dem 6. Simulationsdurchgang mit der Änderung, dass der Bruch des nördlichen Fensters temperaturgesteuert bei 160°C erfolgt und im Bodenbereich ein zusätzliches Design Fire mit einer maximalen Leistung von 62,5 kW simuliert wird. Bei diesem Versuch kam es erstmals zu einer Brandausbreitung bzw. in weiterer Folge zum Flashover.

#### 8. Simulationsdurchgang:

Um die Brandausbreitung etwas zu verzögern, wurde die Brandlast unmittelbar neben dem Fernseher halbiert. Die nördliche Fensterscheibe brach nun rund 15 Sekunden später, der Zeitpunkt des Flashover war jedoch nahezu unverändert.

#### 9. Simulationsdurchgang:

Es wurde untersucht, wie sich der Brand bei geschlossener Türe verhält, wobei nahezu keine Änderungen des Brandverlaufes feststellbar waren.

#### 10. Simulationsdurchgang:

Bei diesem Durchgang wurde die Brandentstehung beim Monitor des PC-Arbeitsplatzes simuliert. Die Initialbrandleistung war mit max. 140 kW etwas geringer, wobei die Form der Brandleistungskurve der Fernsehbrandkurve entsprach. Der Brand breitete sich auf den Kunststoff (welches Drucker und Stereoanlage simulieren sollten) aus und erlosch gemeinsam mit dem Design Fire.

#### 11. Simulationsdurchgang:

Bei diesem Durchgang wurde die Brandentstehung wiederum beim Monitor simuliert. Die maximale Brandleistung des Primärbrandes wurde jedoch auf 210 kW erhöht und zusätzlich wurde ein Sekundärbrand im Bodenbereich mit 52,5 kW angenommen. Es kam in weiterer Folge zur Brandausbreitung bzw. zum Flashover.

Zu diesem Zeitpunkt hat sich herauskristallisiert, dass der 8. Simulationsdurchgang am ehesten mit dem Brandversuch korreliert. Es wurden daher in weiterer Folge basierend auf dieser Simulation diverse Parameterstudien in Form von Ventilationsänderungen, Brandlaständerungen oder Gittergrößenänderung durchgeführt.

#### 12. Simulationsdurchgang:

Aufbau analog dem 8. Durchgang mit dem Unterschied, dass die Türe komplett geöffnet war. Fensterbruch und Flashover traten bei dieser Simulation etwas später als im Versuch 8 ein.

#### 13. Simulationsdurchgang:

Aufbau analog dem 8. Durchgang mit dem Unterschied, dass die Kunststoffbrandlast auf dem Kasten entfernt wurde. Der Brand breitete sich zwar teilweise auf die nordöstliche Garderobe und dem Schreibtischsessel aus und erreichte ein Maximum von 600 kW, aufgrund der fehlenden Brandlast über dem Kasten kam es jedoch zu keiner weiteren Brandausbreitung bzw. Flashover.

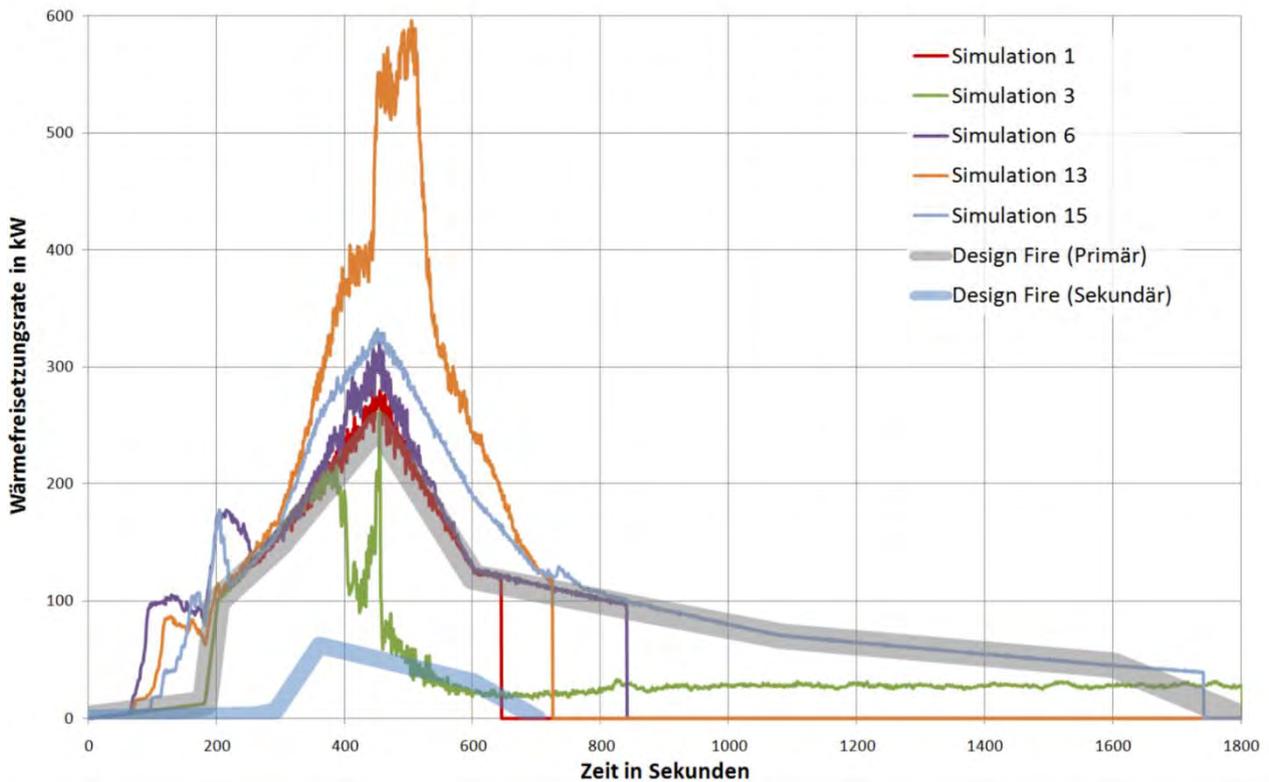
#### 14. Simulationsdurchgang:

Aufbau analog dem 8. Durchgang mit dem Unterschied, dass die Kunststoffbrandlast auf dem Kasten halbiert und die Glasbruchtemperatur auf 600°C erhöht wurde. Das Ergebnis war ein verzögerter Glasbruch bzw. ein verzögerter Flashover, was am ehesten dem beobachteten Brandverlauf entsprach.

#### 15. Simulationsdurchgang:

Beim 15. Simulationsdurchgang wurde das Gitternetz von 5 cm auf 10 cm vergrößert, wodurch es zu keiner ausgedehnten Brandausbreitung bzw. Flashover kam. Da mit dem 5-cm-Netz im Gegensatz zum 10-cm-Netz sehr gute und realistische Ergebnisse gewonnen werden konnten, wurde die Gitternetzstudie nicht weiter verfolgt. Darüber hinaus wäre eine weitere Verfeinerung des Gitters auf z. B. 2,5 cm aufgrund der begrenzten Rechnerleistung nicht möglich gewesen.

In der folgenden Abbildung 46 sind die Wärmefreisetzungsraten von 5 Simulation bzw. vom primären und sekundären Design Fire dargestellt, wo es zu keinem Flashover kam:



**Abbildung 46: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate von Simulation ohne Brandausbreitung**

Erläuterung zur Abbildung 46:

Beim 1. Simulationsdurchgang kam es zu fast keiner Brandausbreitung, wodurch die gesamte Wärmefreisetzung relativ genau mit dem Design Fire korreliert.

Beim 3. Simulationsdurchgang (extrem unterventiliert durch die geschlossene Türe) korreliert anfangs die Wärmefreisetzungsrate mit dem Design Fire, sobald der Sauerstoffvorrat erschöpft ist, sinkt die Wärmefreisetzungsrate jedoch massiv ab.

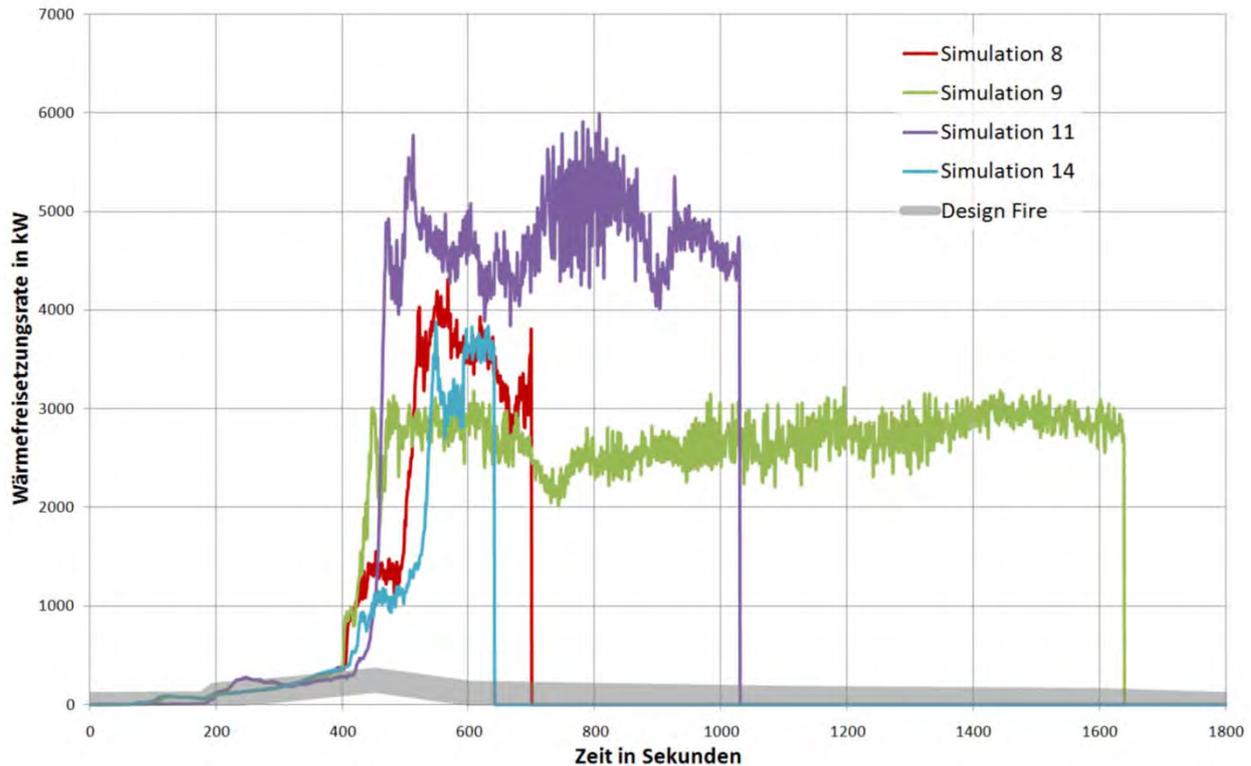
Beim 6. Simulationsdurchgang ist in der ersten Phase (ab ca. 80. Sekunde) sehr gut die Ausbreitung auf die Kunststoffbrandlast neben dem Fernseher zu erkennen, in weiterer Folge (ab ca. 200. Sekunde) greift der Brand auf den Schreibtischstuhl über. Im Bereich der maximalen Wärmefreisetzung des Design Fires (ca. 430 Sekunden) ist sehr gut der Abbrand von Teilen des Vorhanges sichtbar. In weiterer Folge kommt es zu keiner Brandausbreitung mehr und die Brandleistung korreliert wieder mit dem Design Fire.

Beim 13. Simulationsdurchgang wurde neben dem primären auch ein sekundäres Design Fire im Bodenbereich simuliert. Durch das Entfernen der Kunststoffbrandlast über dem Kasten kommt es zu keiner weiteren Brandausbreitung bzw. Flashover.

Der 15. Simulationsdurchgang entspricht vom Aufbau dem 8. Simulationsdurchgang, mit der einzigen Änderung, dass ein 10-cm-Gitternetz anstatt des 5-cm-Gitternetzes verwendet wurde.

Bei Simulation 1, 6, und 13 ist sehr gut der Abbruch des Simulationslaufes zwischen der 644. bzw. 842. Sekunde erkennbar.

In der folgenden Abbildung 47 sind die Wärmefreisetzungsraten von 4 Simulationen bzw. vom primären Design Fire dargestellt, wo es zu einer Brandausbreitung bzw. Flashover kam:



**Abbildung 47: Darstellung der Wärmefreisetzungsrate von Simulation mit Brandausbreitung und Flashover**

Erläuterung zur Abbildung 47:

Sehr gut erkennbar ist, dass beim Simulationsdurchgang 11 (wo der Monitor des PC-Arbeitsplatzes als Brandursache angenommen wurde) die maximale Wärmefreisetzungsrate wesentlich größer war als bei den Simulationen, wo das TV-Gerät als Brandursache angenommen wurde.

### 3.4 Gegenüberstellung des Brandversuches zur Brandsimulation Nr. 14

Basierend auf einem visuellen Vergleich hat sich herausgestellt, dass Simulationsdurchgang Nr. 14 am besten mit dem Brandversuch korreliert. In diesem Unterkapitel erfolgt daher eine Gegenüberstellung dieser Brandsimulation mit dem Brandversuch.

#### 3.4.1 Gegenüberstellung der beobachteten Ereignisse

In der folgenden Tabelle werden die beim Brandversuch beobachteten Ereignisse mit der Brandsimulation gegenübergestellt:

Zeit	Ereignis im Brandversuch	Ereignis in der Brandsimulation Nr. 14
0:00	Zündung	Analog Brandversuch
0:50	Rauch im Deckenbereich über dem Fernseher deutlich sichtbar	Rauch tritt bereits geringfügig bei der Tür bzw. südlichem Fenster aus (siehe folgende Abbildung)
1:40	Kleine Flammen im linken unteren Bereich des Fernsehers sichtbar	Design Fire zeigt bereits rund 60 cm hohe Flamme

3:16	Flammen treten im linken Seitenbereich aus Fernseher heraus	Kunststoffbrandlast neben dem Fernseher fast vollständig verbrannt
3:49	Brennendes Abtropfen des Fernsehers bis zum Fußboden, Brand auf Fernseher beschränkt	---
4:15	Beginnender Vollbrand des Fernsehers, Brand breitet sich auf das Kästchen aus	Insgesamt werden 138 kW freigesetzt, Kunststoffbrandlast neben dem Fernseher ist komplett verbrannt
4:50	Größere abgeschmolzene Teile des Fernsehers bilden Stützfeuer im Bodenbereich	Sekundärbrand zeigt rund 5 cm hohe Flammen
5:06	Vorhang im Bereich des Fernsehers beginnt zu brennen	Vorhang beginnt erst bei 6:00 zu brennen
5:40	Vorhang auf der Seite des Fernsehers im Vollbrand	Vorhang verbrennt kontinuierlich
5:53	Sprung in der Isolierglasscheibe (Innenseite) entsteht	---
6:01	Bildröhre des Fernsehers kippt nach vorne auf den Boden	---
6:39	Teile der inneren Isolierglasscheibe brechen heraus	---
6:46	Innere Isolierglasscheibe bricht großflächig heraus	---
6:57	Faustgroßes Loch in der äußeren Isolierglasscheibe bricht heraus	---
7:32	Äußere Isolierglasscheibe bricht großflächig heraus	Glasscheibe bei 7:21 entfernt, da 600°C erreicht wurden
8:30	Flammen züngeln im oberen Bereich der Türöffnung ins Freie	Bereits ab 7:10 feststellbar
8:46	Erstmals Rauchdurchzündungen im Deckenbereich sichtbar (Flashover)	Bereits ab 7:10 feststellbar
9:20	Wiederholte Rauchdurchzündungen im gesamten Deckenbereich	Flammen schlagen bereits kontinuierlich aus der Tür und dem südlichen Fenster
9:30	Vollbrand vom Decken- bis zum Bodenbereich, Flammen schlagen massiv aus der Türöffnung	Flammen schlagen bereits kontinuierlich aus der Tür und dem südlichen Fenster (siehe folgende Abbildung)
10:20	Öffnung der Tür, Beginn des Löschangriffes über die Türöffnung	Zu diesem Zeitpunkt werden in der Simulation rund 3.600 kW Wärmeleistung freigesetzt
10:50	Rauchdurchzündungen wurden niedergeschlagen	---
10:55	Erster Mann des Atemschutztrupps betritt den Brandraum	---
11:40	Großteil der Flammen abgelöscht	---
14:30	Brand abgelöscht, geringe hellgraue Verrauchung im gesamten Raum	---



Abbildung 48: Verrauchung nach 0:50

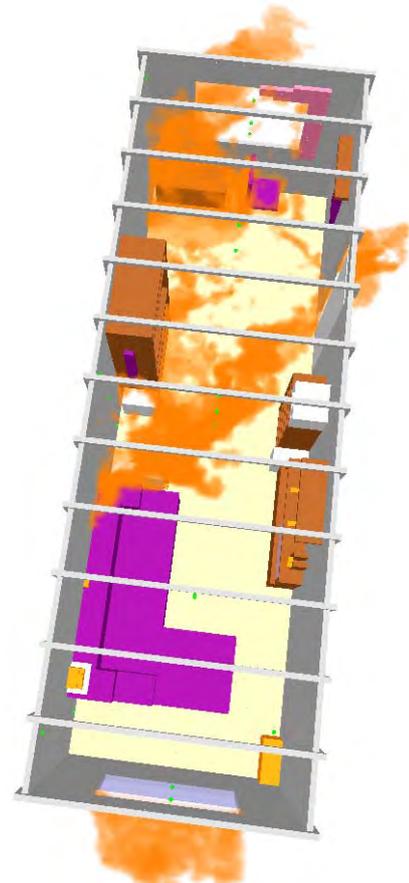


Abbildung 49: Flammenbild nach 9:30

Die Gegenüberstellung der Brandabläufe zeigt, dass in der Simulation die Ereignisse etwas früher stattfinden. Grundsätzlich wäre es jedoch möglich, durch detaillierte Parameterstudien und einer Anpassung der beiden Initialbrände bzw. der Ventilationsbedingungen auch den zeitlichen Verlauf annähernd gleich zu simulieren.

### 3.4.2 Gegenüberstellung der Messauswertung

In den folgenden Diagrammen werden ausgewählte Temperaturmesswerte sowie die Sauerstoffkonzentration vom Brandversuch und vom Simulationsdurchgang Nr. 14 gegenübergestellt. Eine detaillierte Gegenüberstellung sämtlicher Sensoren ist im Anhang C zu finden. Bemerkenswert ist, dass die gemessenen Daten relativ gut mit den simulierten Daten korrelieren, wobei in der Simulation im brandfernen Bereich (blaue Graphen) die Temperatur eher zu hoch berechnet wird, und im brandnahen Bereich (rote Graphen) die Temperatur eher zu niedrig berechnet wird.

Zum Graphen „Versuch-F2“ in der Abbildung 52 wird angemerkt, dass die Temperatur nach 510 Sekunden stark absinkt, da sich aufgrund der mechanischen Zerstörung des Glases die Lage des Temperatursensors geändert hat.

Nicht berücksichtigt wurde die Tatsache, dass durch die Temperatursensoren im Brandversuch nicht nur die Gastemperaturen erfasst wurden, sondern auch durch die Strahlungswärme zusätzlich erhitzt wurden. Im Gegensatz dazu sind die ausgewerteten Temperaturen aus der Simulation die tatsächlichen Gastemperaturen.

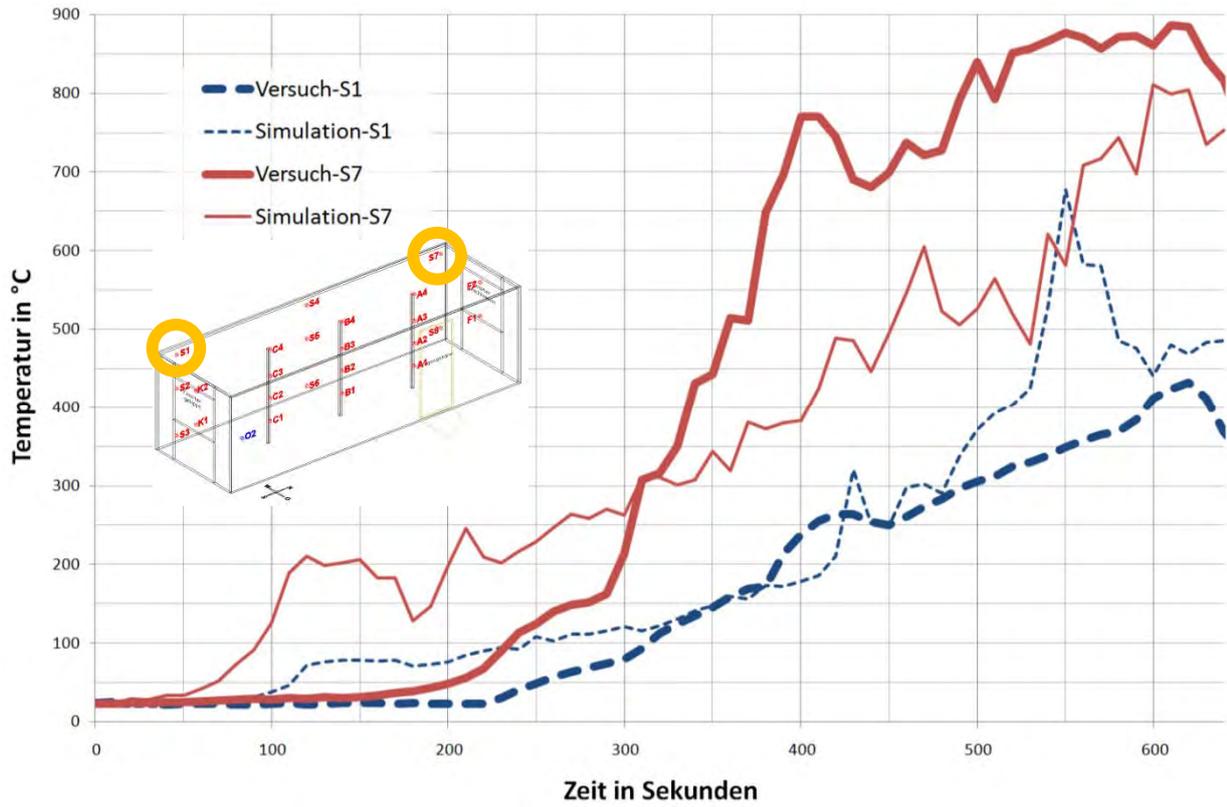


Abbildung 50: Gegenüberstellung der Deckentemperaturen vom Versuch und der Simulation

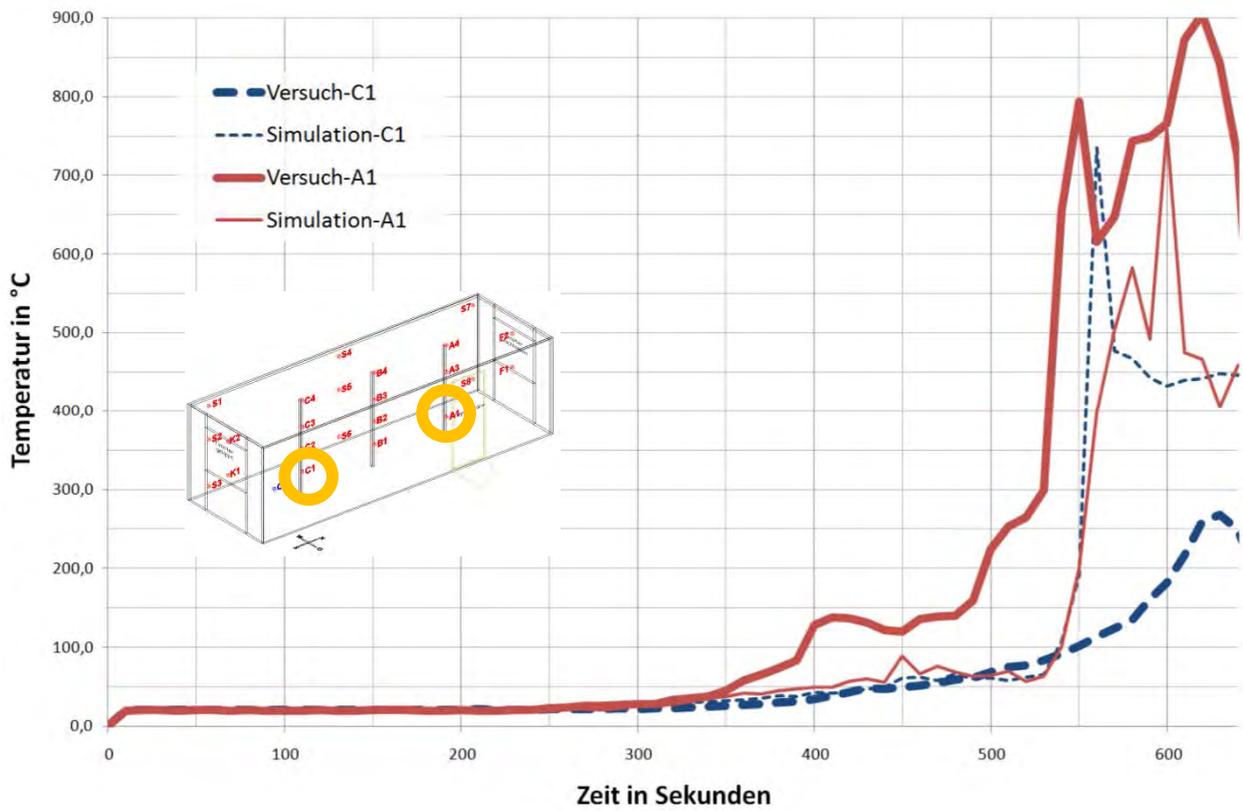


Abbildung 51: Gegenüberstellung der Bodentemperaturen vom Versuch und der Simulation

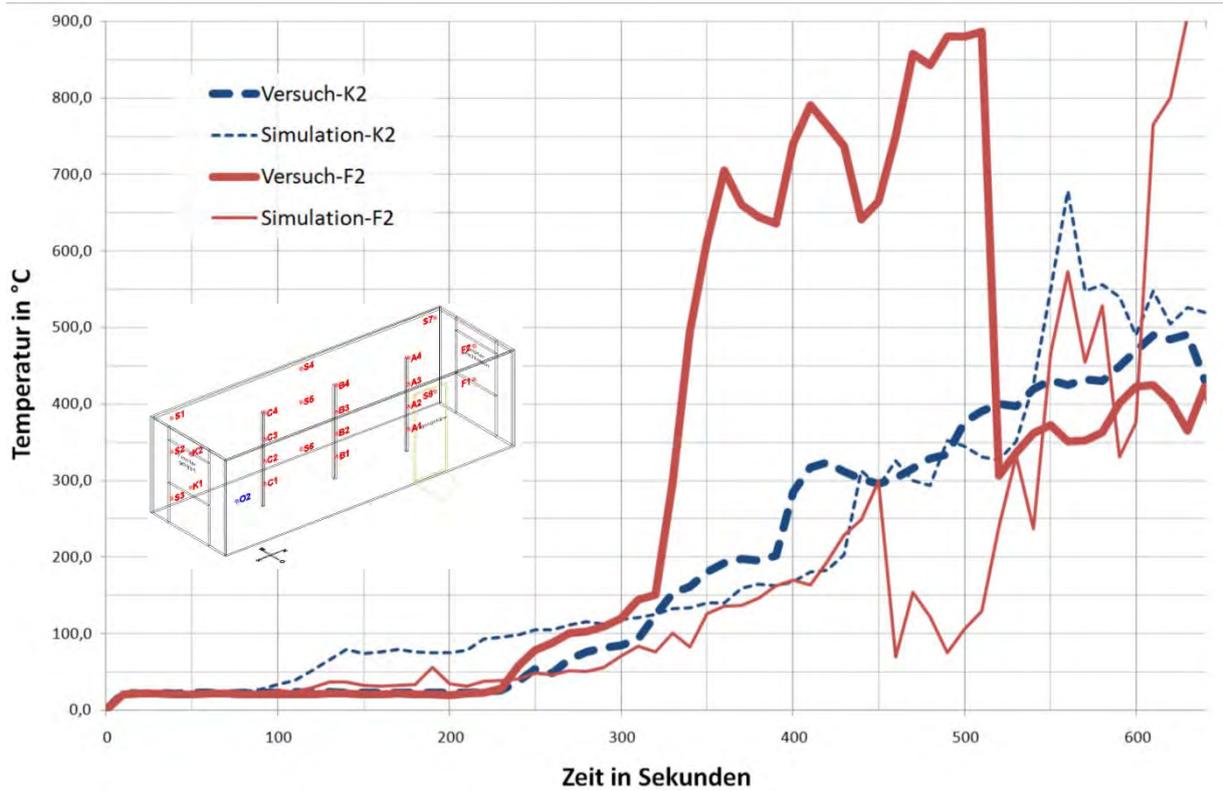


Abbildung 52: Gegenüberstellung der Temperaturen im Fensterbereich vom Versuch und der Simulation

Wie in Abbildung 53 ersichtlich korreliert auch die im Versuch ermittelte Sauerstoffkonzentration sehr gut mit der in der Simulation ausgewerteten Sauerstoffkonzentration.

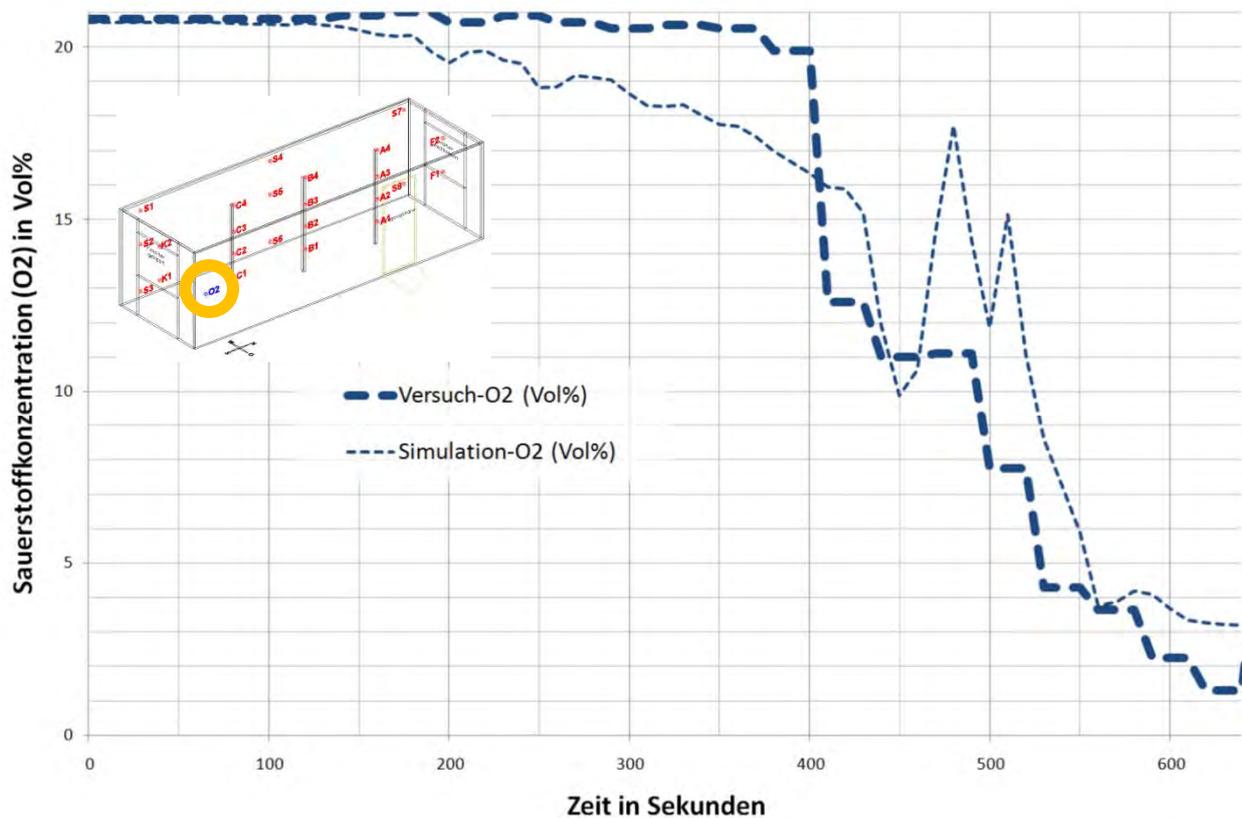


Abbildung 53: Gegenüberstellung der Sauerstoffkonzentration vom Versuch und der Simulation

### 3.4.3 Visueller Vergleich des Brandversuches und der Brandsimulation während des Brandes

In den folgenden Abbildungen erfolgt ein visueller Vergleich von Feuer- und Raucherscheinungen während des Brandes:



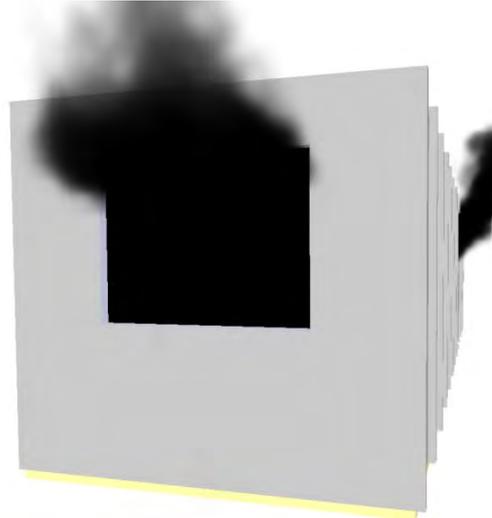
**Abbildung 54: Verrauchung im Brandraum nach 3:10 Minuten**

In der Simulation ist die Verrauchung in den ersten Minuten etwas größer, als im Versuch beobachtet wurde.



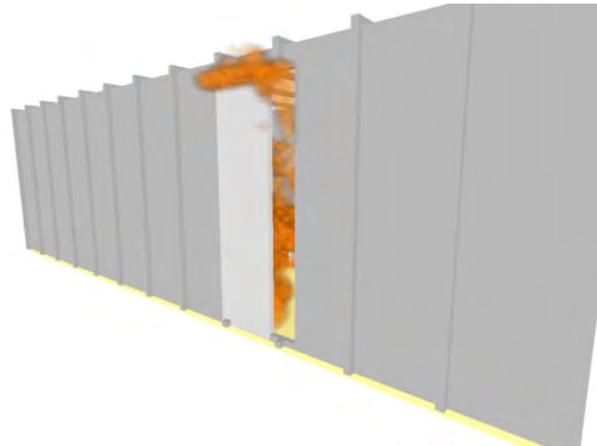
**Abbildung 55: Brandherd nach 5:00 Minuten (Rauch in der Simulation ausgeblendet)**

Sehr gut erkennbar ist, dass in der Simulation der Sekundärbrand zu gering und der Primärbrand zu groß angenommen wurden, d. h. das Abschmelzen und Abfallen von brennenden Kunststoffteilen wurde in der Simulation unterschätzt.



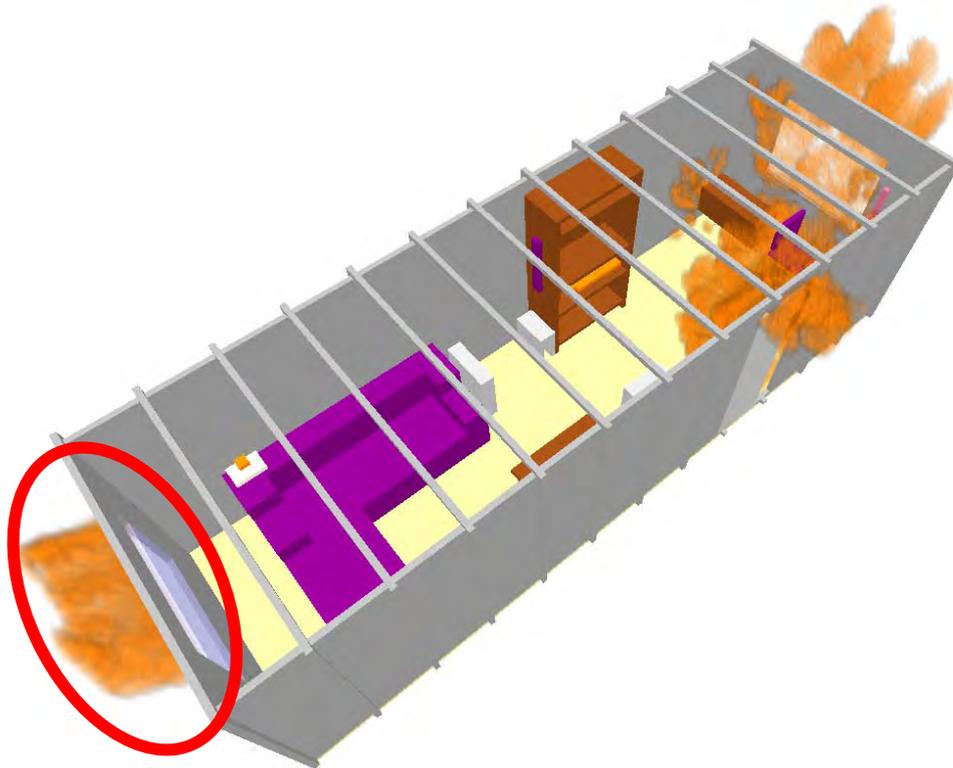
**Abbildung 56: Verrauchung außerhalb des Brandraumes nach 5:42 Minuten**

Die Verrauchung im Freibereich erscheint in der Simulation etwas intensiver.



**Abbildung 57: Blickrichtung Zugangstüre nach 9:32 Minuten**

Im Bereich der Zugangstüre wurde ein vergleichbares Flammenbild festgestellt.



**Abbildung 58: Flammenbild nach 10:00 Minuten**

Bemerkenswert ist, dass in der Simulation beim südlichen Fenster (roter Kreis) ein massiver Flammenaustritt festgestellt wurde. Im Brandversuch wurde beim südlichen Fenster kein so massiver Flammenaustritt festgestellt.

#### 3.4.4 Visueller Vergleich des Brandversuches und der Brandsimulation vor und nach dem Brand

Die folgenden Abbildungen zeigen einen visuellen Vergleich der Einrichtung vor und nach dem Versuch:



**Abbildung 59: Brandraum vor und nach dem Versuch (Blickrichtung Norden)**

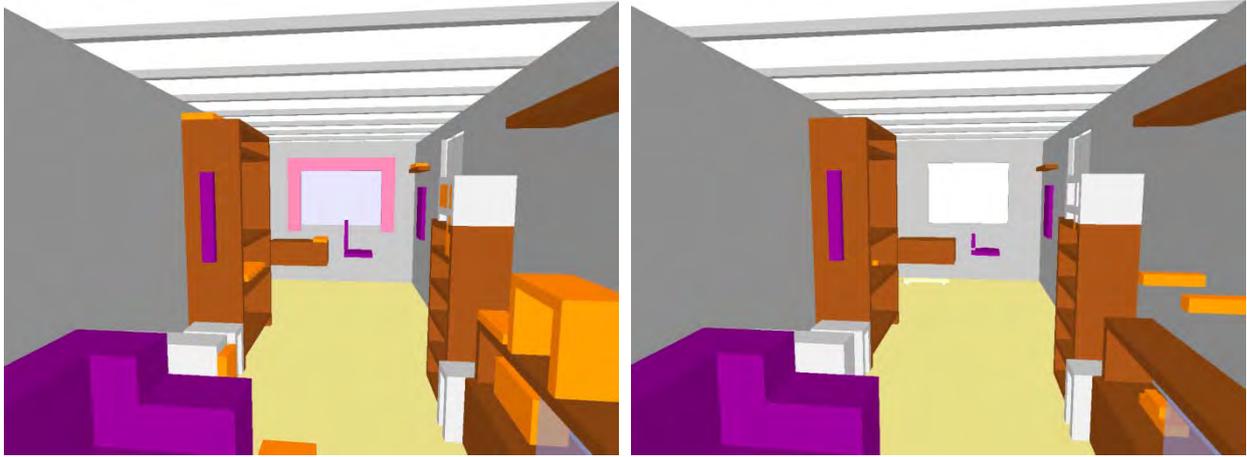


Abbildung 60: Brandraum vor und nach der Simulation (Blickrichtung Norden)



Abbildung 61: Brandraum vor und nach dem Versuch (Blickrichtung Süden)

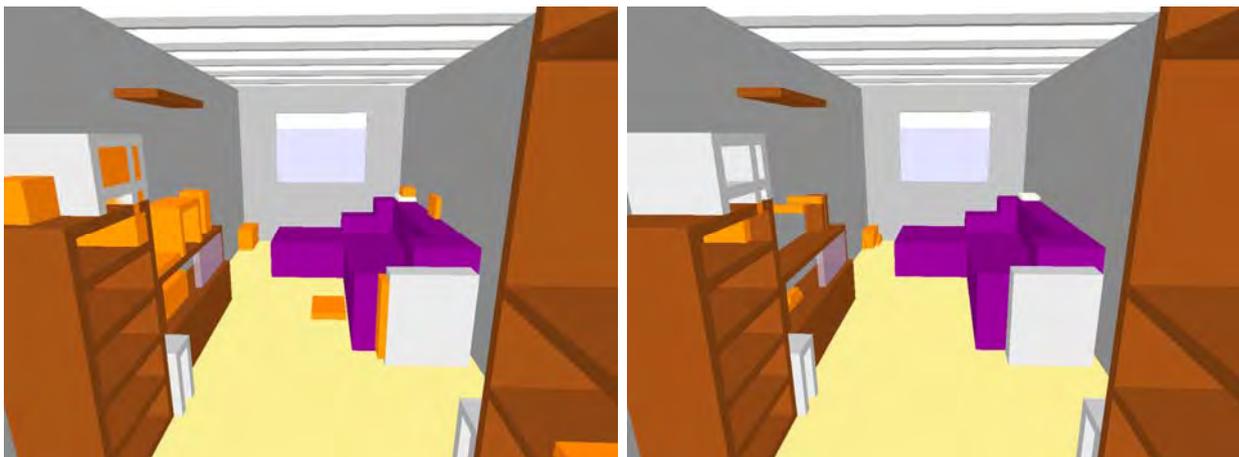
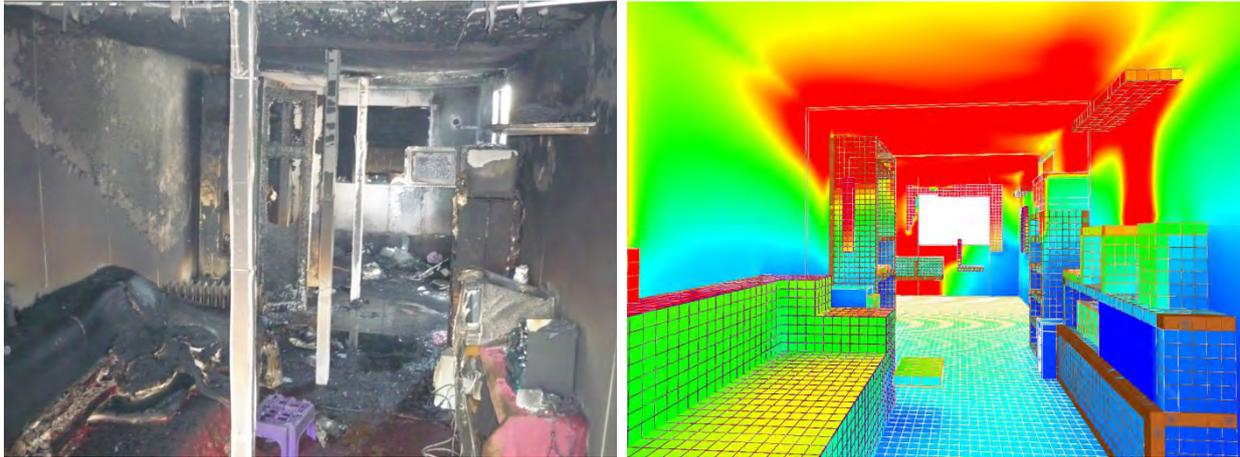


Abbildung 62: Brandraum vor und nach der Simulation (Blickrichtung Süden)

Die Kunststoffmaterialien (orange) und der Vorhang (rosa) zeigten ein vergleichbares Abbrandverhalten. Die Möbel (braun) und die Polstermaterialien (violett) zeigten bei gegenständlicher Simulation fast keinen Abbrand. Hier müssten im Rahmen von Parameterstudien die Materialeigenschaften und Stoffmengen genauer angepasst werden, um ein realeres Abbrandverhalten simulieren zu können.



**Abbildung 63: Brandraum im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen in der Simulation (8:15 Minuten)**

In einer FDS-Simulation können die Oberflächentemperaturen („Boundary File – Wall Temperature“) dargestellt werden. In Abbildung 63 bedeutet die Farbe Rot 270°C und die Farbe Blau 20°C Oberflächentemperatur. Im brandnahen Bereich ist die Temperatur sicherlich zu niedrig bewertet, da sie zu keinem Zeitpunkt (auch in der Vollbrandphase) mehr als 270°C überschritten hat, in der Realität kam es im brandnahen Bereich jedoch sogar zur Verbrennung des abgelagerten Rußes, was einer Temperatur von mehr als 550 °C entspricht. Betrachtet man lediglich die Form der Temperatureinwirkung, so entspricht sie zu diesem Zeitpunkt (8:15 Minuten) in etwa dem Zerstörungsmuster. In der Vollbrandphase (10:00 Minuten) beträgt in der Simulation die Oberflächentemperatur nahezu im gesamten Raum rund 270 °C, was jedoch nicht der Realität entspricht.



**Abbildung 64: Brandraum im Vergleich Temperaturschnitt in der Simulation (10:20 Minuten)**

Wesentlich besser als die Oberflächentemperatur korreliert ein Temperaturschnitt in 2,0 m Höhe mit dem Zerstörungsbild an der Decke. In obiger Abbildung entspricht die Farbe Rot einer Temperatur von 870°C, was für den brandnahen Bereich ein realistischer Wert ist. Die Abbildung wurde 10:20 Minuten nach der Entzündung aufgenommen, was dem Zeitpunkt des Beginnes des Löschangriffes entspricht.

Festgestellt wird daher, dass für die Auswertung von Oberflächenzerstörungen die Temperaturschnitte, die den Wänden unmittelbar vorgelagert sind, besser entsprechen als die Oberflächentemperaturen („Boundary Files“).

### 3.4.5 Zusammenfassung der Gegenüberstellung des Brandversuches mit der Brandsimulation

Zusammenfassend wird festgestellt, dass mit Hilfe der der FDS-Brandsimulation der Brandversuch relativ gut rekonstruiert werden konnte. Obwohl der Brandraum und vor allem die Brandlasten in sehr vereinfachter Form modelliert wurden, entsprachen der Brandumfang sowie der Brandverlauf sehr gut der Realität. Durch weitere Parameterstudien könnten in weiterer Folge der Initialbrand, die Ventilationsbedingungen und das Abbrandverhalten so adaptiert werden, dass auch in diesen Bereichen eine noch größere Übereinstimmung mit der Realität erreicht wird.

## 4 Zusammenfassung

Grundsätzlich ist es möglich, nahezu jedes Brandszenario mittels eines geeigneten CFD-Modells zu rekonstruieren. Die Qualität und Aussagekraft der Simulation ist jedoch von einer Vielzahl an Faktoren abhängig, wobei neben dem Initialbrand die involvierten Brandlasten und die Ventilationsbedingungen die größte Rolle spielen. Nur wenn hier eine ausreichende Anzahl an Informationen zur Verfügung steht, kann die Simulation durch Parameterstudien entsprechend an den Realbrand angepasst werden. Stehen diese Daten nicht zur Verfügung, ist die Gefahr sehr groß, dass sich im Rahmen von Parameterstudien z. B. Fehler gegenseitig auslöschen.

Wie die beiden Beispiele vom World Trade Center und dem Nachtclubbrand auf Rhode Island zeigen, ist es oftmals unerlässlich, Brandversuche durchzuführen, um entsprechende brandspezifische Eingangsparameter für die Brandsimulation generieren zu können bzw. um das Brandsimulationsmodell für den jeweiligen sehr spezifischen Anwendungsfall zu validieren.

Wie die Brandsimulationsreihe im Rahmen der Dalmarnock Brandversuche gezeigt hat, ist die Realitätsnähe des Simulationsergebnisses neben der Qualität der Eingangsparameter auch sehr stark vom Fachwissen und der Vorgehensweise des Modellanwenders abhängig.

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Brandszenarien sowie der unterschiedlichsten Aufgabenstellungen, für die ein Brandsimulationsprogramm eingesetzt werden kann, ist es nahezu unmöglich, einen allgemein gültigen Leitfaden für die Rekonstruktion von Brandereignissen mittels Brandsimulationsmodellen aufzustellen. Die nachfolgende Zusammenfassung der Erkenntnisse kann jedoch als Leitfaden bzw. Checkliste im Rahmen der Rekonstruktion von Brandereignissen mittels Brandsimulationsmodellen herangezogen werden:

1. Auswahl eines geeigneten Brandsimulationsmodells
  - Prüfen, ob das Szenario mit dem Brandsimulationsmodell modelliert werden kann
  - Prüfen, ob die Software für den Anwendungszweck entsprechend verifiziert und validiert ist
  - Prüfen, ob die Software über die notwendigen Untermodelle wie z. B. Abbrandmodelle, Brandausbreitungsmodell, Sprinklermodell, Detektorenmodell usw. verfügt, um das Szenario simulieren bzw. um die einzelnen Fragestellungen lösen zu können.
2. Festlegen der allgemeinen Simulationsdaten
  - Verbrennungsreaktion entsprechend der dominierenden Brandlasten festlegen
  - Wetterlage berücksichtigen
  - Festlegen, welche Parameter nach der Simulation ausgewertet werden sollen
3. Modellierung der baulichen Gegebenheiten
  - Thermophysikalische Eigenschaften sowie Wärme- und Strahlungsübergangszahlen der Bauteile festlegen

#### 4. Ventilationsbedingungen

- Foto- und Videoaufnahmen vom Brand, auf denen die entsprechenden Fenster und Türen sichtbar sind (z. B. durch Pressefotografen, Passanten, Überwachungskameras usw.)
- Visuelle Wahrnehmungen von Zeugen über die Stellung von Fenstern und Türen
- Akustische Wahrnehmungen von Zeugen wie z. B. das Brechen von Glas
- Auf der Brandmeldeanlage protokollierte Auslösung von Brandfallsteuerungen (z. B. Öffnung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Aktivierung einer Brandrauchabsaugung)
- Wahrnehmungen von Einsatzkräften, welche Türen oder Fenster z. B. gewaltsam geöffnet wurden
- Rückschluss auf die Stellung von Fenstern und Türen aufgrund des Spurenbildes
- Falls keine Informationen über den Zeitpunkt des Glasbruches vorhanden sind, dann Modellierung aufgrund der im Punkt 3.2.6 angeführten thermophysikalischen Parameter
- Modellierung der Zerstörung von sonstigen Gebäudeöffnungen wie z. B. Kunststoff-Lichtkuppeln

#### 5. Simulation des Initialbrandes (Brandursache) durch das implementierte Abbrandmodell

- Es müssen detaillierte Informationen über Lage, Größe, Art und Aufbau des Initialbrandszenarios vorhanden sein.
- Die beim Initialbrand beteiligten Brandlasten müssen möglichst einfache Geometrien aufweisen und dürfen im Zuge des Abbrandes ihre Lage im Wesentlichen nicht ändern. Falls dies doch der Fall ist (z. B. durch Umfallen), muss dies entsprechend in der Simulation berücksichtigt werden.
- Das Verhalten etwaig vorhandener thermoplastischer Kunststoffe muss berücksichtigt werden (Abtropfen, Stützfeuer).
- Die thermophysikalischen Eigenschaften der vorhandenen Brandlasten müssen entweder bekannt sein oder experimentell ermittelt werden.
- Der simulierte Brandverlauf muss durch Vergleichsversuche entsprechend validiert werden, d. h. es muss üblicherweise eine Anpassung der Eingangsparameter (Materialeigenschaften) erfolgen, um ein der Realität entsprechendes Ergebnis zu erhalten.
- Der Abbrand brennbarer Flüssigkeiten kann relativ realitätsnahe als Lachenbrand („Poolfire“) simuliert werden. Es sind jedoch Angaben über die Art der brennbaren Flüssigkeit sowie Größe und Höhe der Lache erforderlich. Dies gilt nicht für den Abbrand voll gesogener Materialien wie bezingetränkte Teppiche oder Holzböden, hier muss der simulierte Brandverlauf wiederum durch entsprechende Brandversuche validiert sein.
- Der Abbrand brennbarer Gase kann relativ realitätsnahe simuliert werden. Es sind jedoch Angaben über die Art des Gases sowie die Ausströmöffnung und die Druckverhältnisse erforderlich.

#### 6. Simulation des Initialbrandes (Brandursache) als Design Fire

- Brandleistungskurve aufgrund der Auswertung von Referenzbrandversuchen oder eventuell aus Fachliteratur
- Mitunter ist der Einsatz mehrerer Design Fires notwendig, um z. B. das (brennende) Abtropfen thermoplastischer Kunststoffe und das damit verbundene Stützfeuer zu simulieren.

#### 7. Simulation des weiteren Brandverlaufes durch das implementierte Abbrandmodell

- Sämtliche relevanten Brandlasten müssen näherungsweise aufgrund der Brandspuren oder z. B. Fotografien vor dem Brand rekonstruiert werden.
- Neben der Menge der Brandlasten sind auch die thermophysikalischen und die Oberflächeneigenschaften relevant.
- Je nach Fragestellung ist es sinnvoll, Referenzbrandversuche durchzuführen, um das Simulationsmodell für den speziellen Anwendungsfall entsprechend zu validieren. Diese

- Methode wurde z. B. bei den Simulationen des World Trade Centers bzw. bei den Untersuchungen zum Nachtclubbrand auf Rhode Island eingesetzt.
- Insbesondere Brandlasten im Bereich des Brandherdes sind relevant für die weitere Brandausbreitung.
  - Parameterstudien durchführen, inwieweit sich geringfügige Änderungen der Brandlast auf den Brandverlauf auswirken. Dies war z. B. bei gegenständlicher Brandsimulation Nr. 13 der Fall, als es beim Entfernen der 5 cm hohen Kunststoffbrandlast über dem Kasten zu keinem Flashover mehr kam.
8. Simulation des weiteren Brandverlaufes als Design Fire
- Je nach Anwendungszweck ist es mitunter ausreichend, das gesamte Brandszenario entsprechend einer definierten Brandleistungskurve (Design Fire) zu simulieren. Dies kann sinnvoll sein, wenn z. B. lediglich die Rauchausbreitung in einem Stiegenhaus untersucht werden soll oder die Temperatureinwirkung auf ein Tragwerk bei einem lokalen Brand.
  - Die Brandleistungskurve kann bei einzelnen freistehenden Brandlasten beispielsweise aus Fachliteratur, oder aus Referenzbrandversuchen ermittelt werden.
  - Es können mehrere Brandleistungskurven (Design Fires) in zeitlichem Abstand in einem Raum simuliert werden, z. B. um die Brandausbreitung zu rekonstruieren. Weiters bietet FDS die Möglichkeit, ein Design Fire erst dann zu „starten“, wenn z. B. an einem gewissen Punkt eine maximale Temperatur oder Wärmestrahlung erreicht wird. Mit dieser Möglichkeit können ebenfalls Brandausbreitungen simuliert werden.
  - Die Brandleistungskurve kann eventuell aufgrund beobachteter oder dokumentierter Brandeffekte näherungsweise rekonstruiert werden wie z. B. aufgrund des Flammenaustrittes aus einer Fassade, der Temperatureinwirkung auf Bauteilen und Einrichtungen usw.
9. Parameterstudie
- Wesentliche Parameter wie Initialbrand, Ventilationsbedingungen und Art bzw. Umfang der vermuteten Brandlast sind im Rahmen einer Parameterstudie entsprechend auf ihren Einfluss auf das Simulationsergebnis zu überprüfen. Zu beachten ist stets, dass sich Fehler oder unbekannte Faktoren bei den Eingangsparametern nicht gegenseitig auslöschen.
10. Gitternetzstudie
- Für das im Rahmen einer Parameterstudie ausgewählte Brandsimulationsszenario ist jedenfalls eine Gitternetzstudie durchzuführen, um nachzuweisen, inwieweit sich Änderungen diesbezüglich auf das Ergebnis der Simulation auswirken.
11. Gegenüberstellung Brandversuch – Brandsimulation
- Vergleich beobachteter Ereignisse während des Brandes mit der Brandsimulation:
    - Flammenbild bei Fenster und Türen
    - Beobachtungen von Einsatzkräften
    - Verrauchung innerhalb und außerhalb des Gebäudes
    - Vergleich des zeitlichen Ablaufes der Ereignisse (Timeline)
  - Vergleich von Brandauswirkungen mit der Brandsimulation
    - Vergleich von Schäden durch Temperatureinwirkungen mit Temperaturverläufen in der Simulation (hierzu in FDS die entsprechenden Temperaturschnitte unmittelbar vor den Wänden und Decken auswerten)
    - Vergleich von Rauch- und Rußablagerungen mit der Verrauchung in der Simulation
    - Vergleich des Abbrandes von Brandlasten mit dem Abbrandverhalten in der Simulation

Im Zuge der Arbeit wurden folgende Feststellungen gemacht:

- Beim Einsatz von Brandsimulationsmodellen zur Rekonstruktion von Brandereignissen muss der Modellanwender sehr umfassende Kenntnisse über die verwendete Software besitzen. Er muss sich stets der charakteristischen Merkmale, Chancen und Grenzen des Modells bewusst sein und diese Eigenschaften entsprechend berücksichtigen bzw. kompensieren.
- Parameterstudien sind mit CFD-Modellen, wo die Rechenzeiten mitunter mehrere Tage betragen, sehr zeitaufwändig und somit nur eingeschränkt möglich. Im Gegensatz dazu sind bei Zonenmodellen Parameterstudien aufgrund der kurzen Rechenzeiten sehr einfach möglich. Derzeit laufen Entwicklungen über den Einsatz von hoch parallelisierten Rechensystemen (wie sie auch in Grafikkarten eingesetzt werden), mit deren Hilfe die Rechenzeiten wesentlich verkürzt werden können.<sup>58</sup> Durch solche Entwicklungen und durch die laufende Erhöhung der Rechenleistung wird es in einigen Jahren möglich sein CFD-Simulationen in einem relativ kurzen Zeitraum abzuwickeln, wodurch in weiterer Folge auch Parameterstudien umfassender und detaillierter durchgeführt werden können. Die aktuelle Version 5.4.1 von FDS enthält jedenfalls schon ansatzweise entsprechende Funktionalitäten, um Parameterstudien einfacher durchführen zu können.<sup>59</sup>
- Obwohl die teilweise sehr komplexen und inhomogenen Brandlasten stark vereinfacht und in Stoffgruppen zusammengefasst simuliert wurden (Kunststoff, Holz, Polsterung, Vorhang, Teppich), konnte der Brandversuch gut simuliert werden.
- FDS verfügt über kein Untermodell, welches ermöglicht, die Ablagerung von Ruß an Wänden oder anderen festen Stoffen zu simulieren. Eine solche Funktionalität könnte z. B. im Rahmen der Brandursachenermittlung eingesetzt werden, um Rußablagerungen bzw. Rußspuren miteinander vergleichen zu können.
- Im kleinmaßstäblichen Bereich, d. h. in der Entzündungs- bzw. Brandentstehungsphase ist das Verbrennungsmodell von FDS mit relativ hohen Unsicherheiten behaftet. Durch Validierungsversuche müssen die thermophysikalischen Stoffeigenschaften oftmals noch angepasst werden, dass das Abbrandverhalten besser der Realität entspricht. Hier wird bereits intensiv an einer weiteren Verbesserung des Verbrennungsmodells geforscht.
- Nicht Thema dieser Arbeit ist die Fragestellung inwieweit Brandsimulationsverfahren als Nachweis in straf- oder zivilrechtlichen Prozessen zulässig sind bzw. unter welchen Voraussetzungen sie eingesetzt werden können. Werden Brandsimulationsverfahren in diesem Zusammenhang angewendet, so ist eine intensive Zusammenarbeit zwischen Brandursachenermittlern bzw. Gerichtssachverständigen und Modellanwendern unerlässlich.
- Neben der Rekonstruktion von Brandereignissen könnten Brandsimulationsmodelle theoretisch auch für die „Just in time“-Analyse von Brandszenarien verwendet werden. Dabei werden die Gebäude mit entsprechender Messtechnik ausgestattet und aufgrund der Messwerte könnte der weitere Brandverlauf durch ein Brandsimulationsmodell vorausberechnet werden. Dadurch könnten Auswirkungen auf Tragwerk, Feuerwehrangegriffsmöglichkeiten, Flashover usw. vorausbestimmt werden. An dieser Thematik wird bereits von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe unter der Leitung der Universität von Edinburgh im Rahmen des „FireGrid“ Projektes geforscht.<sup>60</sup>

---

<sup>58</sup> Vgl. [http://www.qfds.de/01\\_ger.html](http://www.qfds.de/01_ger.html) [25.02.2010]

<sup>59</sup> Vgl. NIST FDS User's Guide, 2009, S. 130.

<sup>60</sup> Vgl. <http://www.firegrid.org> [24.02.2010]

Die aufgestellte Hypothese, dass Brandsimulationsmodelle geeignete Werkzeuge sind, um aufgrund der Brandspuren die entsprechenden Brandverläufe zu rekonstruieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit bestätigt. Festgestellt wurde jedoch, dass für seriöse Anwendungen eines Brandsimulationsmodells eine Reihe zusätzlicher Informationen und Voraussetzungen erfüllt sein müssen, um das Brandgeschehen realistisch rekonstruieren zu können.

## 5 Literaturverzeichnis

ANSYS Germany GmbH: ANSYS unter den 40 am schnellsten wachsenden Software-Unternehmen, in: Pressemitteilung August 2007, Otterfing, 2007

Babrauskas, Vytenis: Glass breakage in Fires, in: Fire Science and Technology Inc., Issaquah, 2005, Online unter: <http://www.doctorfire.com/glass.html> [23.02.2010]

Galpin, Paul: Ansys CFD... The Need For Speed, in: Vortragsunterlagen zum 18th Annual HP Symposium on Technology Trends in Computational Engineering, Plymouth, 3.4.2007

Gorbett, Gregory E.: Computer Fire Models for Fire Investigation and Reconstruction, in: ISFI 2008 – International Symposium on Fire Investigation Science and Technology, Florida, 2008

Hofmann, Anja / Knaust, Christian / Beard, Adrian: Modelling Fire Scenarios in Residential Buildings with Respect to the Benefit of Smoke Detectors and Flame Retardants, in: Proceedings Fire and Materials Conference, San Francisco, 29.-31.1.2007

Fischer, Heinz-Martin / Jenisch, Richard / Stohrer, Martin / Homann, Martin / Freymuth, Hanns / Richter, Ekkehard / Häupl, Peter: Lehrbuch der Bauphysik, 6. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008

Hosser, Dietmar: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01 Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Altenberge; Braunschweig, 2009

NIST: Experiments and Modeling of Multiple Workstations Burning in a Compartment in: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. NIST NCSTAR 1-5E, Gaithersburg MD, September 2005

NIST: Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers in: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. NIST NCSTAR 1, Gaithersburg MD, September 2005

NIST: Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model, NIST Special Publication 1018-5, FDS Version 5.4, Washington, September 2009

NIST: Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, Volume 2: Verification, NIST Special Publication 1018-5, FDS Version 5.4, Washington, Dezember 2009

NIST: Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, FDS Version 5.4, Washington, Dezember 2009

NIST: Heat Release Rate Tests of Plastic Trash Containers in: Report of Test FR 4018, Gaithersburg MD, April 2003

NIST: Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire in: NIST NCSTAR 2. Vol. 1, Gaithersburg MD, June 2005

Rein, Guillermo / Abecassis Empis, Cecilia / Carvel, Richard: The Dalmarnock Fire Tests: Experiments and Modelling, School of Engineering and Electronics, University of Edinburgh, 2007

Schneider, Ulrich: Ingenieurmethoden im Brandschutz, 2. Auflage, Werner Verlag, Köln, 2009

Schneider, Ulrich / Franssen, Jean Marc / Lebeda, Christian: Baulicher Brandschutz, 2. Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin 2008

Shelley, Jonathan / Spearpoint, Michael / Bittern, Adam: Tenability Analysis of Television Set Fires in a Sprinkler Protected Compartment, in: J. Applied Fire Science, Vol. 16(1) 35-70, New Zealand, 2006-2007

## 6 Verzeichnis der Internet-Verweise

- <http://www.ansys.com/Products/fluid-dynamics/cfx/features.asp> [05.11.2009]  
<http://www.cham.co.uk/> [10.11.2009]  
<http://www.doctorfire.com/glass.html> [23.02.2010]  
[http://www.firemodelsurvey.com/pdf/JASMINE\\_2007.pdf](http://www.firemodelsurvey.com/pdf/JASMINE_2007.pdf) [05.11.2009]  
<http://www.fire-simulation.at/Feldmodell.html> [15.10.2009]  
<http://fseg.gre.ac.uk/smartfire/index.html> [10.11.2009]  
[http://www.qfds.de/01\\_ger.html](http://www.qfds.de/01_ger.html) [25.02.2010]  
<http://www.ist-net.de> [10.11.2009]

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Arten von Brandsimulationsmodellen .....	4
Abbildung 2: Themengliederung der WTC Untersuchungen .....	14
Abbildung 3: WTC 1 Simulation in FDS (vor dem Einschlag) .....	15
Abbildung 4: Nachbau von intakten und zerstörten Arbeitsplätzen für die Brandsimulation.....	16
Abbildung 5: Wärmefreisetzungsrates bei einem Brand von drei Büroarbeitsplätzen.....	16
Abbildung 6: Brandverlauf (Temperaturverlauf) in Abhängigkeit von der Zeit .....	17
Abbildung 7: Grundrissplan des Station Nightclub .....	19
Abbildung 8: Bilder Brandversuche, links ohne Sprinkleranlage, rechts mit Sprinkleranlage.....	20
Abbildung 9: Exemplarischer Vergleich eines Temperaturverlaufes von Brandversuch und Brandsimulation .....	21
Abbildung 10: Vergleich zwischen Brandversuch und Brandsimulation (gesprinklert) nach t=40 Sek.....	22
Abbildung 11: Schnittdarstellung der Temperatur im Bereich des Hauptzuganges.....	23
Abbildung 12: Fotos der eingerichteten Wohnung vor dem Brandversuch (verschiedene Blickrichtungen) .....	24
Abbildung 13: Modellierung der Dalmarnock Brandversuche im Zuge des "Round Robin"- Verfahrens .....	25
Abbildung 14: Rauchdurchzündungsanlage der Freiwilligen Feuerwehr St. Pölten - Stadt.....	28
Abbildung 15: 3D-CAD-Modell des Versuchsraumes (Bemaßung in Meter) .....	29
Abbildung 16: Grundriss des Versuchsraumes mit Darstellung der Brandlasten .....	32
Abbildung 17: Versuchsraum vor der Zündung, Blickrichtung Norden .....	32
Abbildung 18: Versuchsraum vor der Zündung, Blickrichtung Süden.....	33
Abbildung 19: Planliche Darstellung der Messstellen im Versuchsraum .....	35
Abbildung 20: Zündquelle im linken unteren Bereich des Fernsehgerätes (mobile Videokamera) .....	36
Abbildung 21: Aus dem TV-Gerät austretender Rauch 50 Sek. nach Entzündung (mobile Videokamera) .....	37
Abbildung 22: Flammen im linken Bereich des Fernsehers 3:20 Minuten nach Versuchsbeginn .....	38
Abbildung 23: Bild vom Brandherd nach 5:30 Minuten von der Videokamera an der nördlichen Stirnseite.....	39
Abbildung 24: 7:32 Minuten nach Brandbeginn bricht die äußere Scheibe des nördlichen Stirnfensters .....	40
Abbildung 25: Rauchdurchzündung rund 9:20 Minuten nach Brandbeginn.....	40
Abbildung 26: Löschangriff der Feuerwehr nach 10:20 Minuten.....	41
Abbildung 27: Zusammenfassung der Messergebnisse vom Brandversuch .....	42
Abbildung 28: Grundriss des Versuchsraumes mit Darstellung der Brandlasten .....	43

Abbildung 29: Foto des Brandraumes, Blickrichtung Norden .....	44
Abbildung 30: Foto des Brandherdes, Blickrichtung Nordwest .....	45
Abbildung 31: Foto des Brandraumes, Blickrichtung Süden .....	45
Abbildung 32: Foto des PC-Arbeitsplatzes, Blickrichtung Südosten .....	46
Abbildung 33: Foto des südlichen gekippten Fensters mit den charakteristischen Sprüngen .....	46
Abbildung 34: Brandraum mit gekipptem Fenster und einen Spalt geöffneter Türe, Blickrichtung Süden .....	51
Abbildung 35: Abbrand des Teppichs im Versuch bzw. in der Simulation Nr. 9 nach 17:30 Minuten .....	53
Abbildung 36: Bild der erkalteten Brandausbruchsstelle unmittelbar nach den Löscharbeiten .....	54
Abbildung 37: Wärmestrahlung von zwei gleichen Mistkübeln im Rahmen eines NIST- Brandversuches .....	55
Abbildung 38: Abtropfen und Bildung eines Sekundärbrandes 5 Minuten nach Entzündung .....	57
Abbildung 39: Maximale Wärmefreisetzungsrates bei Fernseherbränden .....	59
Abbildung 40: Gegenüberstellung der simulierten Brandleistungskurven zu einer in der Literatur dokumentierten Brandleistungskurve eines TV-Gerätes ohne flammhemmenden Kunststoff .....	60
Abbildung 41: Versuchsraum (Foto und Simulation) Blickrichtung Norden .....	68
Abbildung 42: Versuchsraum (Foto und Simulation) Blickrichtung Süden .....	69
Abbildung 43: Versuchsraum (Foto und Simulation) Blickrichtung Südosten .....	69
Abbildung 44: 3. Simulationsdurchgang 20:00 Minuten nach Zündung .....	73
Abbildung 45: Zusätzliches Design Fire im Bodenbereich (7. Simulation, 6:00 Minuten nach Zündung) .....	74
Abbildung 46: Darstellung der Wärmefreisetzungsrates von Simulation ohne Brandausbreitung .....	76
Abbildung 47: Darstellung der Wärmefreisetzungsrates von Simulation mit Brandausbreitung und Flashover .....	77
Abbildung 48: Verrauchung nach 0:50    Abbildung 49: Flammenbild nach 9:30 .....	79
Abbildung 50: Gegenüberstellung der Deckentemperaturen vom Versuch und der Simulation .....	80
Abbildung 51: Gegenüberstellung der Bodentemperaturen vom Versuch und der Simulation .....	80
Abbildung 52: Gegenüberstellung der Temperaturen im Fensterbereich vom Versuch und der Simulation .....	81
Abbildung 53: Gegenüberstellung der Sauerstoffkonzentration vom Versuch und der Simulation .....	81
Abbildung 54: Verrauchung im Brandraum nach 3:10 Minuten .....	82
Abbildung 55: Brandherd nach 5:00 Minuten (Rauch in der Simulation ausgeblendet) .....	82
Abbildung 56: Verrauchung außerhalb des Brandraumes nach 5:42 Minuten .....	83
Abbildung 57: Blickrichtung Zugangstüre nach 9:32 Minuten .....	83
Abbildung 58: Flammenbild nach 10:00 Minuten .....	84
Abbildung 59: Brandraum vor und nach dem Versuch (Blickrichtung Norden) .....	84
Abbildung 60: Brandraum vor und nach der Simulation (Blickrichtung Norden) .....	85
Abbildung 61: Brandraum vor und nach dem Versuch (Blickrichtung Süden) .....	85
Abbildung 62: Brandraum vor und nach der Simulation (Blickrichtung Süden) .....	85
Abbildung 63: Brandraum im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen in der Simulation (8:15 Minuten) .....	86
Abbildung 64: Brandraum im Vergleich Temperaturschnitt in der Simulation (10:20 Minuten) .....	86

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eignung der unterschiedlichen Modelltypen zur Rekonstruktion von Bränden.....	10
Tabelle 2: Gegenüberstellung der Brandsimulationsdaten mit den experimentell ermittelten Daten .....	26
Tabelle 3: Auflistung der Messstellen im Versuchsraum.....	34
Tabelle 4: Schmelz- und Zündtemperatur ausgewählter Kunststoffe .....	65
Tabelle 5: Volumen- und Massenaufstellung der Materialien bei der Simulation Nr. 14 .....	68
Tabelle 6: Zusammenfassung der Parameterstudie zur Rekonstruktion des Brandszenarios .....	72

## 9 Abkürzungsverzeichnis

BRE .....	<u>B</u> uilding <u>R</u> esearch <u>E</u> stablishment, Private Organisation in England, welche sich mit der Erforschung und Prüfung von Bauprodukten beschäftigt
CAD .....	<u>C</u> omputer <u>A</u> ided <u>D</u> esign, bezeichnet in dieser Arbeit Programme für die computergestützte Erstellung dreidimensionaler Geometriemodelle
CFD .....	<u>C</u> omputational <u>F</u> luid <u>D</u> ynamics, engl. Begriff für Feldmodelle
DNS .....	<u>D</u> irect <u>N</u> umerical <u>S</u> imulation, Lösungsansatz der Navier-Stokes-Gleichungen
LES .....	<u>L</u> arge <u>E</u> ddy <u>S</u> imulation, Lösungsansatz der Navier-Stokes-Gleichungen
FDS.....	<u>F</u> ire <u>D</u> ynamics <u>S</u> imulator, CFD-Brandsimulationsmodell des NIST
HRRPUA.....	<u>H</u> eat <u>R</u> elease <u>R</u> ate <u>P</u> er <u>U</u> nit <u>A</u> rea, Wärmefreisetzungsrate pro Flächeneinheit
NIST.....	<u>N</u> ational <u>I</u> nstitute of <u>S</u> tandards and <u>T</u> echnology, Bundesbehörde der Vereinigten Staaten
PE .....	<u>P</u> olyethylen
PMMA .....	<u>P</u> olymethylmethacrylat, chem. Bezeichnung für Acrylglas (thermoplastischer Kunststoff)
PU .....	<u>P</u> olyurethan
PVC .....	<u>P</u> olyvinylchlorid, chem. Bezeichnung eines thermoplastischen Kunststoffes
RANS.....	<u>R</u> eynolds <u>A</u> veraged by <u>N</u> avier- <u>S</u> tokes, Lösungsansatz der Navier-Stokes-Gleichungen
RDA .....	<u>R</u> auchdurchzündungsanlage
WTC.....	<u>W</u> orld <u>T</u> rade <u>C</u> enter

## 10 Glossar

### **CFD Code**

Gängige Bezeichnung für eine Feldmodell- oder CFD-Software

### **Design Fire**

Bezeichnet Brandleistungskurven unterschiedlichster Form, welche z. B. in Normen definiert oder aber auch aufgrund von Brandexperimenten ermittelt worden sein können.

### **FDS5DataCreator**

Vom Verfasser entwickeltes Programm, mit dessen Hilfe auch komplexe 3D-Geometrien relativ einfach und rasch von einer CAD-Anwendung als Eingabeparameter in die Software FDS (Fire Dynamics Simulator) übernommen werden können.

### **Kunststoff als HRRPUA**

In der Arbeit verwendete Bezeichnung für Kunststoffe, welche in der FDS Simulation als Oberfläche mit fixer Wärmefreisetzungsrate (pro Flächeneinheit) und mit fixer Zündtemperatur definiert wurden.

### **Release**

Ist die Bezeichnung für eine Veröffentlichung bzw. Freigabe und wird im Zusammenhang mit gegenständlicher Arbeit für die Freigabe einer neuen Softwareversion verwendet.

### **Round Robin**

Begriff für eine Vorgehensweise, wo unterschiedliche Teams unabhängig voneinander ein Problem oder eine Aufgabenstellung bearbeiten.

### **Smokeview**

Bezeichnung des grafischen Auswertetools der Software FDS (Fire Dynamics Simulator), mit dessen Hilfe die Ergebnisse einer Brandsimulation dreidimensional visualisiert werden können.

## Anhang A: Zitierte Webforumsbeiträge

### Google group „FDS and Smokeview Discussions“: FDS 6 Options

Auszug aus

[http://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/7bb35719784756b7](http://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/7bb35719784756b7) [28.10.2009]

Kevin McGratten (NIST), 4.5.2009, 14:20

*I am starting this thread because some of you at our workshop (April 2009) here at NIST expressed an interest in some of the features that are currently being tested in FDS. These features are not described in the User's Guide because they are still in the research stage. Nevertheless, we'll post some basic information in this thread to let those who are interested understand better what we are doing.*

...

### Google group „FDS and Smokeview Discussions“: vertical wall

Auszug aus

[http://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/6dbc02fe400a8b11/72f103e91fc8bd32#72f103e91fc8bd32](http://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/6dbc02fe400a8b11/72f103e91fc8bd32#72f103e91fc8bd32) [18.02.2010]

Nina Schjerve, 1.2.2010, 22:31

*We try to ignite a vertical wall made of PMMA and let it burn on its own, but we can't reach a sustained burning when the heater is removed. We tried different heater temperatures and different durations. Any ideas which burning rate we should reach, or other ideas how we can get the vertical PMMA to ignite and burn?*

...

Kevin McGrattan (NIST) 1.2.2010, 23:22

*Do you have experimental evidence that such a fire scenario is possible? Do you have experimental data to support your choice of material properties? Have you conducted a numerical grid resolution study to determine the appropriateness of your numerical grid?*

### Google group „FDS and Smokeview Discussions“: Flame Spread, trying to duplicate a real fire

Auszug aus

[http://groups.google.com/group/fds-smv/browse\\_thread/thread/8ac05fadcb58/ed1bad8243525c2c?lnk=gst&q=flame+spread+#ed1bad8243525c2c](http://groups.google.com/group/fds-smv/browse_thread/thread/8ac05fadcb58/ed1bad8243525c2c?lnk=gst&q=flame+spread+#ed1bad8243525c2c) [18.02.2010]

Dave McGill, 29.10.2009, 23:24

*I am trying to duplicate full-scale tests of bankers boxes in high-rack storage.*

*In the real tests, the flames produced a typical V pattern and also moved quite readily in a horizontal direction across the tops of the boxes. In the model, the fire spreads vertically in a very narrow band, with very little widening and little horizontal spread across the tops of the boxes. I am using surface properties to control the spread of the fire.*

...

*These values produce an activation of the first sprinkler that is close to reality. However, the activation of subsequent sprinklers is quite different because the flame spread is not matching reality.*

*Does anyone know how to change the parameters to encourage fire spread sideways and horizontally?*

...

Kevin McGrattan (NIST) 30.10.2009, 12:47

*Can you list the experiments you performed on the boxes to obtain the thermal and pyrolysis properties?*

...

Dave McGill, 30.10.2009, 14:03

*No, I am just taking approximations from the SFPE Handbook, which I know will not match the particular real-world properties. I am using them as a starting point to try to approximate the bulk or macro behaviour of the fire. My hunch is that the heat of vapourization is the parameter that is most influential on peripheral spread of a fire. In small scale simulations I am seeing some sensitivity to that, but not as much as I would have expected.*

...

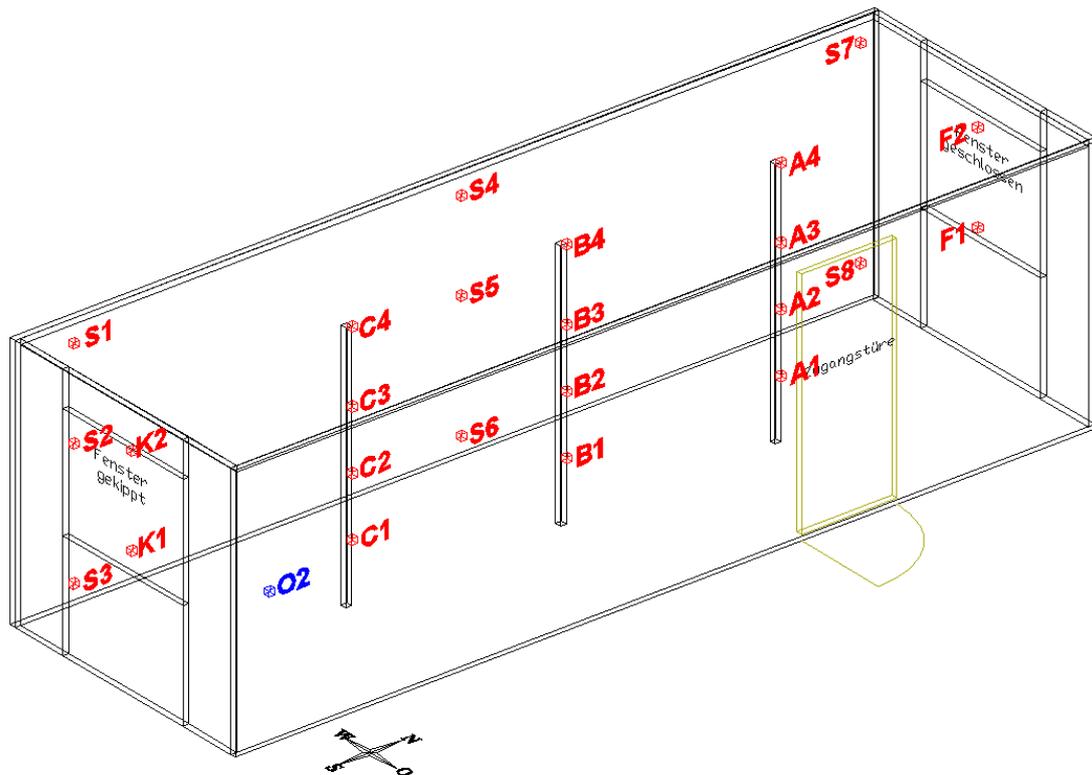
Kevin McGrattan (NIST) 30.10.2009, 14:26

*Actually, for the model that you are using, the heat of vapourization has little to do with the outcome, even if you insist on using the British rather than the American spelling of "vapourization". Rather than re-fight the War of 1812, I can only say that the most important parameters are  $k$ ,  $\rho$  and  $c$ . Flame spread is achieved when an unburned surface cell reaches the specified "ignition temperature." After that, the burning rate follows your specified ramp up and down. The only effect that the HoV has in this case is to extract a bit of energy from the system to account for the pyrolysis that you have already specified. Since you've already achieved the given ignition temperature for that particular surface cell, the surface temperature is not so important to the overall spread.*

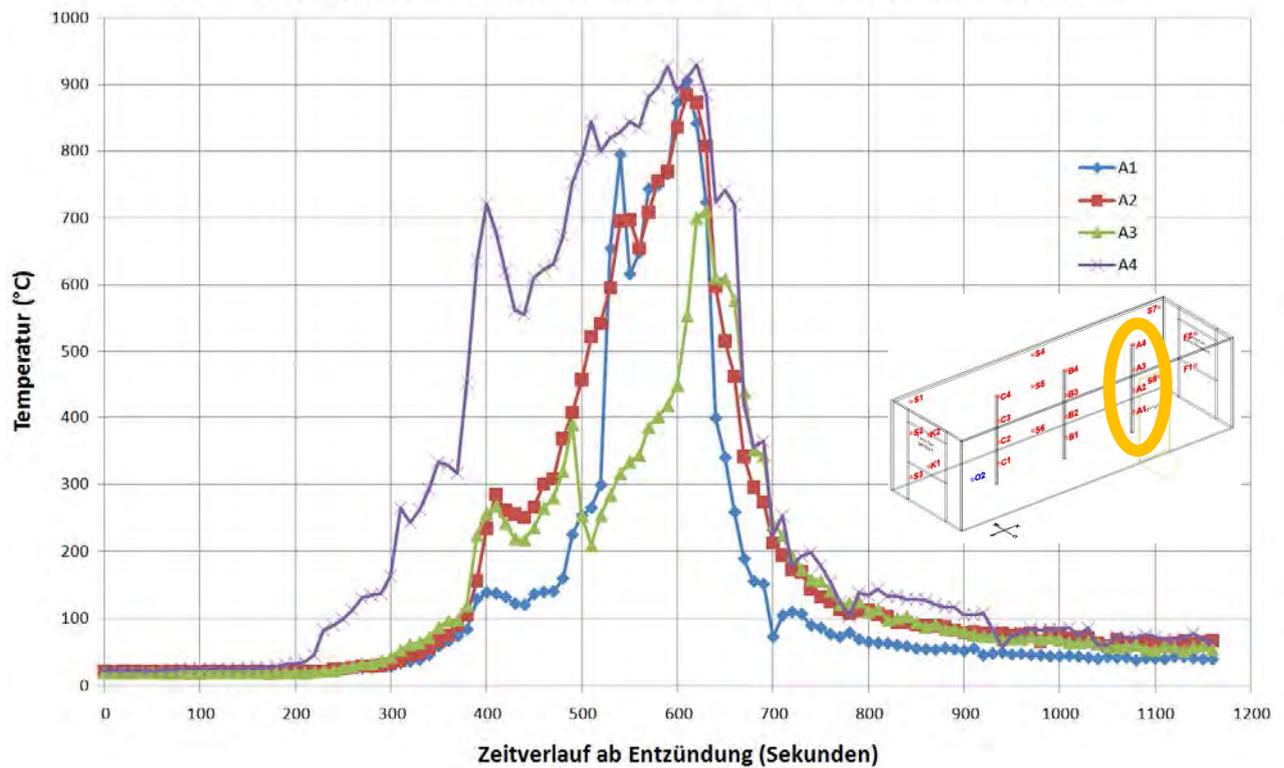
*I spent a considerable amount of time simulating the burning of boxes back in the 90s. At that time, we modeled the cardboard as thermally-thin. That option no longer exists, but it is still true that the spread rate is very sensitive to the thermal properties of that cardboard because the flame spread model that you are using is essentially one in which you predict how long it takes to pre-heat the virgin material to a given temperature. In your model, if you reduce  $k$  to some very small number (like 0.05 W/m/K), I bet you'll see rapid spread because a low  $k$  leads to rapid rise in the surface temperature, which triggers "ignition."*

### Anhang B: Messdatenauswertung des Brandversuches

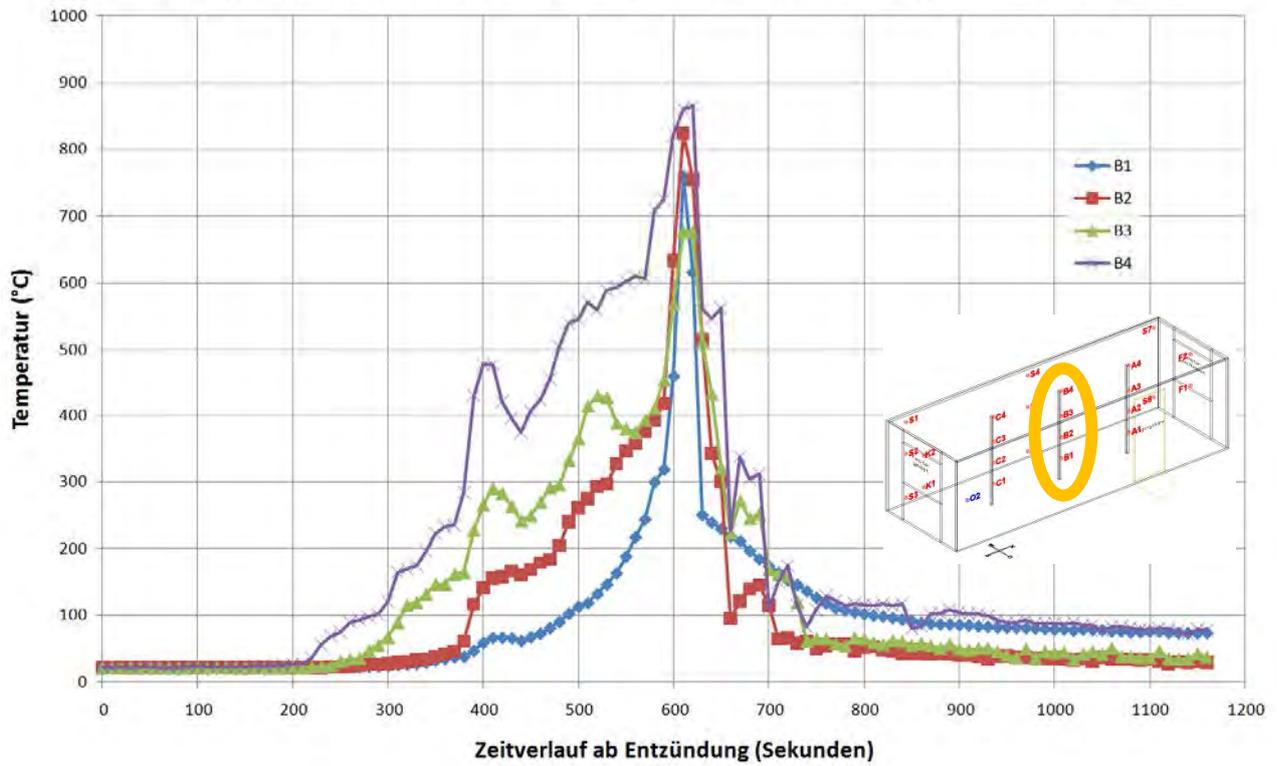
In den folgenden Diagrammen ist der Verlauf der Temperaturen bzw. der Sauerstoffkonzentration vom Realbrandversuch dargestellt.



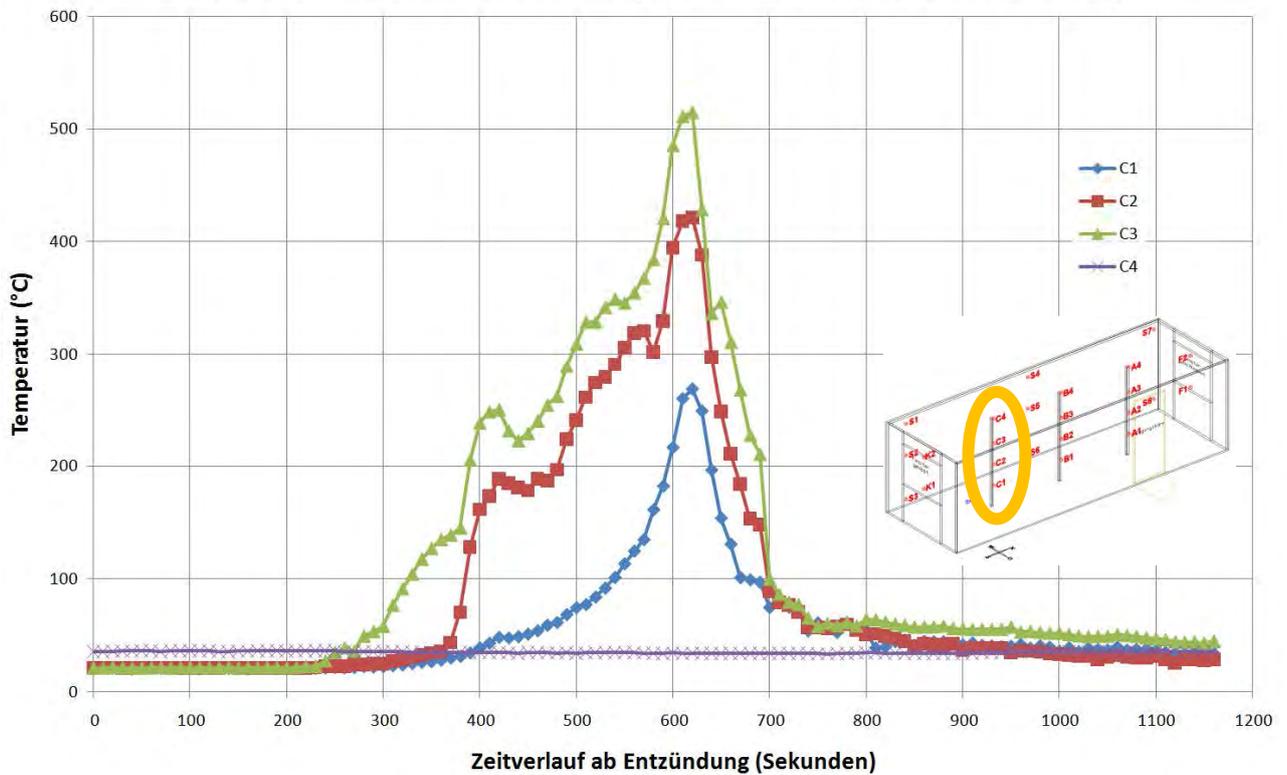
Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (Messbaum A)



**Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (Messbaum B)**

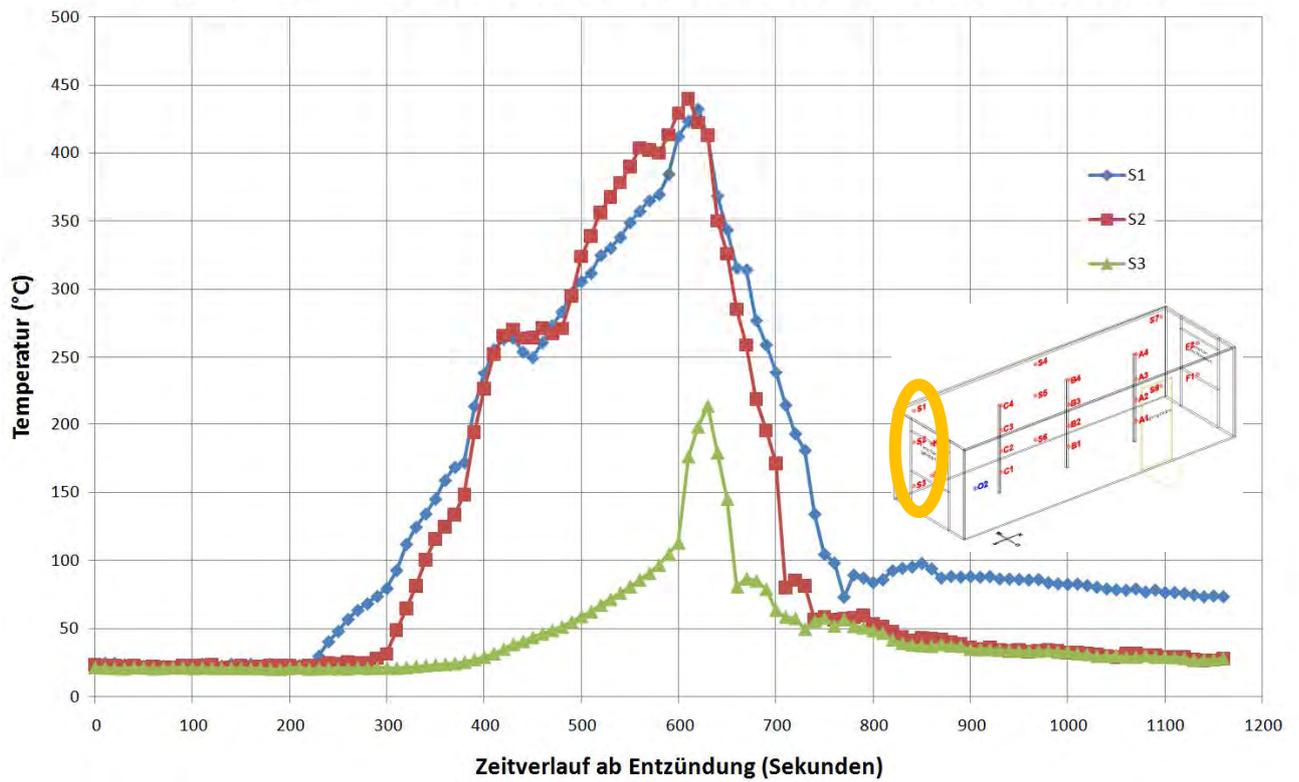


**Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (Messbaum C)**

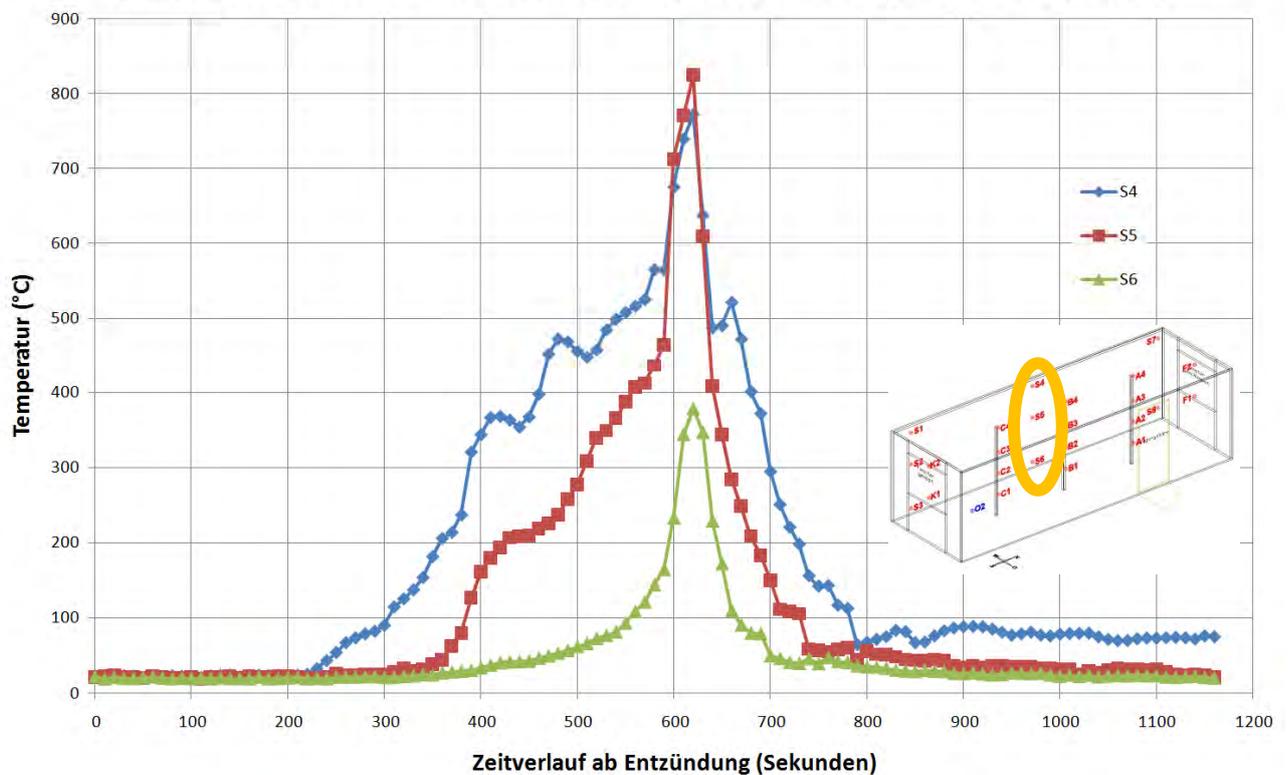


Anmerkung: Der Temperatursensor C4 ist bereits vor Versuchsbeginn ausgefallen.

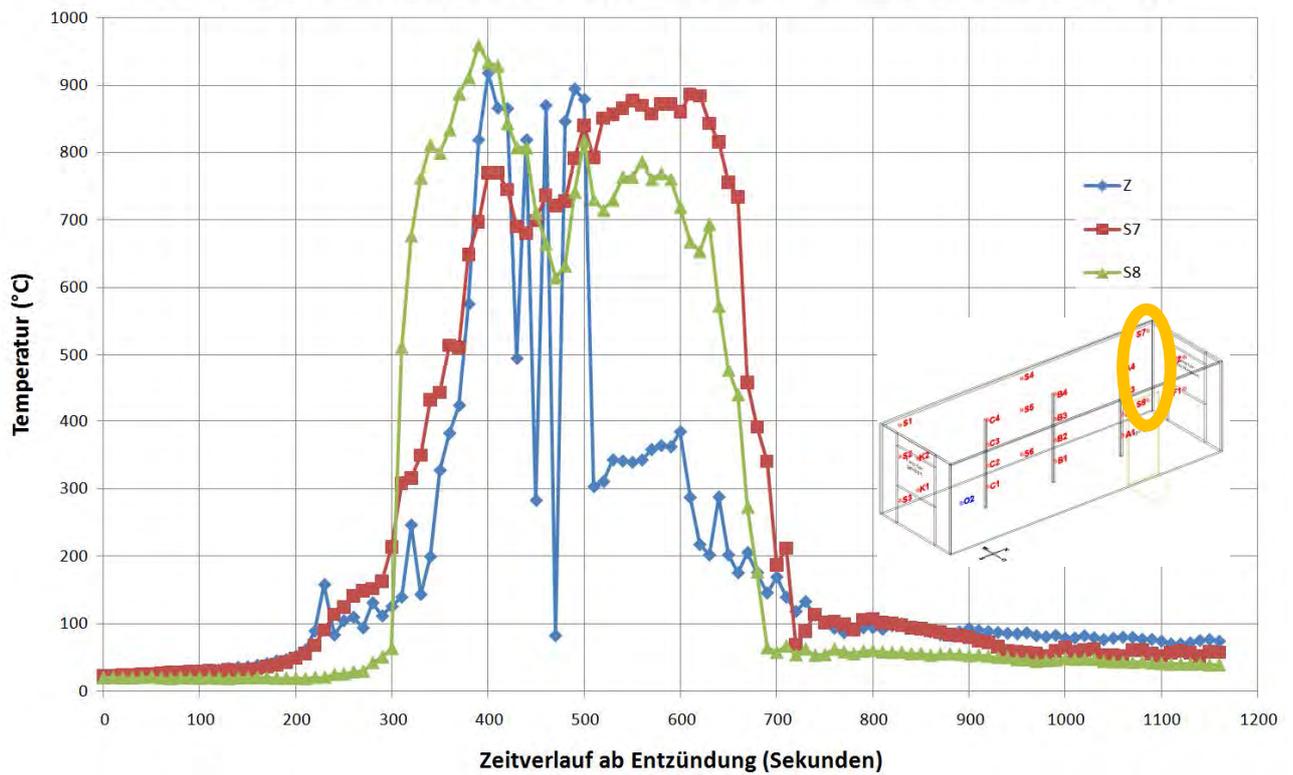
**Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (Sensoren S1, S2, S3)**



**Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (Sensoren S4, S5, S6)**

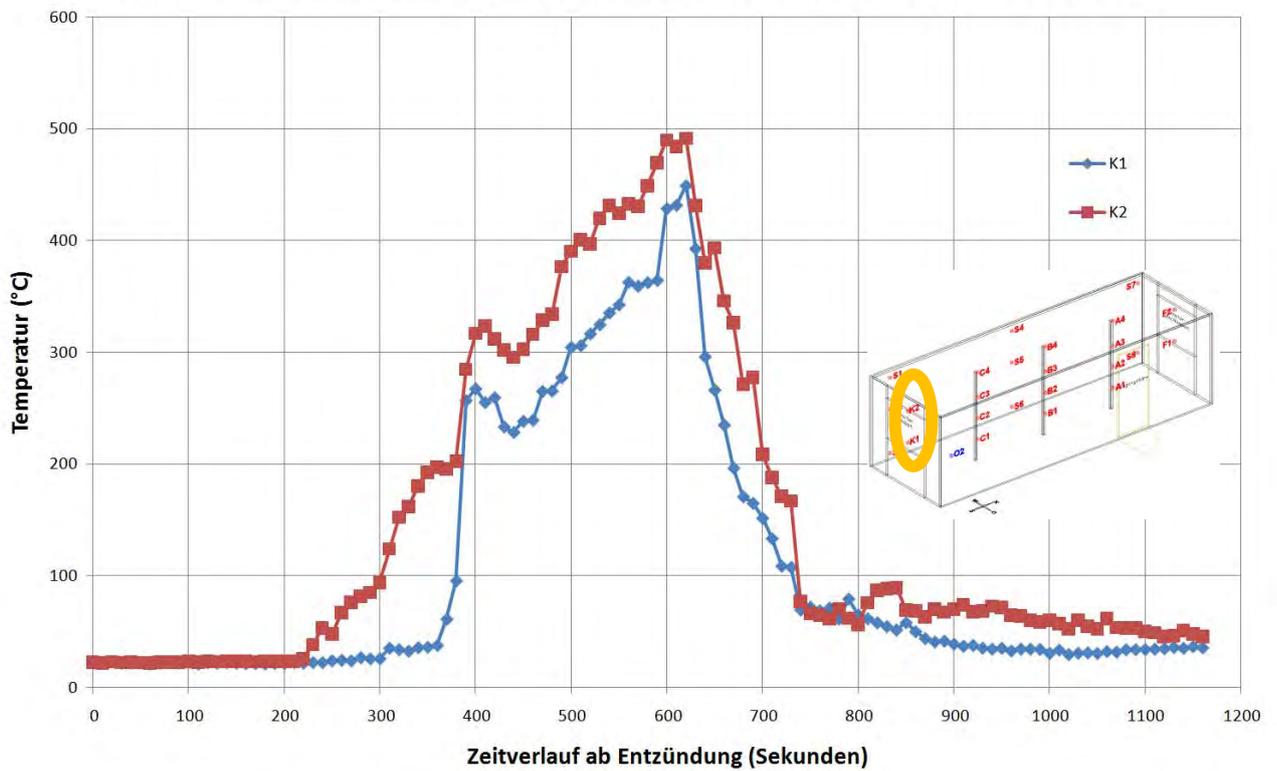


**Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (Sensoren Z, S7, S8)**

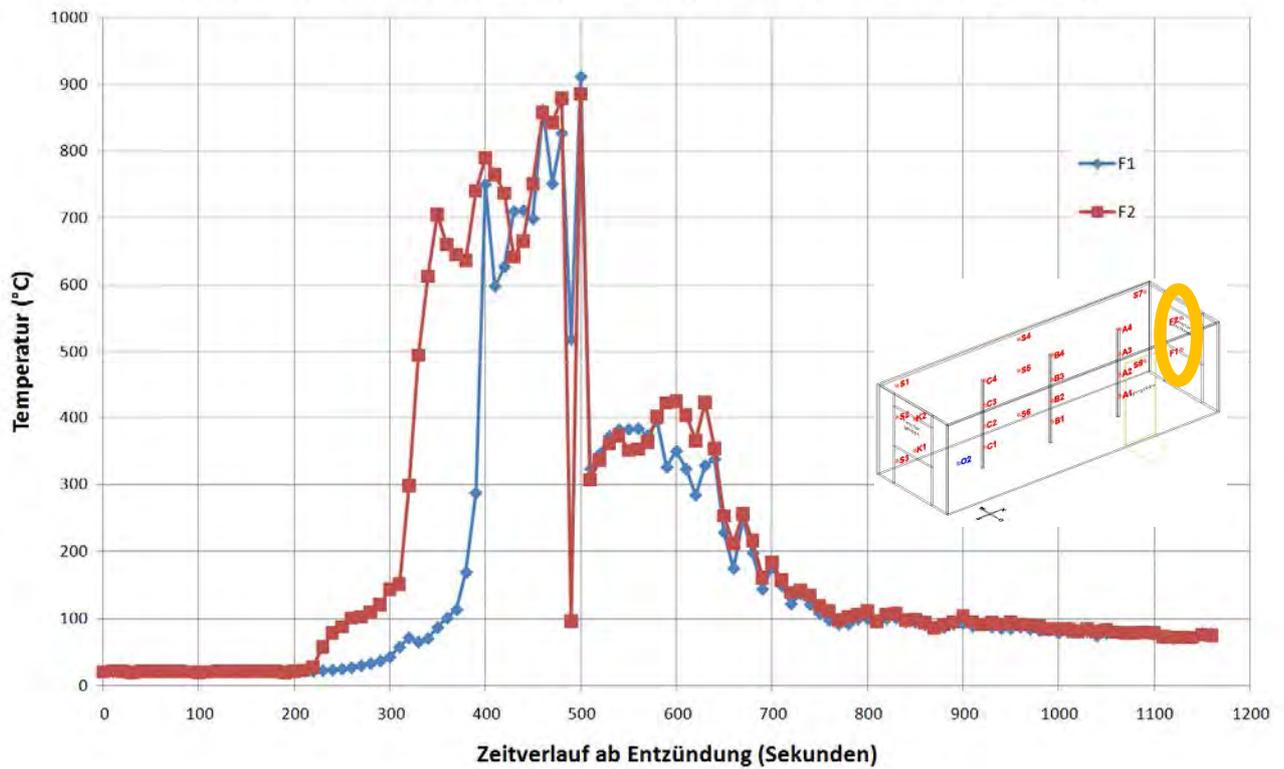


Anmerkung: Der Sensor Z befand sich direkt im Bereich der Zündquelle innerhalb des Fernsehers und hat durch mechanische Verformungen mehrmals die Position verändert.

**Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (gekipptes Fenster - K1, K2)**

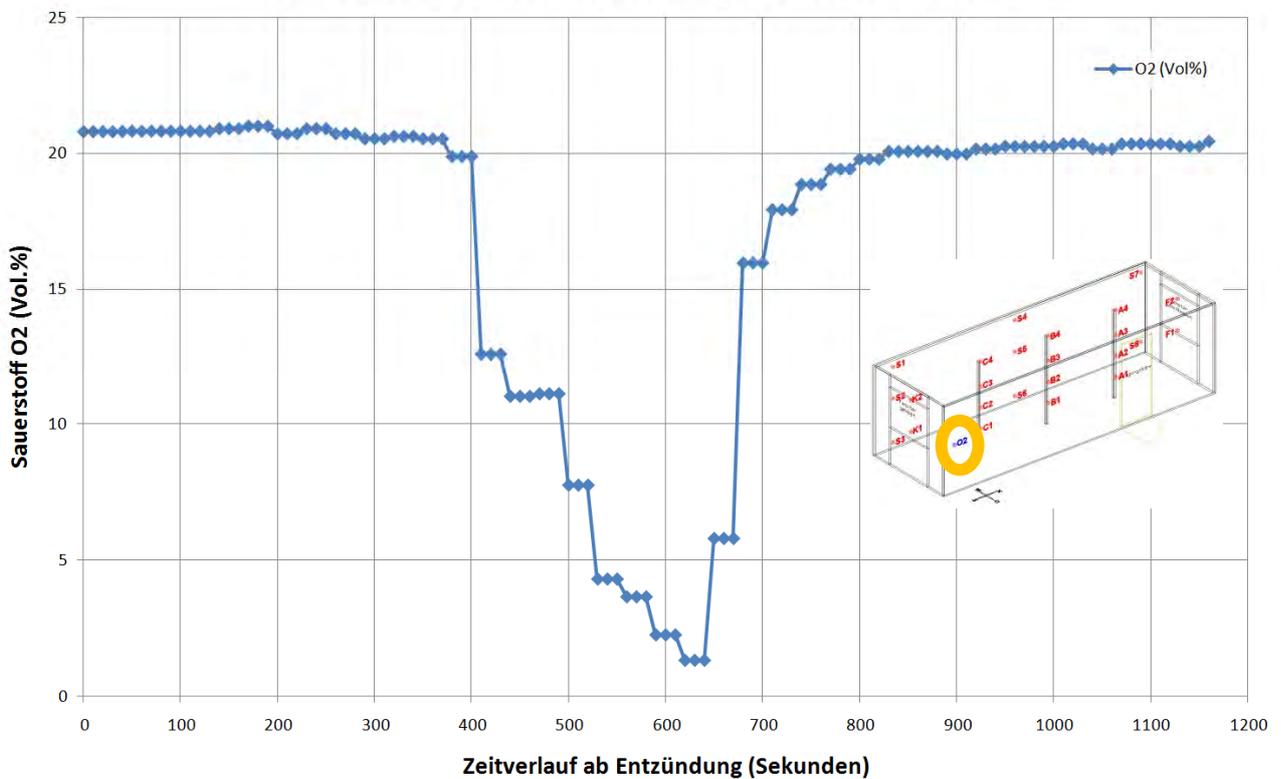


Temperatur-Messdatenauswertung des Brandversuches (geschl. Fenster - F1, F2)



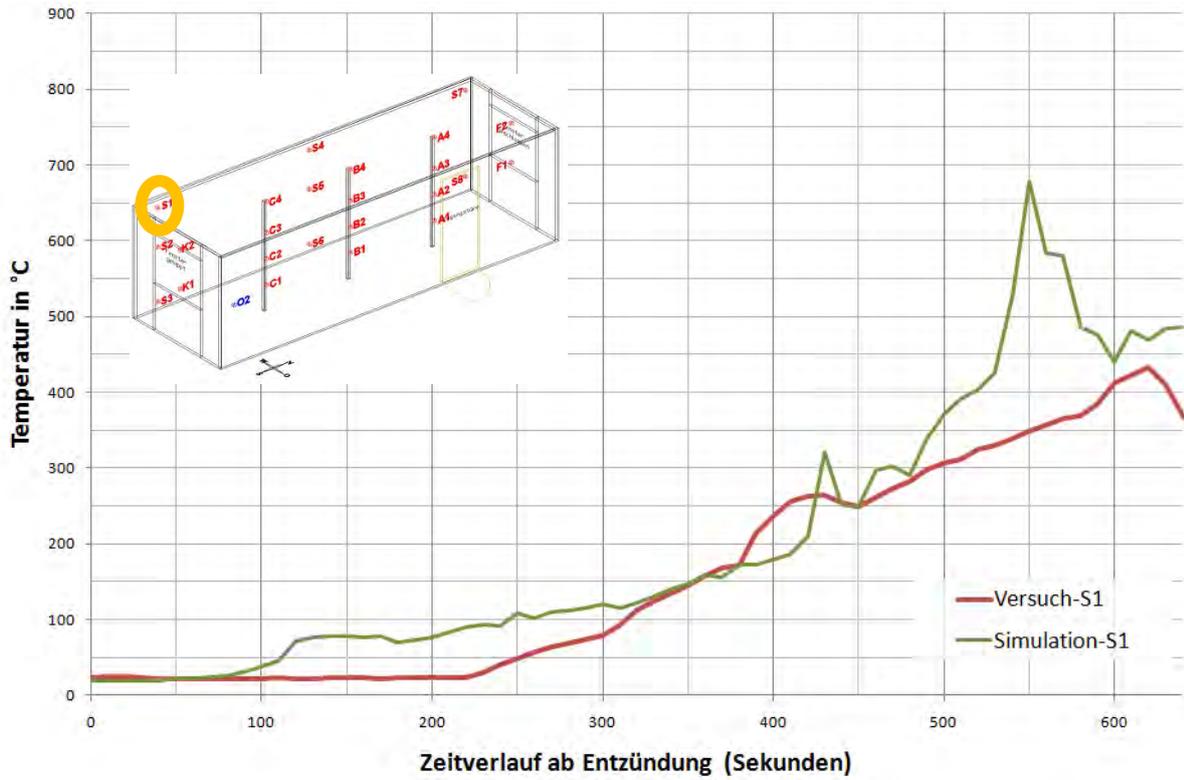
Anmerkung: Durch das Zerspringen der Verglasung hat sich mehrmals die Position der Sensoren verändert.

Sauerstoff-Messdatenauswertung des Brandversuches

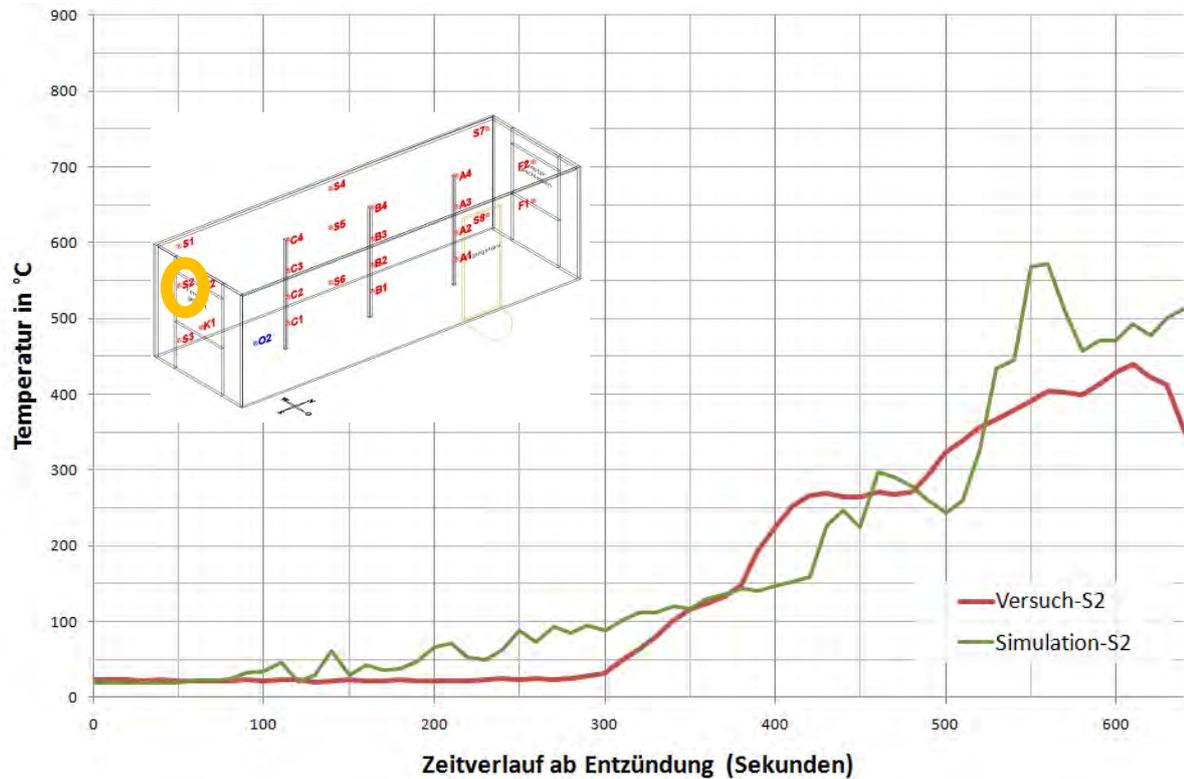


### Anhang C: Gegenüberstellung Brandversuch < > Brandsimulation Nr. 14

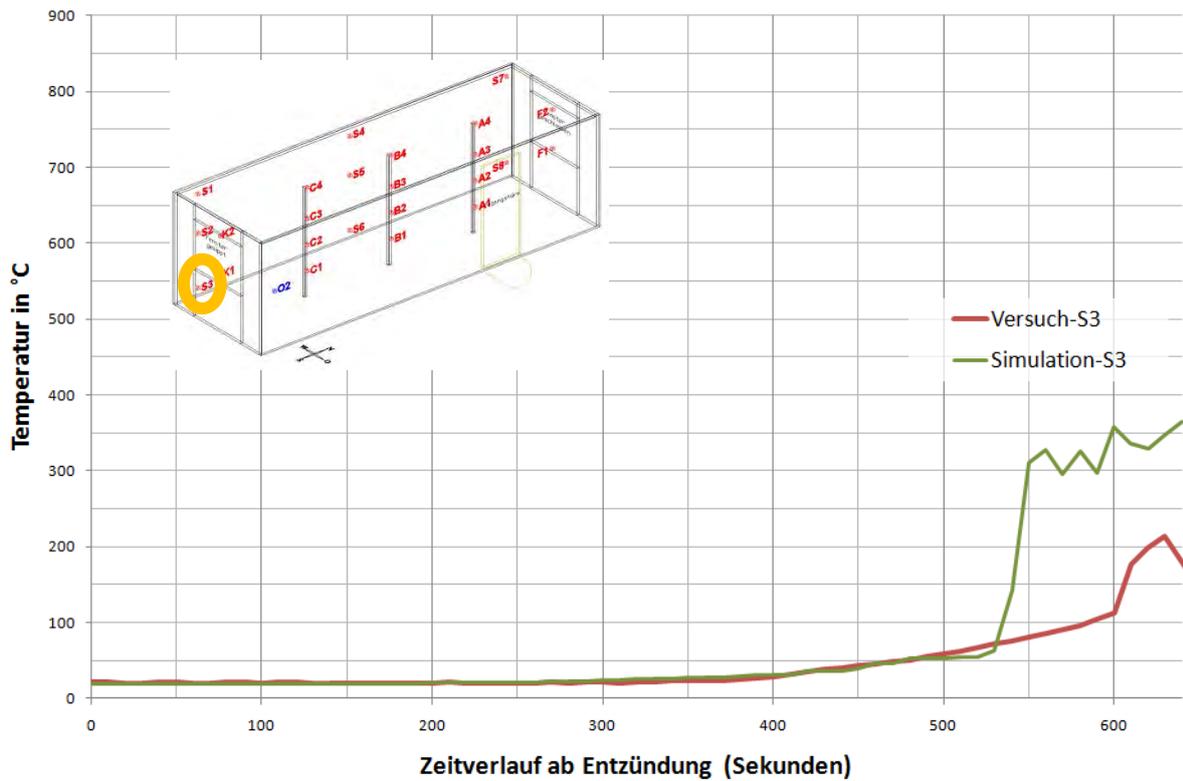
#### Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S1:



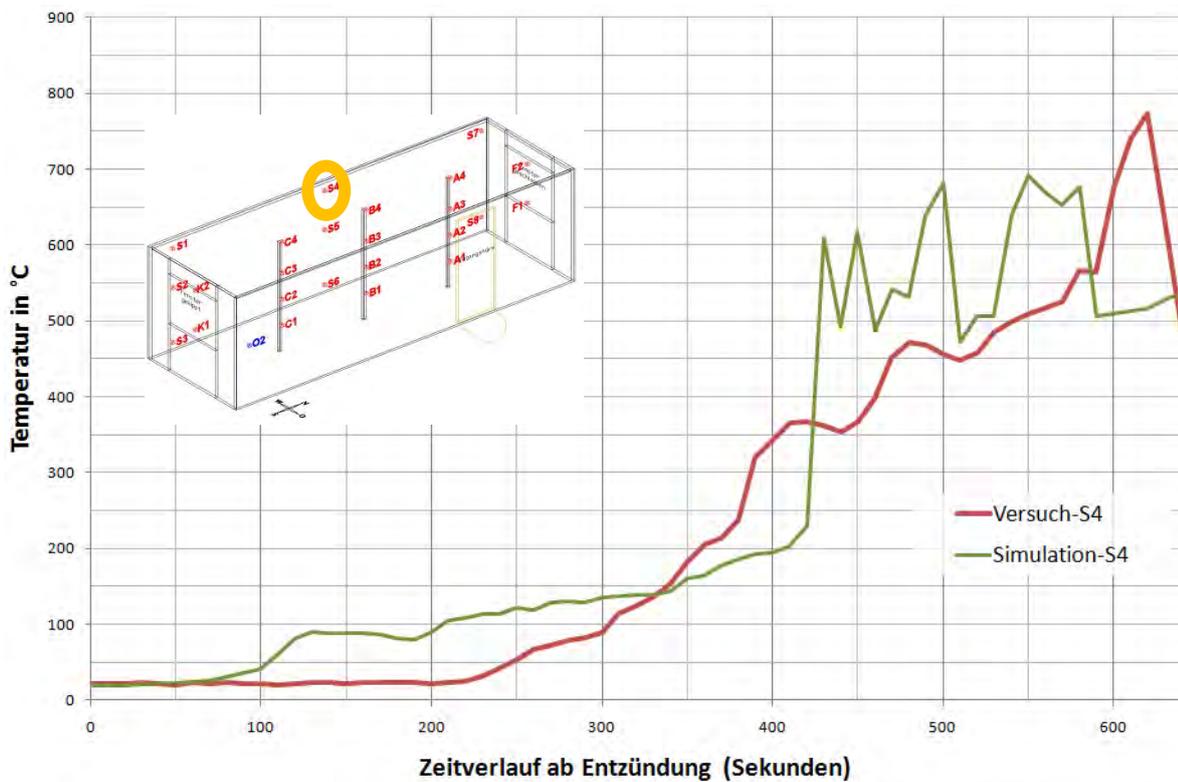
#### Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S2:



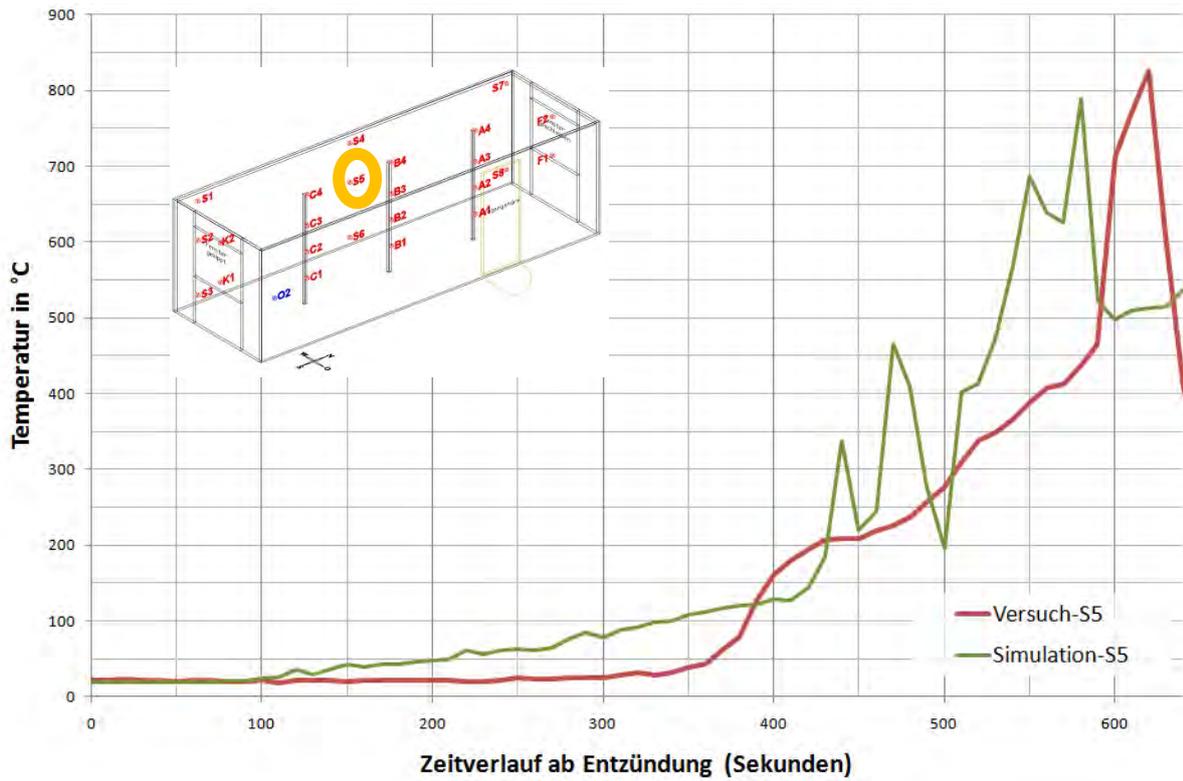
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S3:**



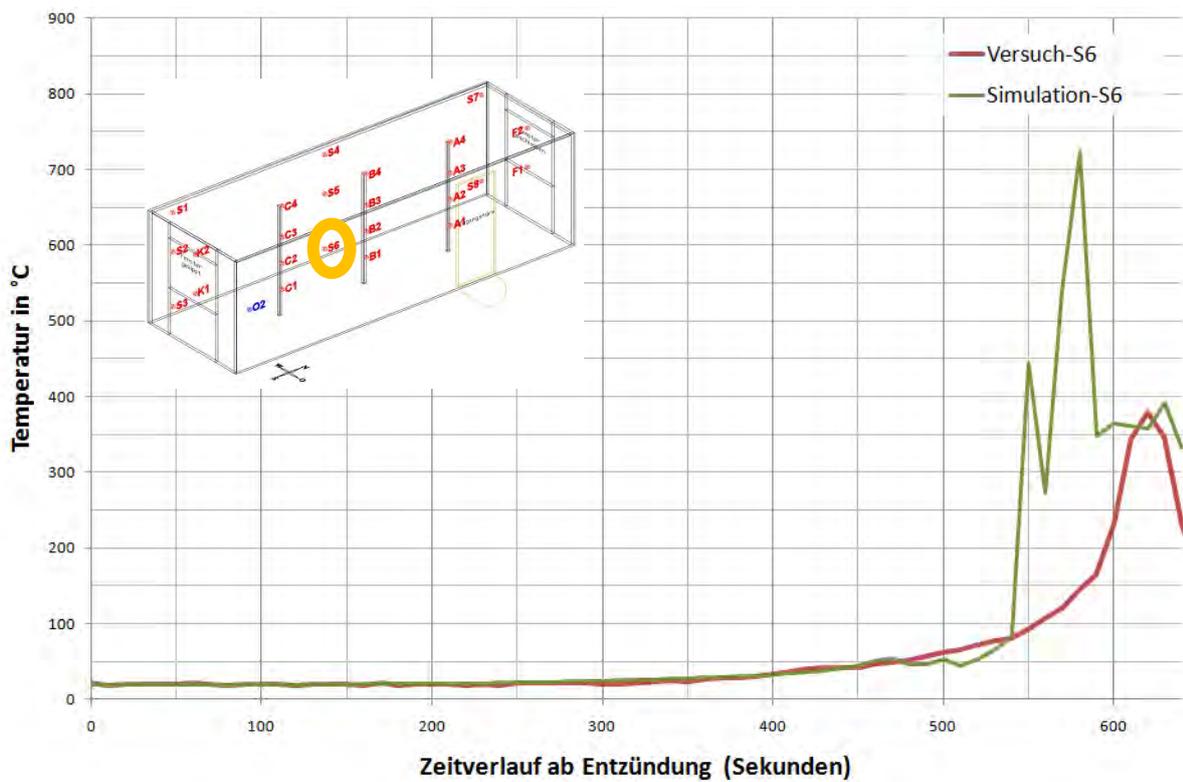
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S4:**



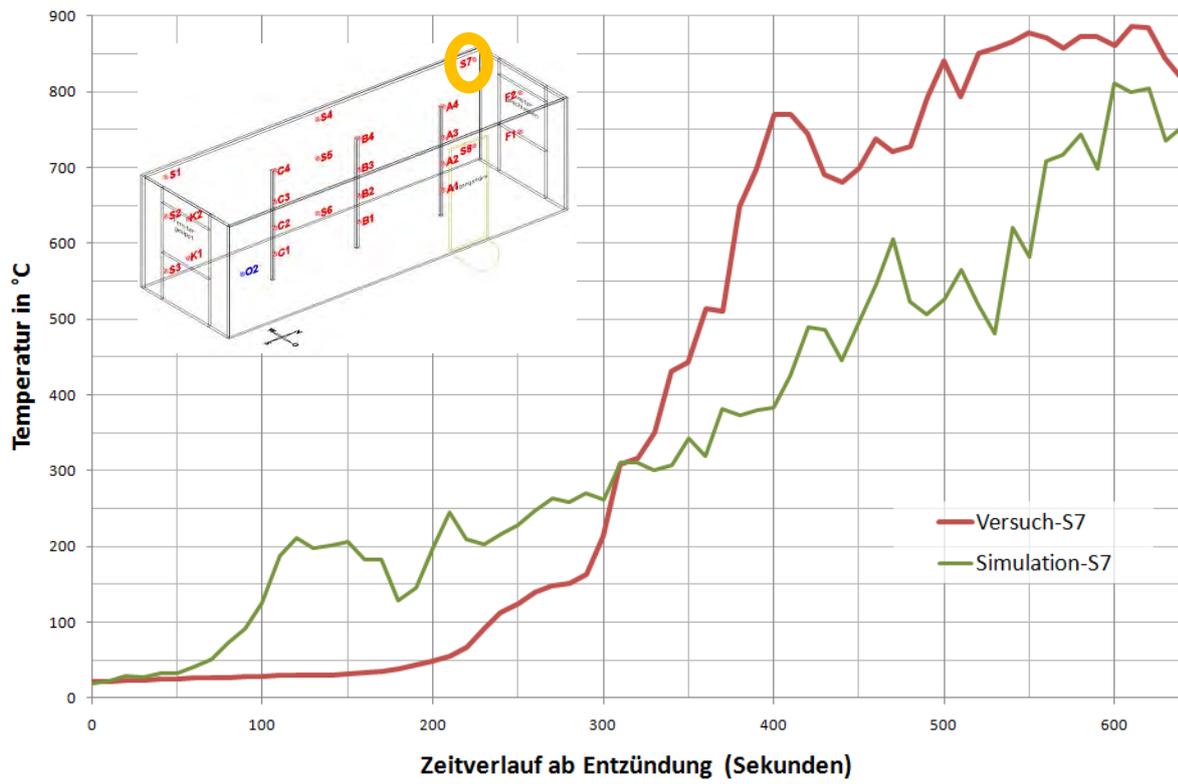
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S5:**



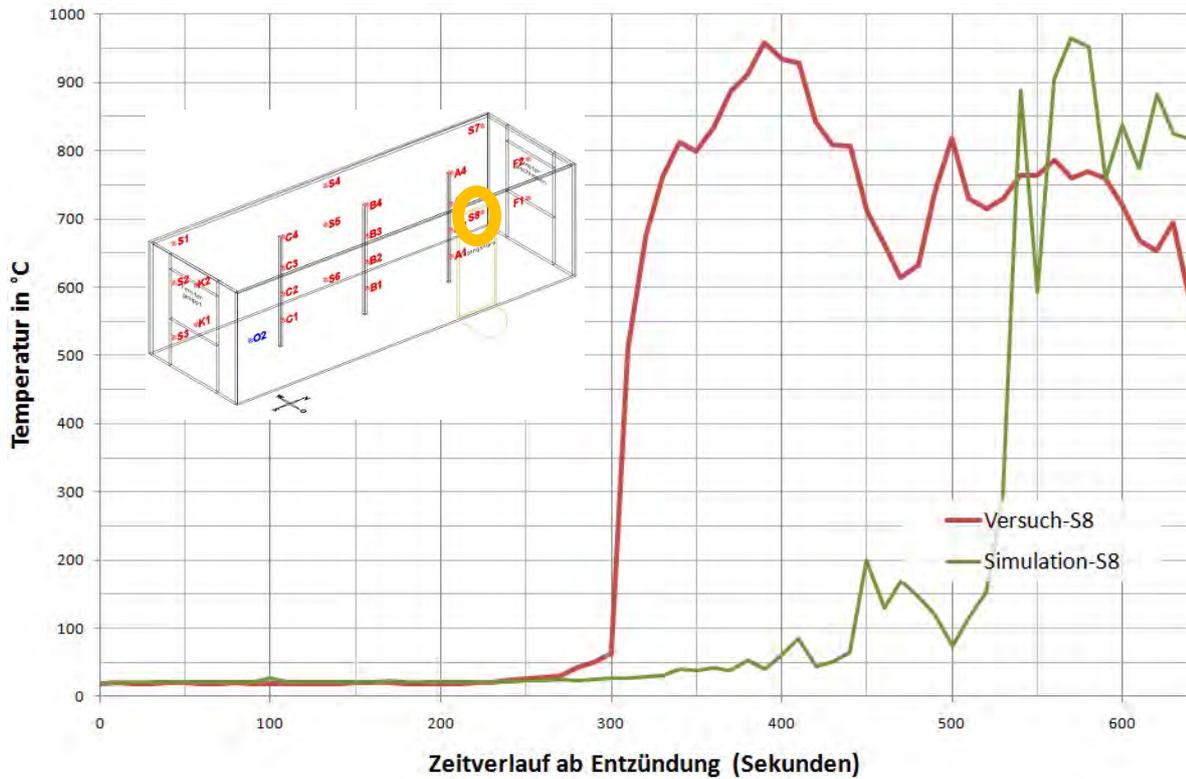
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S6:**



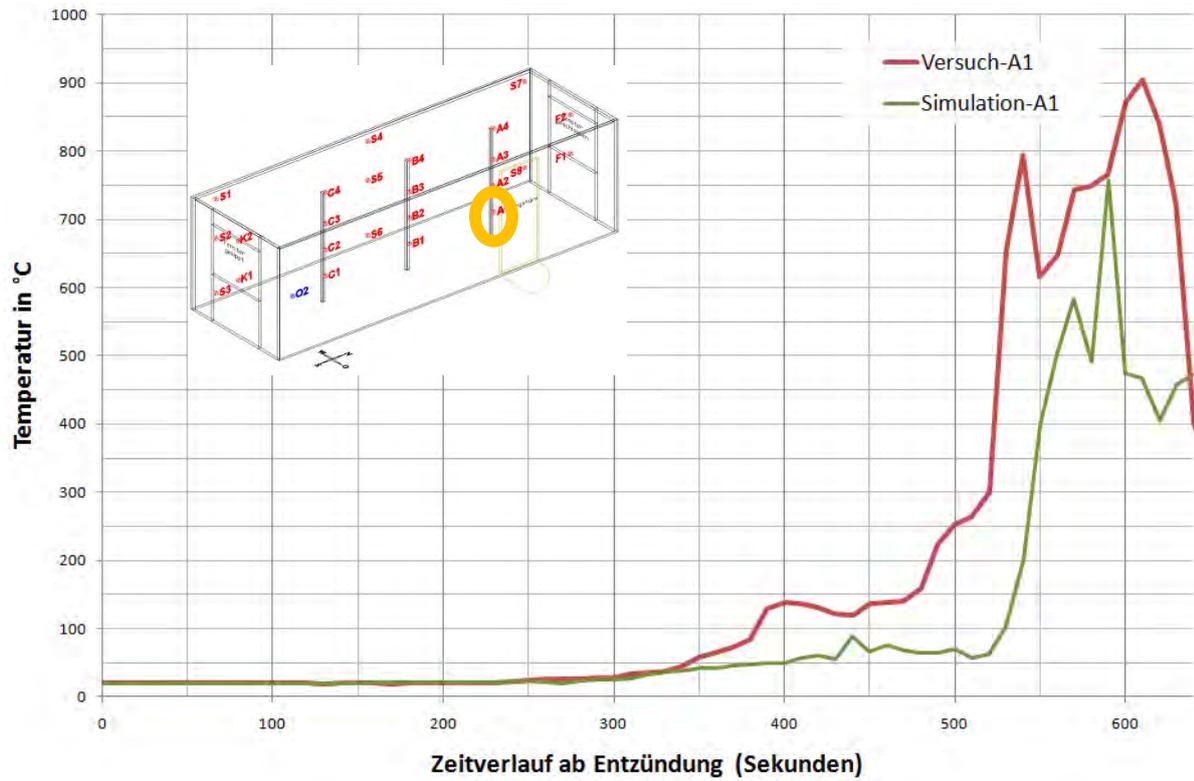
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S7:**



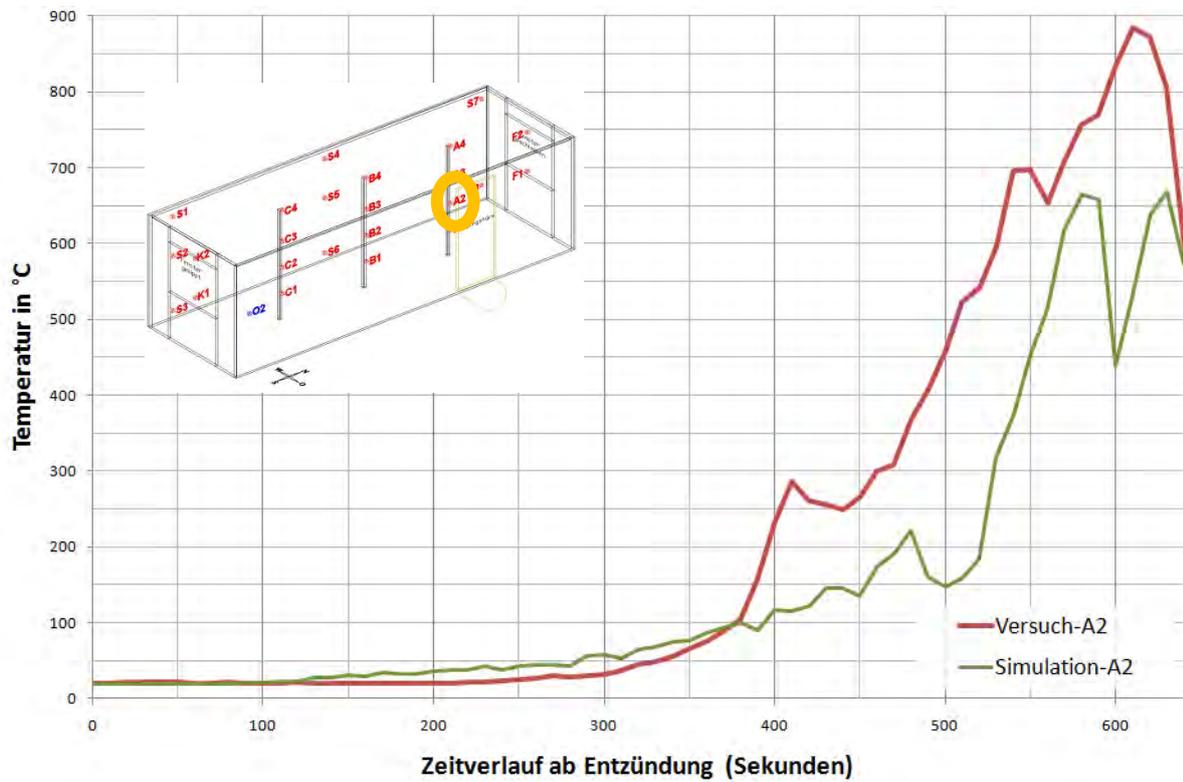
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt S8:**



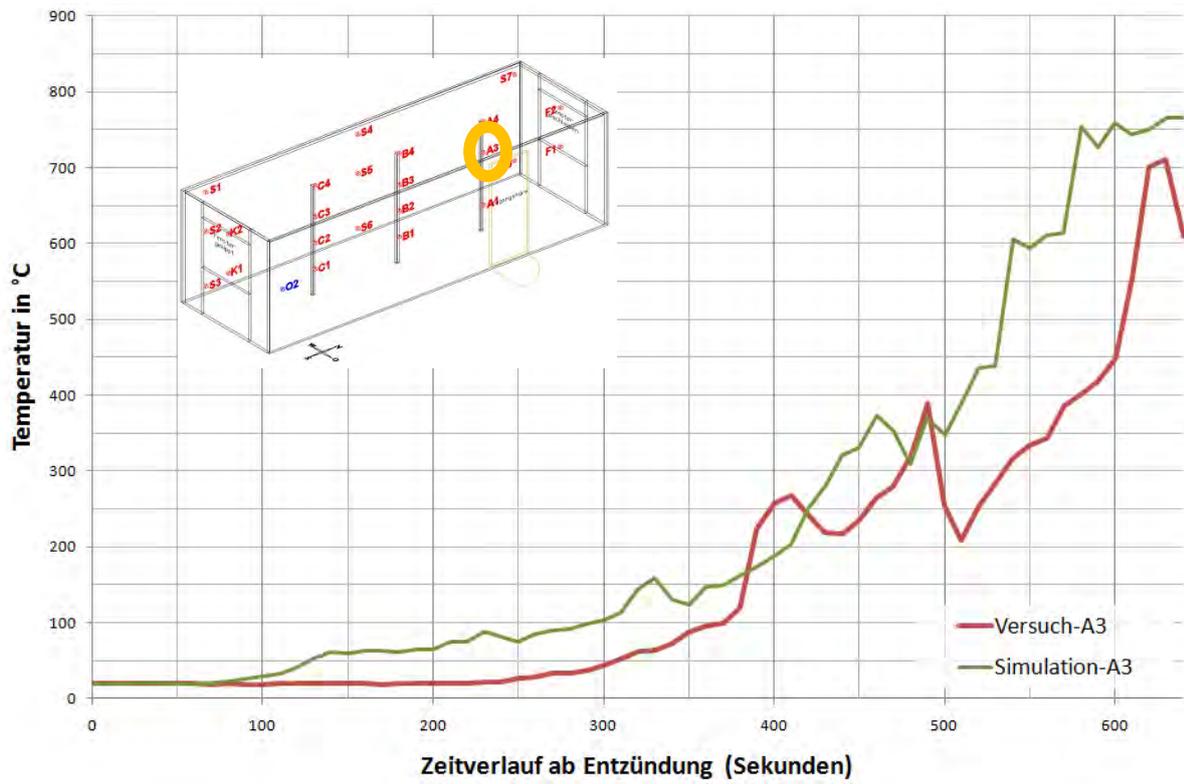
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt A1:**



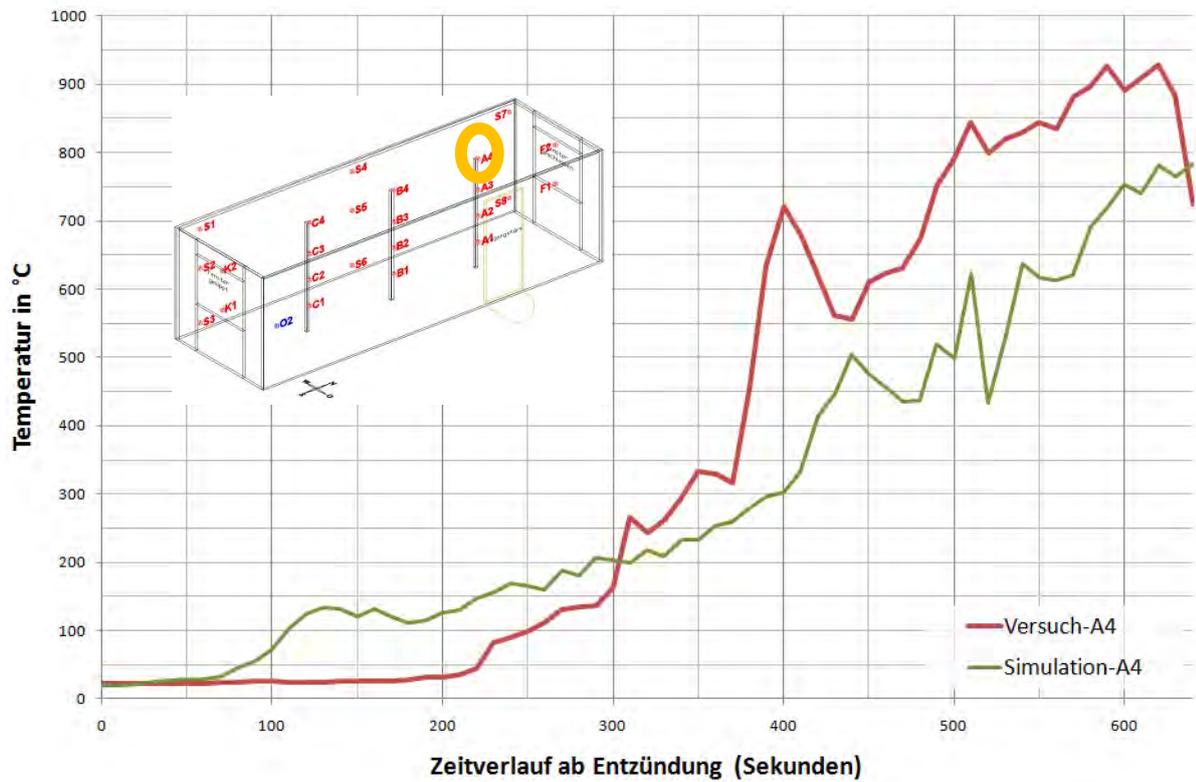
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt A2:**



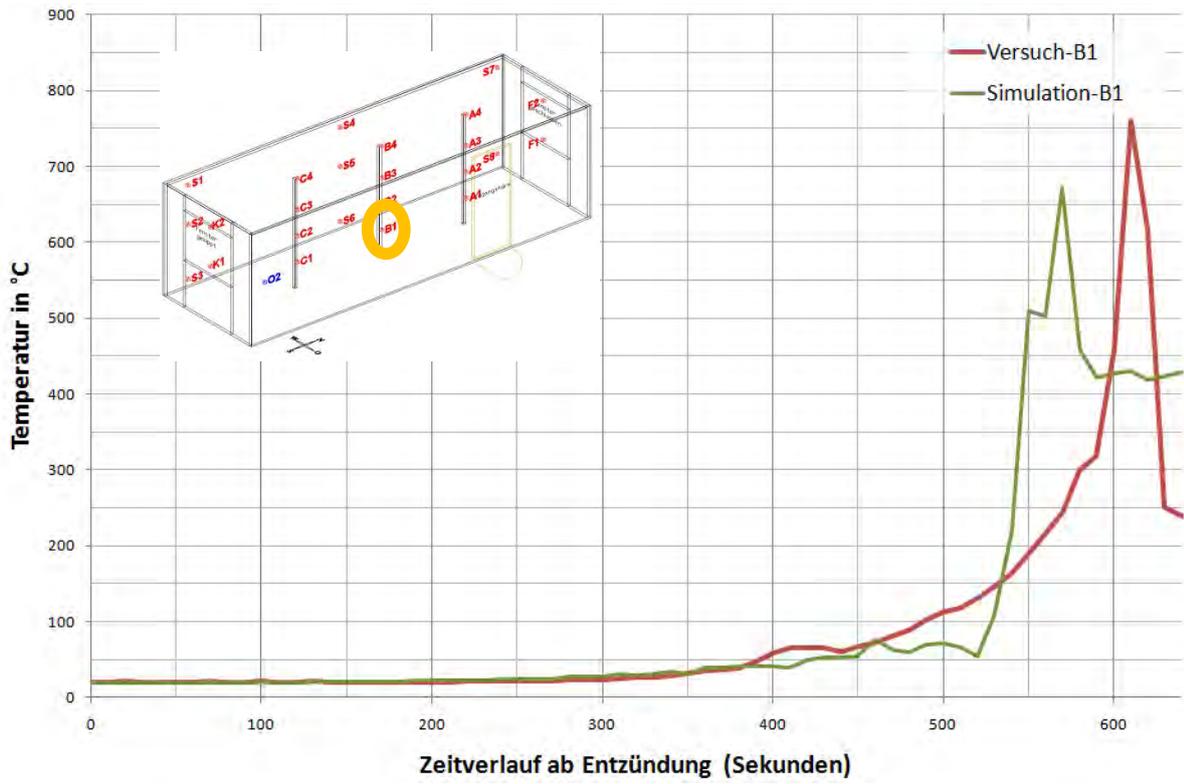
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt A3:**



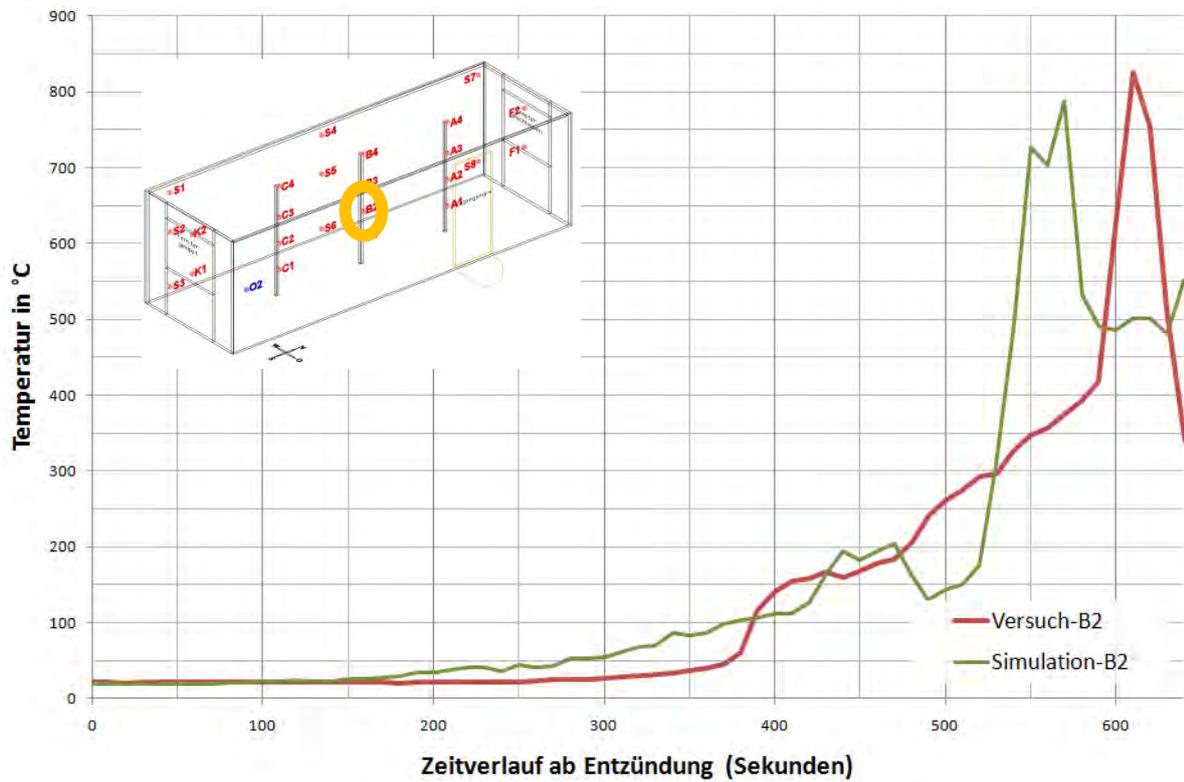
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt A4:**



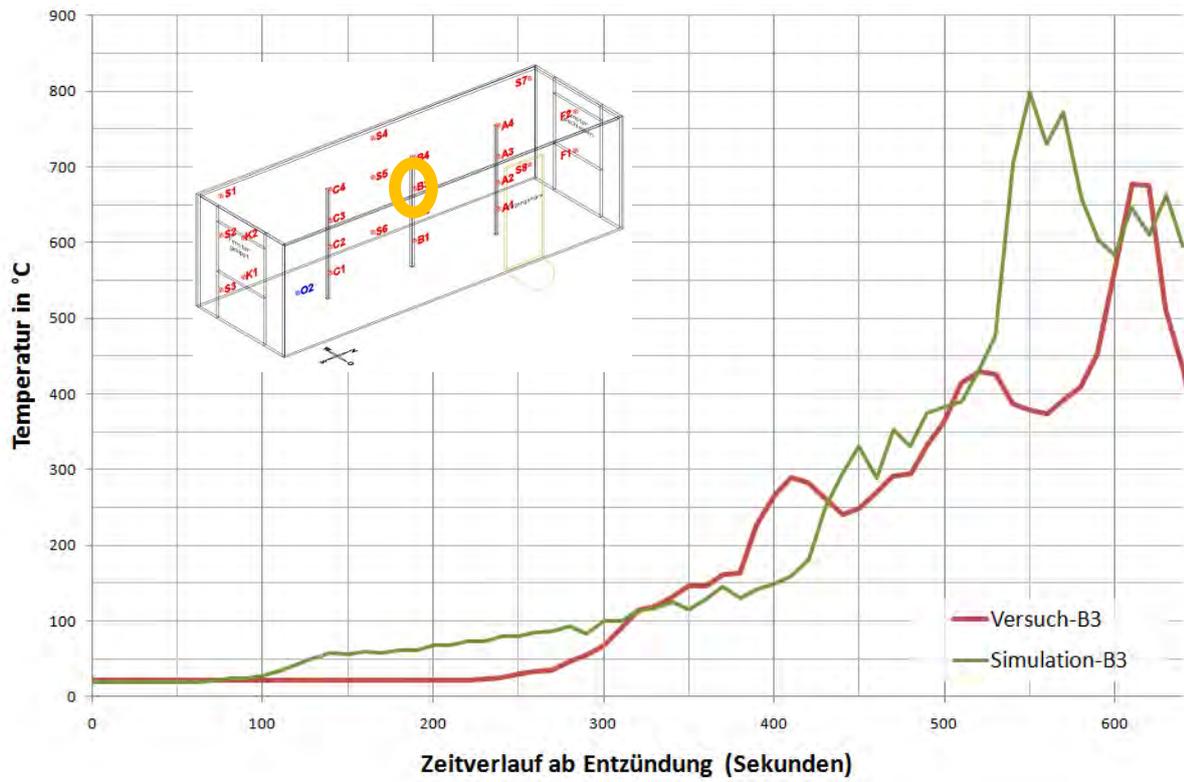
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt B1:**



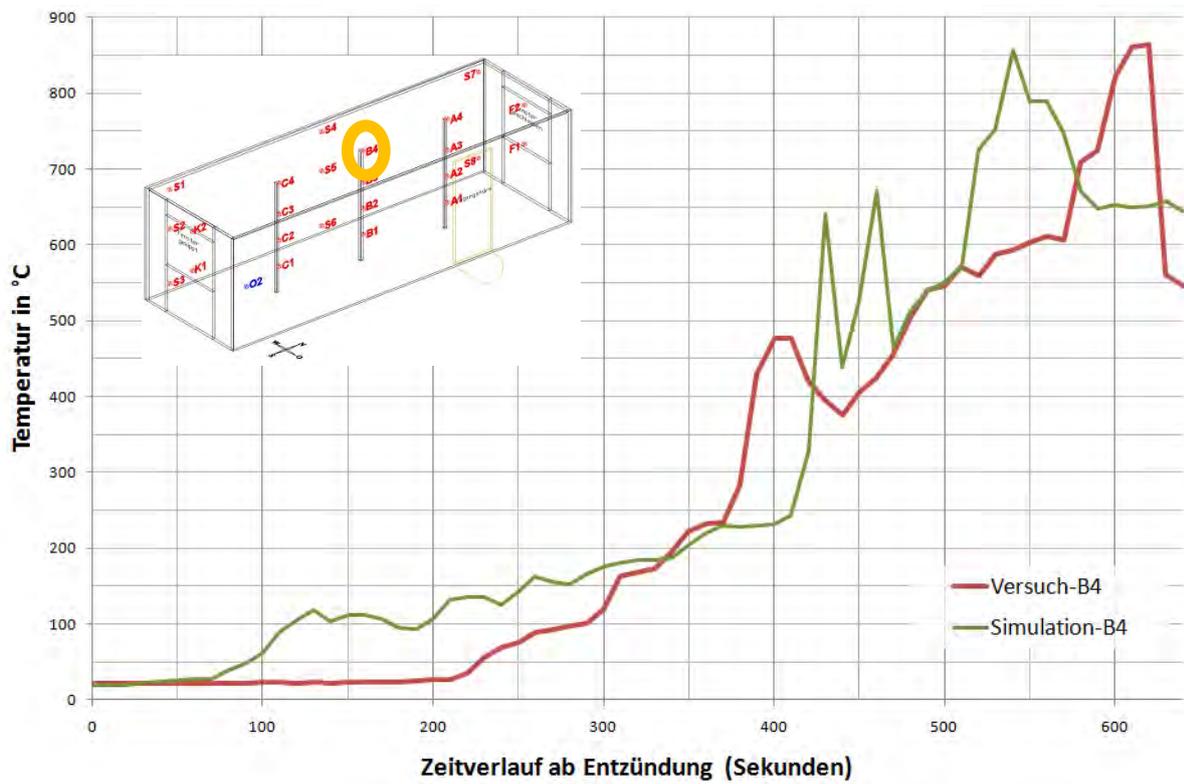
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt B2:**



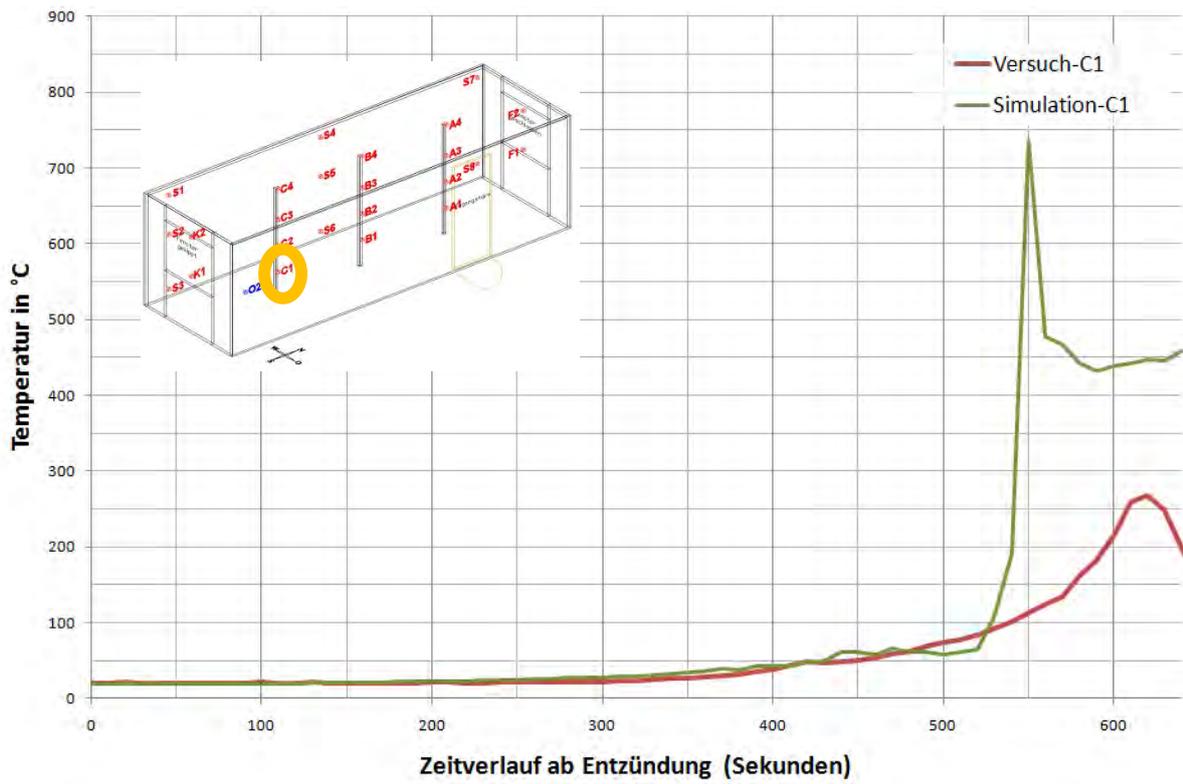
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt B3:**



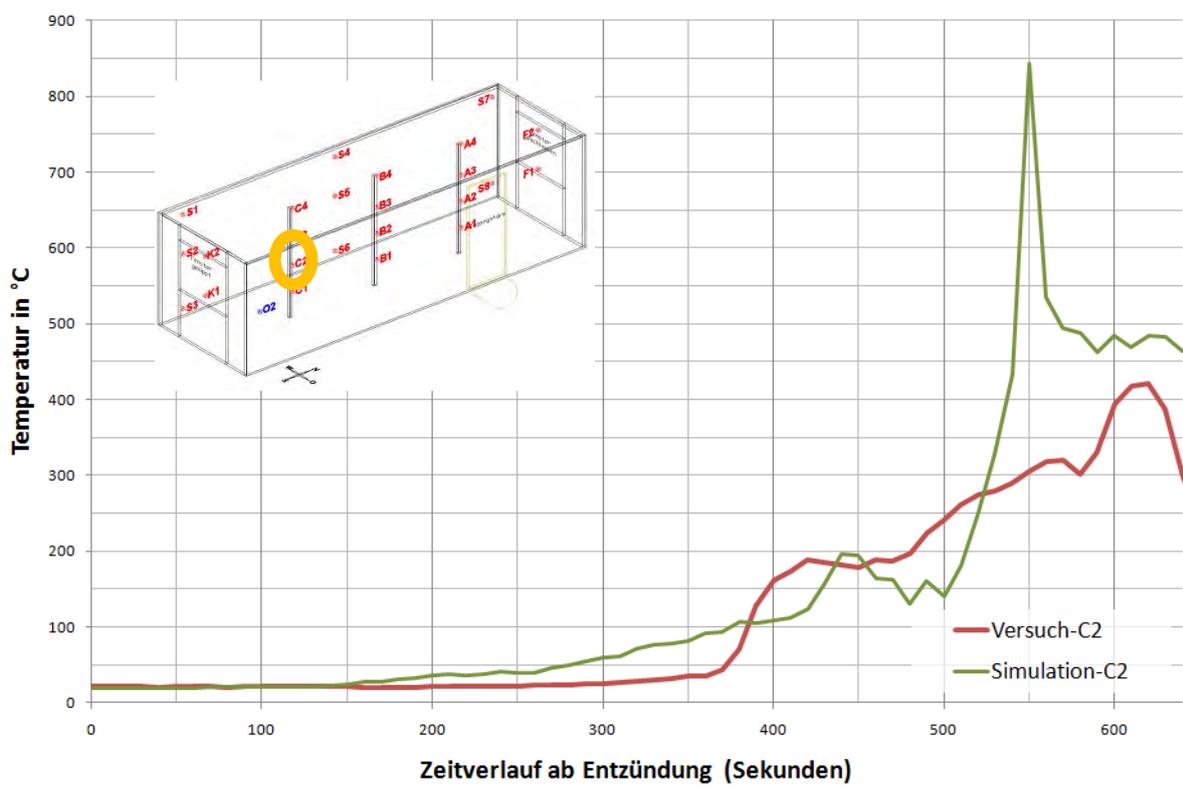
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt B4:**



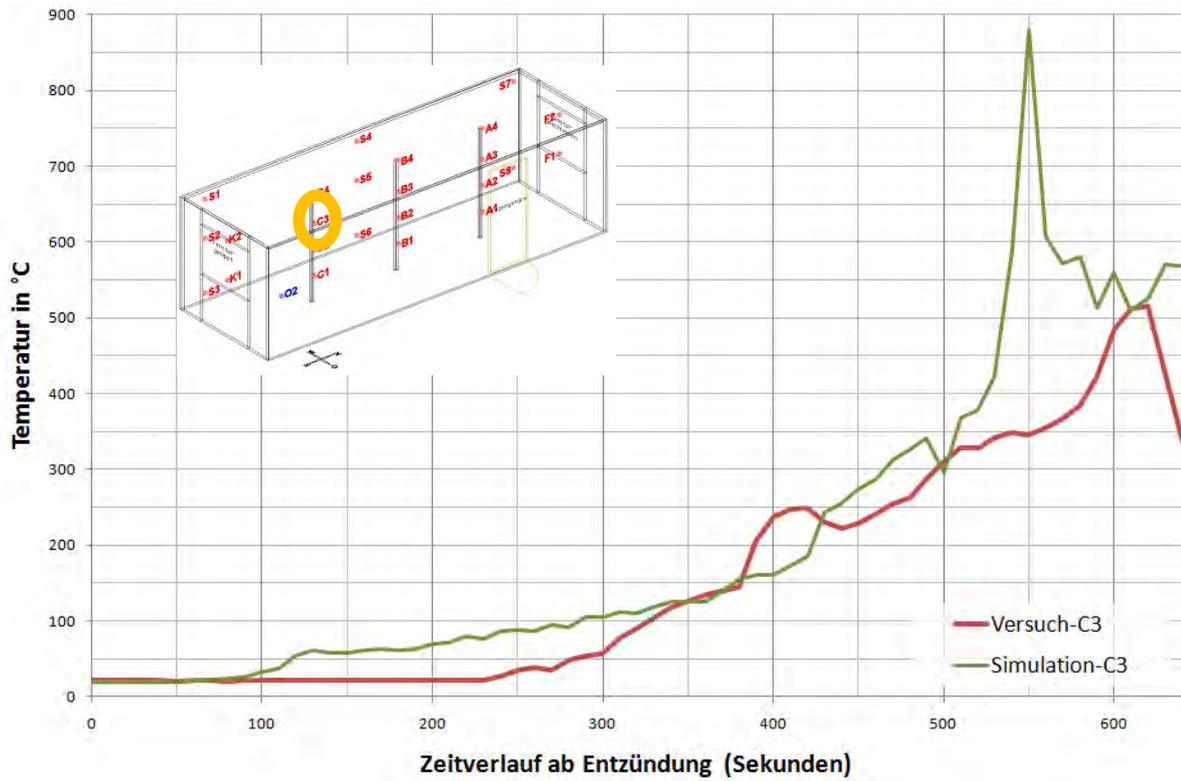
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt C1:**



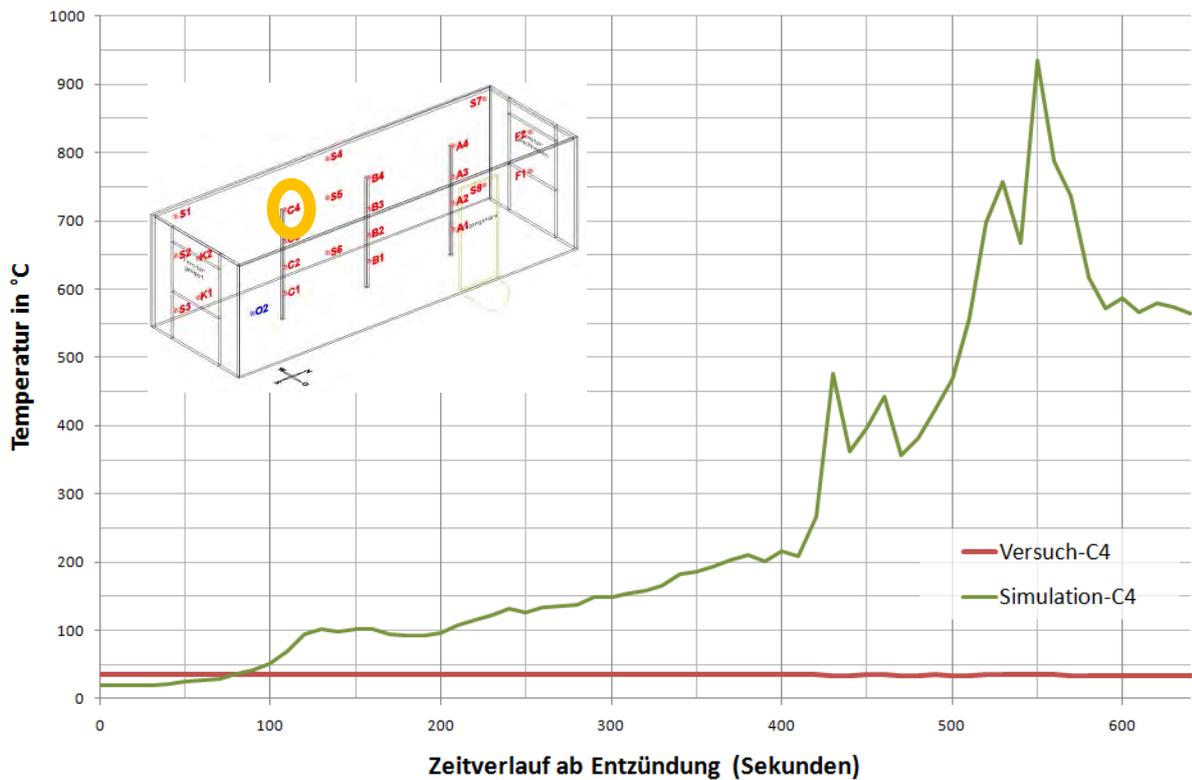
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt C2:**



**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt C3:**

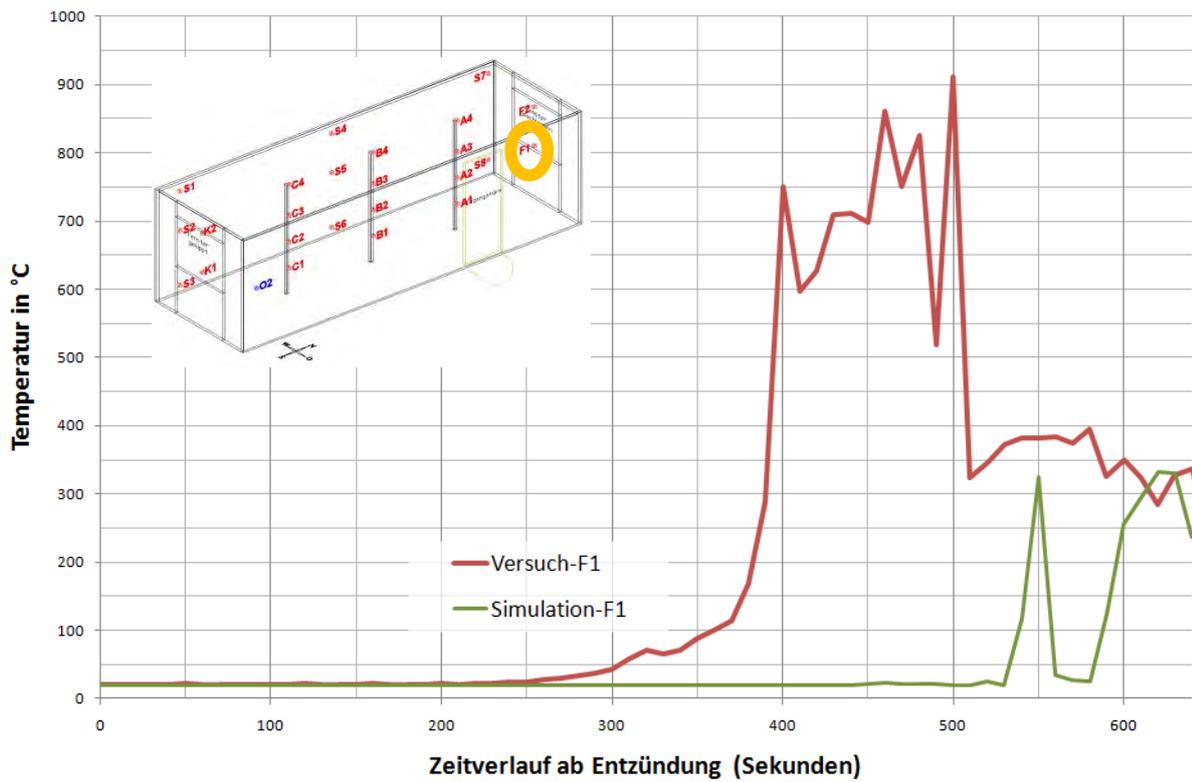


**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt C4:**

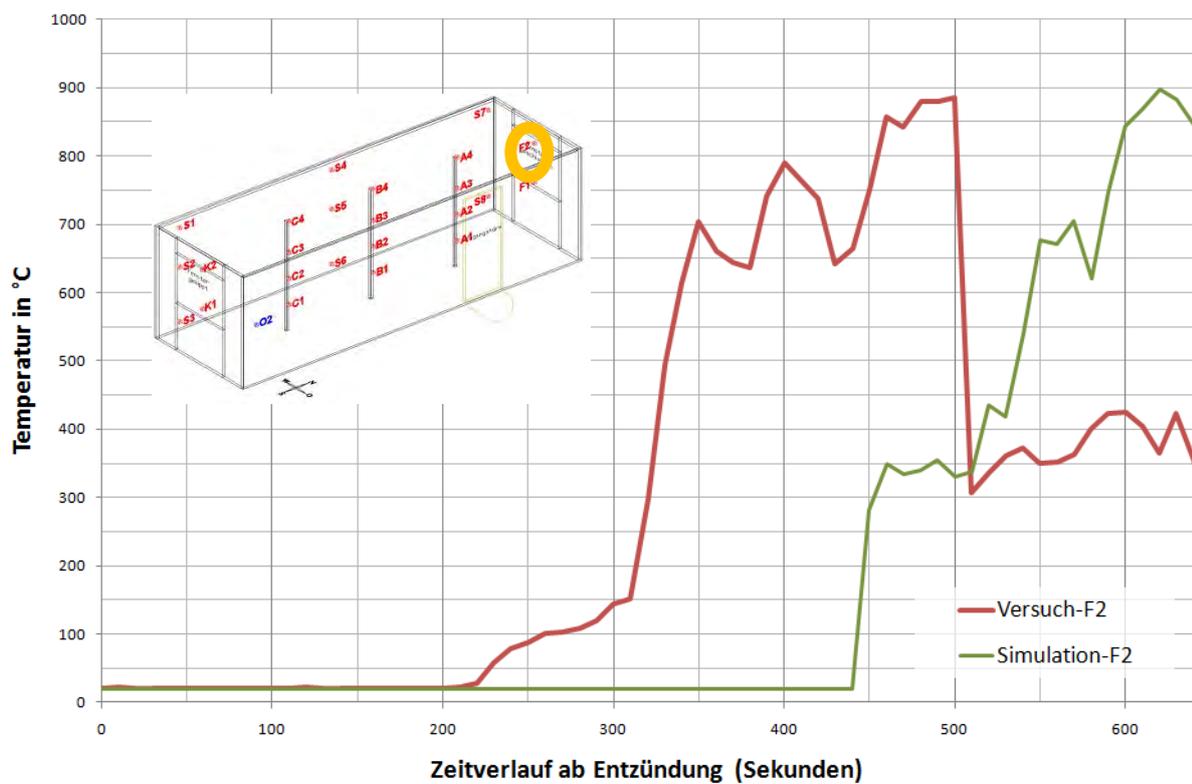


Anmerkung: Temperatursensor C4 ist vor dem Versuchsbeginn ausgefallen.

**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt F1:**

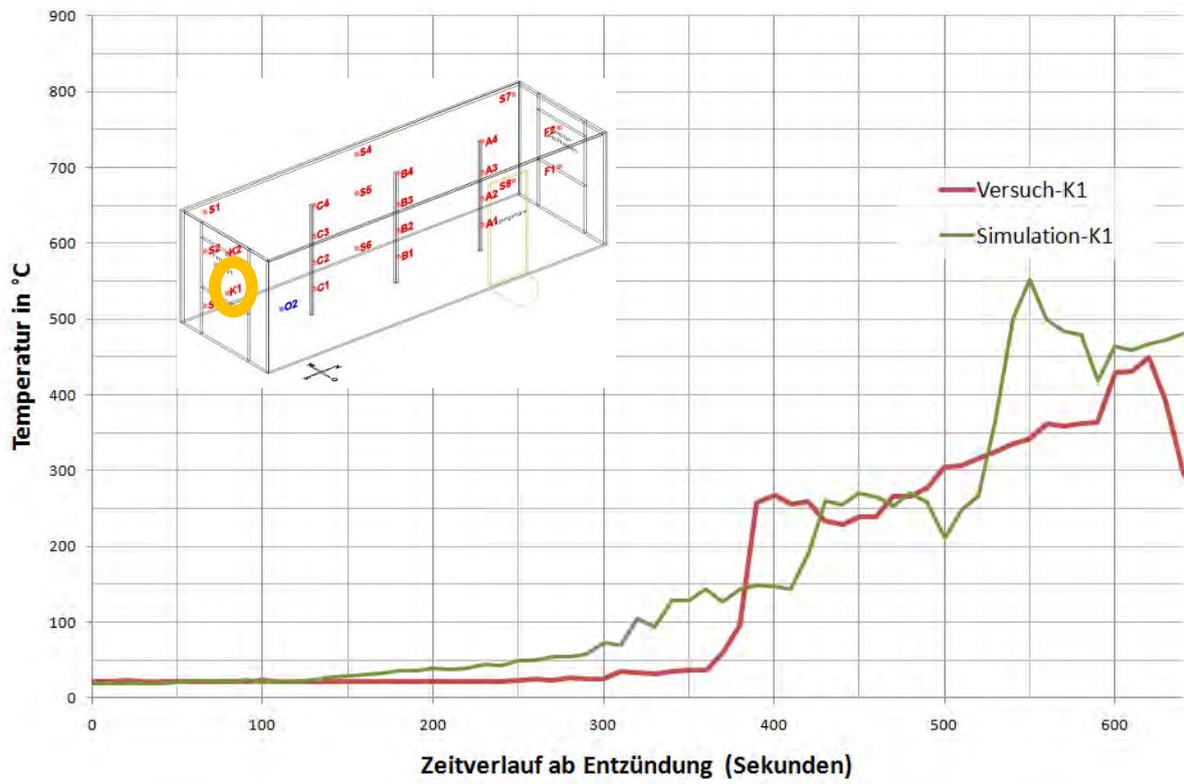


**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt F2:**

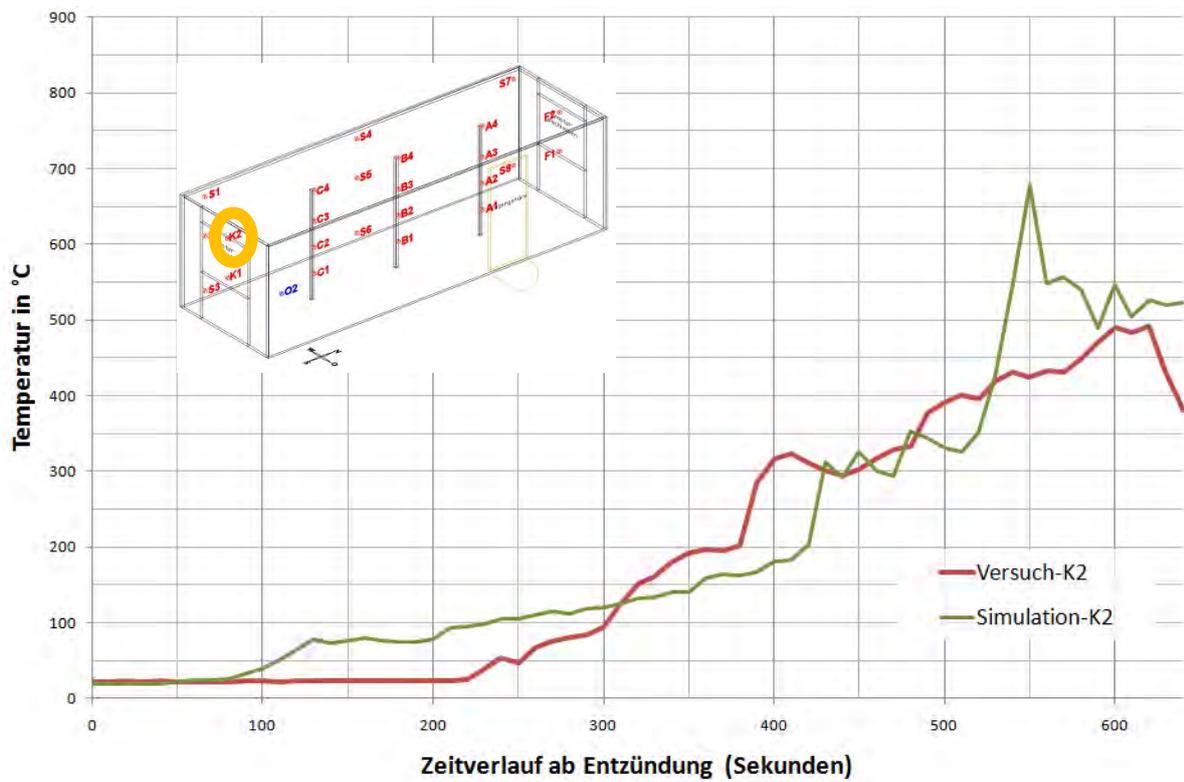


Anmerkung: Die Temperatureauswertung in der Simulation (grüne Kurven) beginnt erst ab dem Entfernen der nördlichen Fensterscheibe.

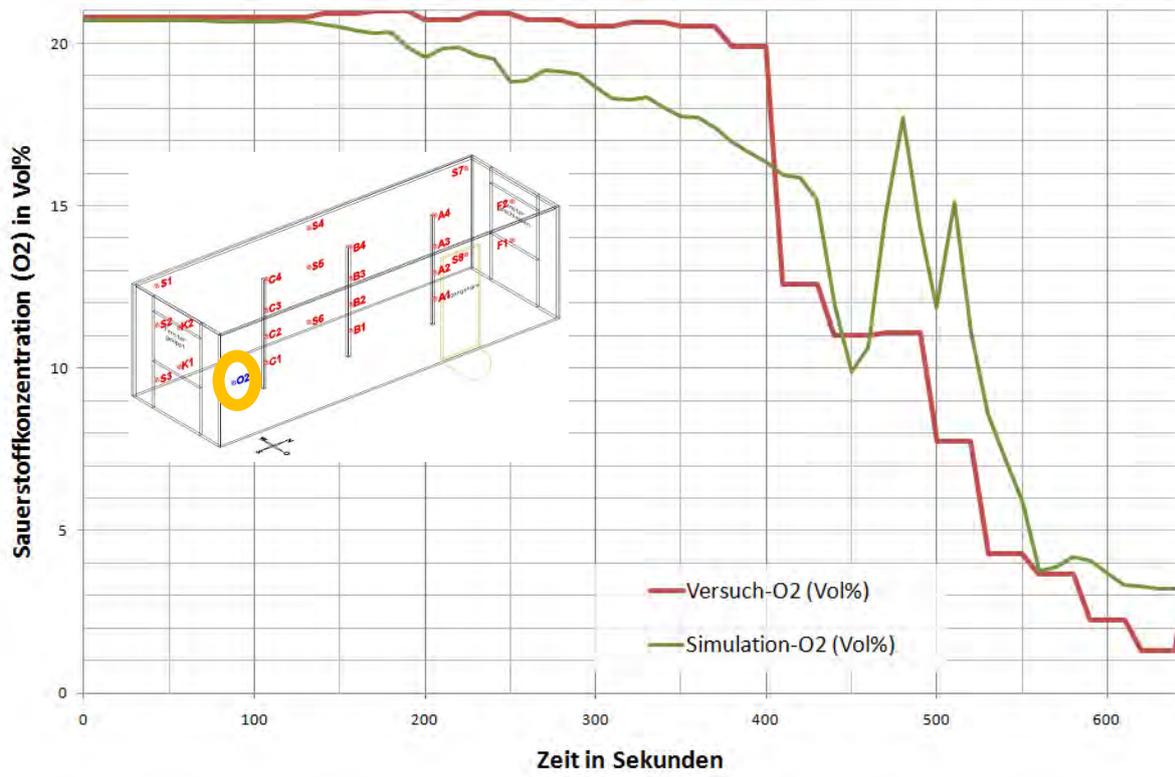
**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt K1:**



**Gegenüberstellung Temperaturmesspunkt K2:**



**Gegenüberstellung Sauerstoffmessung:**



**Anhang D: Fotodokumentation des Versuchsraumes vor dem Brand**





**Anhang E: Fotodokumentation des Brandversuches**

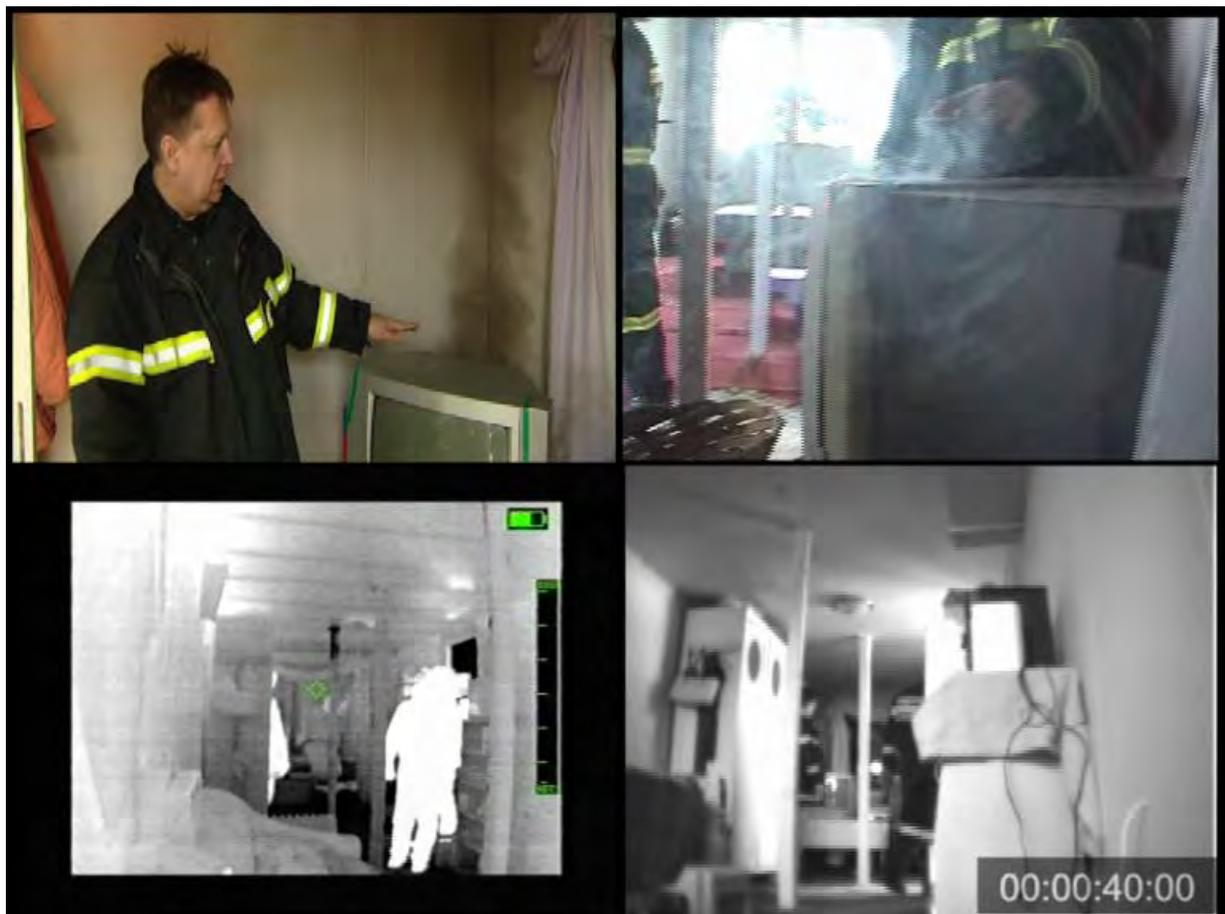


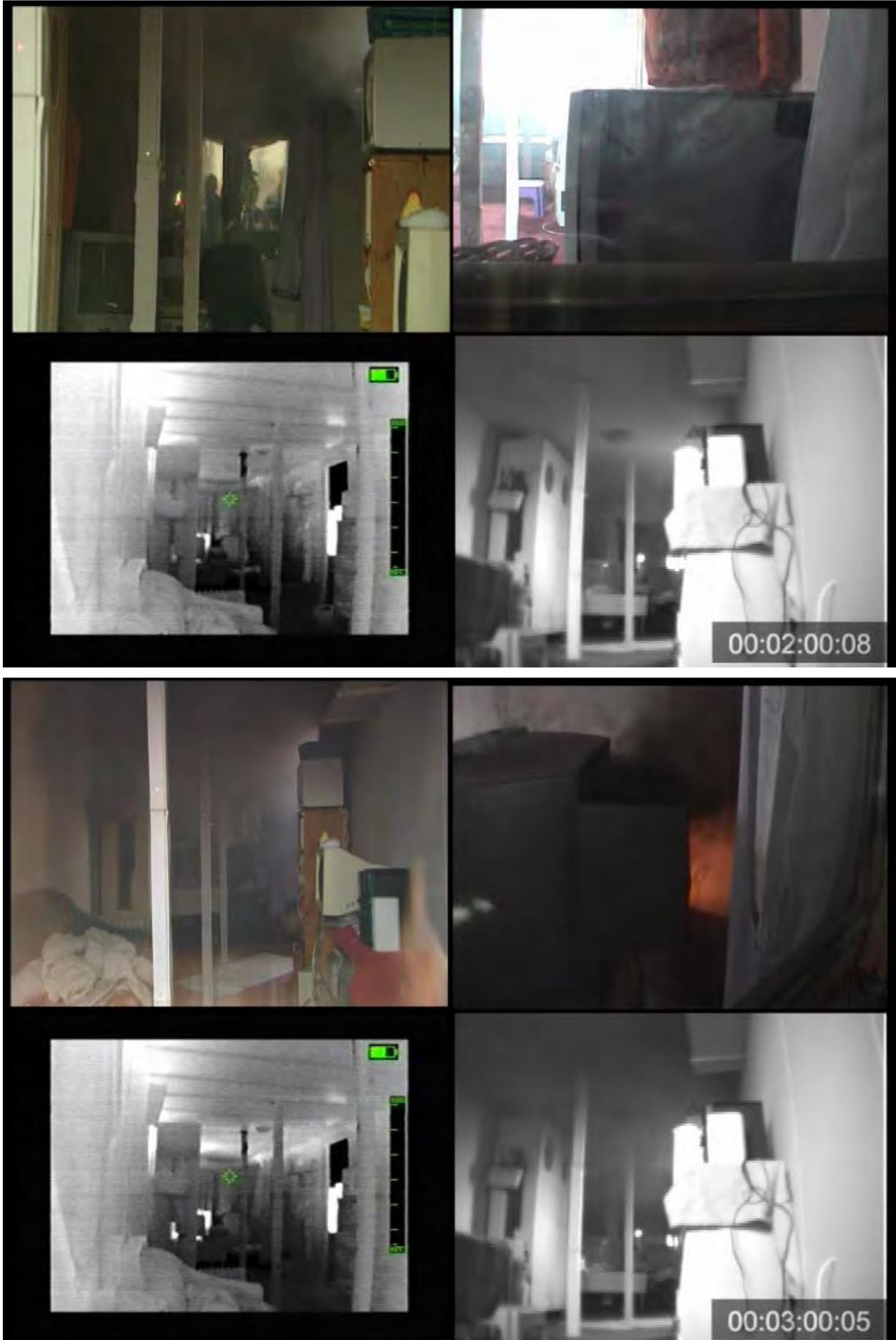


## Anhang F: Auszüge aus der Videodokumentation des Brandversuches

Der gegenständliche Anhang beinhaltet Screenshots aus der Videodokumentation des Brandversuches, wobei die Abbildungen aus folgenden Bildquellen stammen:

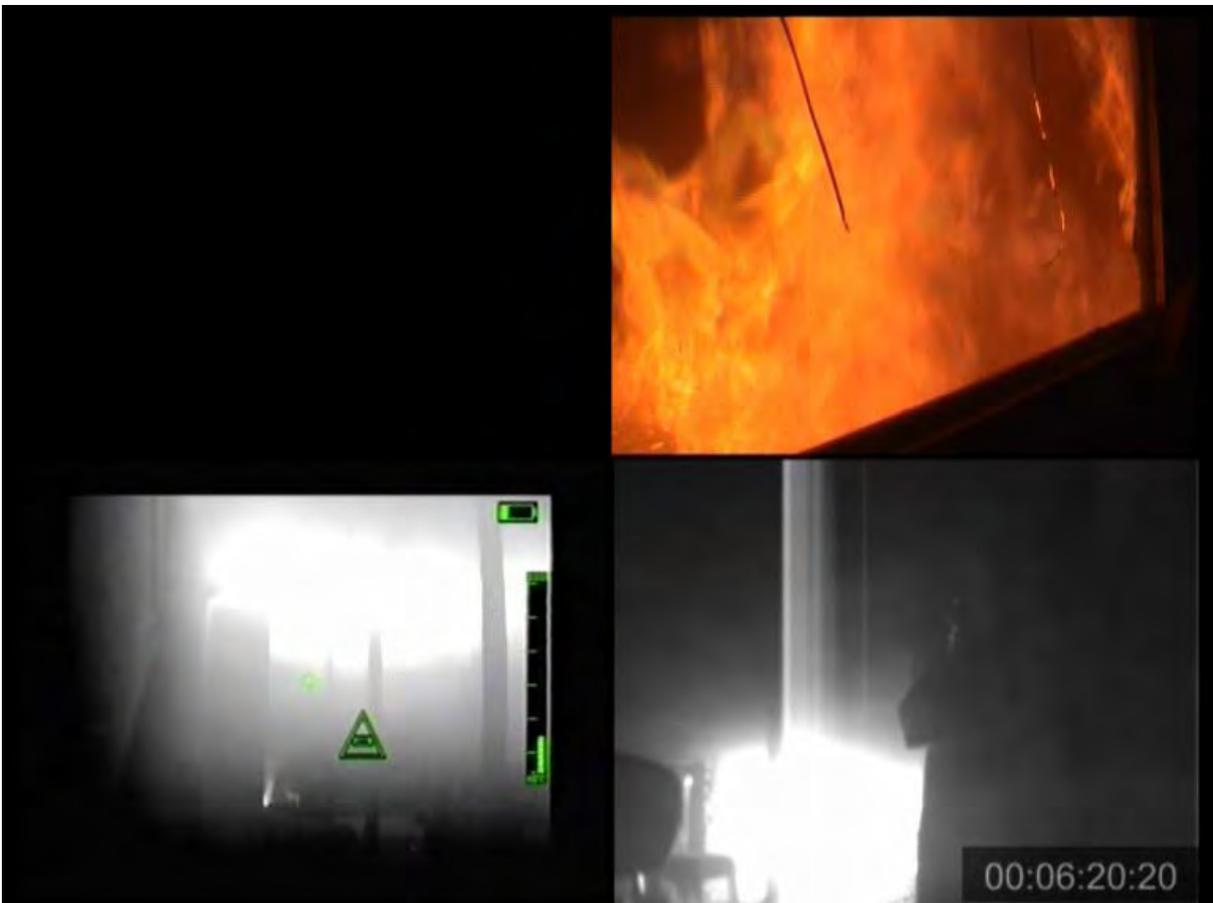
- **Links oben:** Mobile Kamera mit wechselnden Positionen
- **Rechts oben:** Kamera an der nördlichen Stirnseite mit Blickrichtung Brandraum, bzw. im weiteren Brandverlauf als mobile Kamera mit wechselnden Positionen.
- **Links unten:** Bild der Wärmebildkamera an der südlichen Stirnseite mit Blickrichtung Norden
- **Rechts unten:** Schwarzweißbild der „Opferkamera“ im Brandraum mit Blickrichtung Norden
- Im **rechten unteren Bereich** ist zusätzlich die Zeit (Format: hh:mm:ss:ms) angegeben welche ab dem Zeitpunkt der Zündung verstrichen ist.



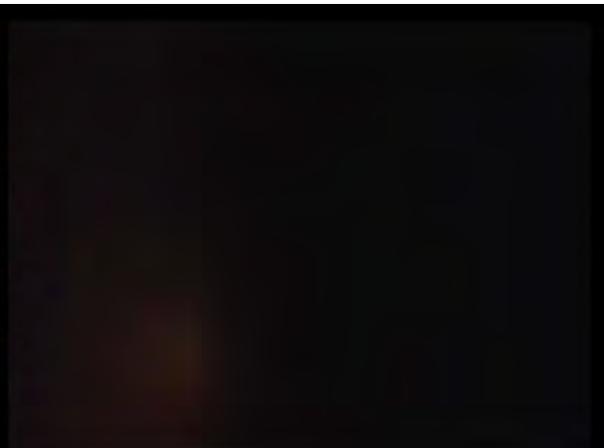


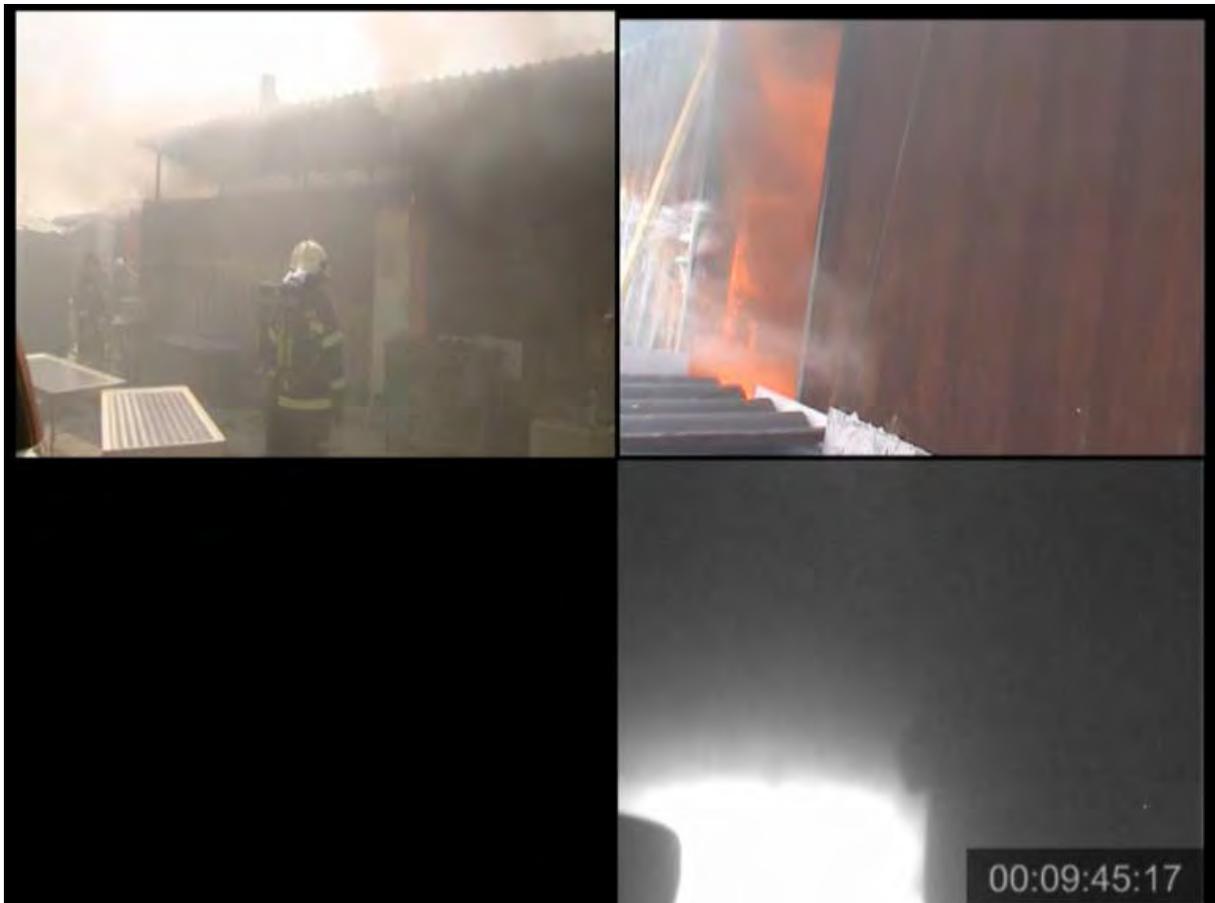
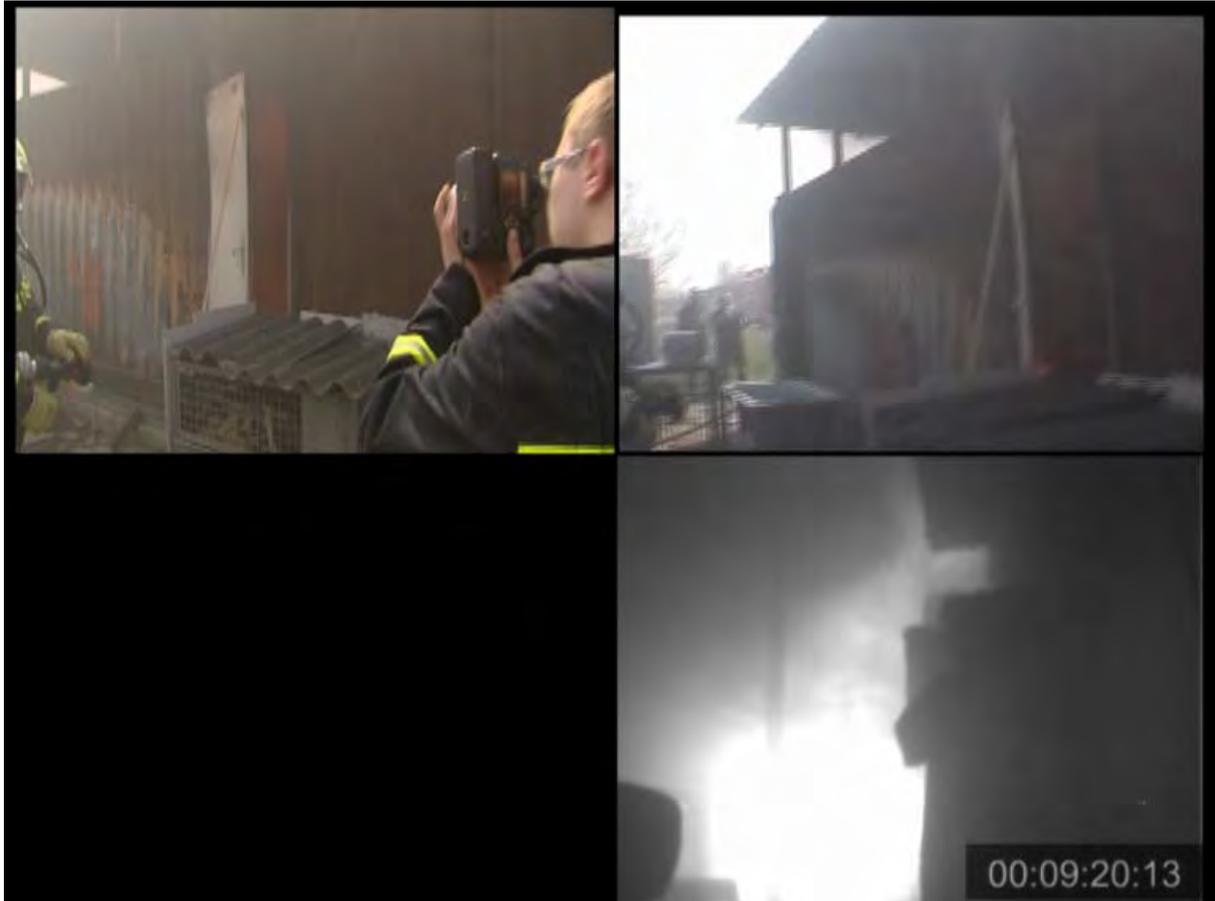


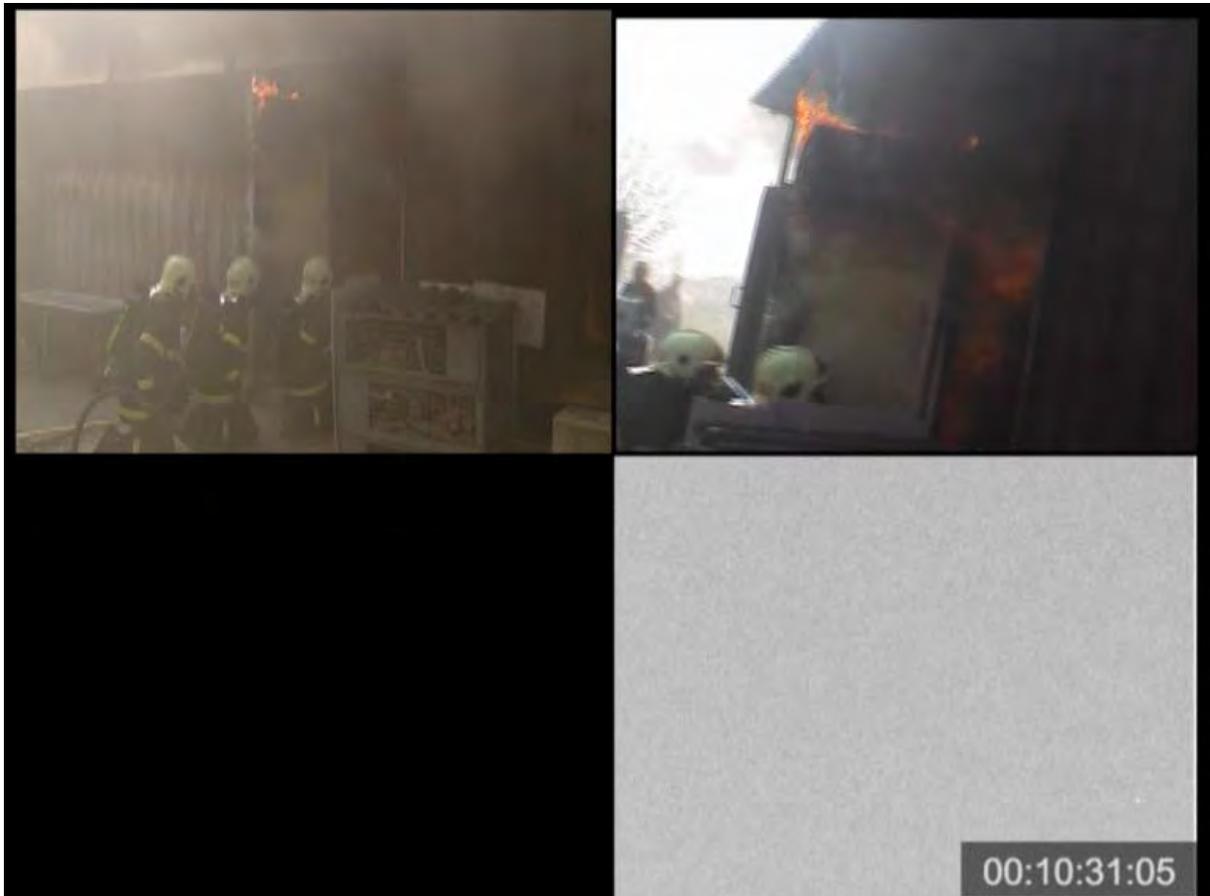


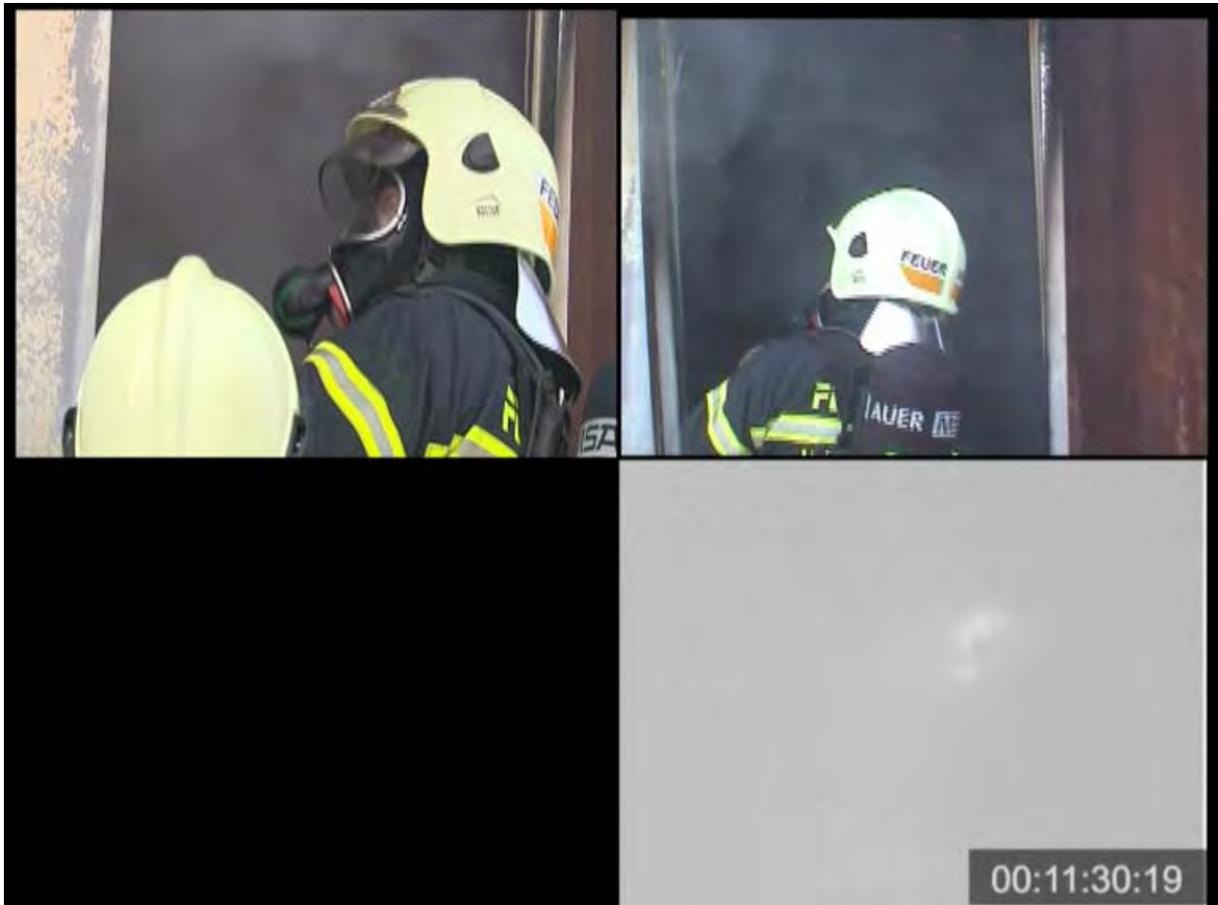












**Anhang G: Fotodokumentation der kalten Brandstelle**







## Anhang H: FDS-Eingangsparameter der Brandsimulation Nr. 14

Dieser Anhang beinhaltet die FDS Eingangsparameter (\*.fds Datei) der Brandsimulation Nr. 14:

```

&HEAD CHID='Brandversuch', TITLE='FSM Masterthese Brandversuch' /
&TIME T_END=1800. /
&DUMP NFRAMES=1800 /

&MESH IJK=69,47,64 XB=-0.50,2.950,0.50,1.850,-0.050,3.15 /
&MESH IJK=69,37,64 XB=-0.50,2.950,1.800,3.650,-0.050,3.15 /
&MESH IJK=69,37,64 XB=-0.50,2.950,3.600,5.450,-0.050,3.15 /
&MESH IJK=69,47,64 XB=-0.50,2.950,5.400,7.750,-0.050,3.15 /

&REAC ID = 'POLYURETHANE'
FYI = 'C_6,3 H_7,1 N_O_2,1, NFPA Handbook, Babrauskas'
SOOT_YIELD = 0.10
N = 1.0
C = 6.3
H = 7.1
O = 2.1 /

&PART ID='smoke', MASSLESS=.TRUE., SAMPLING_FACTOR=1 /

.....Primärbrand Fernseher
&SURF ID='BURNER', HRRPUA=2000.0, RAMP_Q='fireramp', PART_ID='smoke' /
&RAMP ID='fireramp', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='fireramp', T= 180, F= 0.05/
&RAMP ID='fireramp', T= 200, F= 0.4/
&RAMP ID='fireramp', T= 300, F= 0.6/
&RAMP ID='fireramp', T= 450, F= 1/
&RAMP ID='fireramp', T= 600, F= 0.48/
&RAMP ID='fireramp', T= 1080, F= 0.28/
&RAMP ID='fireramp', T= 1600, F= 0.18/
&RAMP ID='fireramp', T= 2700, F= 0.0/
&VENT XB= 0.350,0.850,6.700,6.950,0.700,0.700, SURF_ID='BURNER' /

.....Sekundärbrand Abtropfen (Boden)
&SURF ID='BURNER2', HRRPUA=500.0, RAMP_Q='fireramp2', PART_ID='smoke' /
&RAMP ID='fireramp2', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='fireramp2', T= 260, F= 0.05/
&RAMP ID='fireramp2', T= 290, F= 0.1/
&RAMP ID='fireramp2', T= 360, F= 1/
&RAMP ID='fireramp2', T= 600, F= .5/
&RAMP ID='fireramp2', T= 700, F= 0.0/
&VENT XB= 0.350,0.850,6.700,6.950,0.000,0.000, SURF_ID='BURNER2' /

.....Glas Beginn
&SURF ID = 'GLAZING', RGB = 170,170,255, TRANSPARENCY=0.6 /
.....Glas Ende

.....Blech Beginn
&SURF ID = 'SHEET METAL'
MATL_ID = 'STEEL'
COLOR = 'SILVER'
THICKNESS = 0.001 /

&MATL ID = 'STEEL'
FYI = 'Quintiere, Fire Behavior'
EMISSION = 0.8
DENSITY = 7850.
CONDUCTIVITY = 45.8
SPECIFIC_HEAT = 0.46 /
.....Blech Ende

.....Polstermöbel Beginn
&SURF ID = 'UPHOLSTERY'
FYI = 'Properties completely fabricated'
COLOR = 'PURPLE'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
THICKNESS(1:2) = 0.002,0.1
PART_ID = 'smoke' /

&MATL ID = 'FABRIC'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY = 0.1
DENSITY = 100.0
N_REACTIONS = 1
NU_FUEL = 1.
REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
HEAT_OF_REACTION = 3000.
HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /

&MATL ID = 'FOAM'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY = 0.05
DENSITY = 40.0
N_REACTIONS = 1
NU_FUEL = 1.

REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
HEAT_OF_REACTION = 1500.
HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /

.....Vorhang Beginn
&SURF ID = 'VORHANG'
FYI = 'Properties completely fabricated'
COLOR = 'PALE VIOLET RED'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID = 'VORHANGSTOFF'
THICKNESS = 0.005
PART_ID = 'smoke' /

&MATL ID = 'VORHANGSTOFF'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY = 0.1
DENSITY = 100.0
N_REACTIONS = 1
NU_FUEL = 1.
REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
HEAT_OF_REACTION = 3000.
HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /
.....Vorhang Ende

.....Jacke Beginn
&SURF ID = 'JACKE'
FYI = 'Properties completely fabricated'
COLOR = 'VIOLET'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID = 'GEWANDSTOFF'
THICKNESS = 0.05
PART_ID = 'smoke' /

&MATL ID = 'GEWANDSTOFF'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY = 0.1
DENSITY = 100.0
N_REACTIONS = 1
NU_FUEL = 1.
REFERENCE_TEMPERATURE = 350.
HEAT_OF_REACTION = 3000.
HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /
.....Jacke Ende

.....Kunststoff Beginn
&SURF ID = 'KUNSTSTOFF'
MATL_ID='KUNSTSTOFF'
COLOR='ORANGE'
HRRPUA=1000
BURN_AWAY=.TRUE.
IGNITION_TEMPERATURE=250.
THICKNESS=0.05/

&MATL ID='KUNSTSTOFF'
SPECIFIC_HEAT=0.88
CONDUCTIVITY=0.1900
DENSITY=100/
.....Kunststoff Ende

.....Papier Beginn
&SURF ID = 'PAPIER'
MATL_ID = 'PAPIER_CELLULOSE'
THICKNESS = 0.05
BURN_AWAY = .TRUE.
COLOR = 'BEIGE' /

&MATL ID = 'PAPIER_CELLULOSE'
DENSITY = 1550.
SPECIFIC_HEAT = 1.33
CONDUCTIVITY = 0.06
N_REACTIONS = 1
HEAT_OF_REACTION = 3600.
A = 6.79E9
E = 1.4E5
NU_FUEL = 0.1
NU_RESIDUE = 0.9
RESIDUE = 'PAPIER_KOEHLE' /

&MATL ID = 'PAPIER_KOEHLE'
DENSITY = 120.
SPECIFIC_HEAT_RAMP = 'c_char_3'
CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_char_3' /

&RAMP ID = 'c_char_3', T = 20., F = 0.68 /
&RAMP ID = 'k_char_3', T = 400., F = 1.5 /

```

```

&RAMP ID = 'c_char_3', T = 900., F = 1.8 /

&RAMP ID = 'k_char_3', T = 20., F = 0.077 /
&RAMP ID = 'k_char_3', T = 900., F = 0.16 /
.....Papier Ende

.....Teppich Beginn
&SURF ID = 'CARPET'
  MATL_ID = 'CARPET PILE'
  COLOR = 'KHAKI'
  BURN_AWAY = .TRUE.
  BACKING = 'INSULATED'
  THICKNESS = 0.006 /

&MATL ID = 'CARPET PILE'
  FYI = 'Completely made up'
  CONDUCTIVITY = 0.16
  SPECIFIC_HEAT = 2.0
  DENSITY = 750.
  N_REACTIONS = 1
  NU_FUEL = 1.
  REFERENCE_TEMPERATURE = 290.
  HEAT_OF_COMBUSTION = 22300.
  HEAT_OF_REACTION = 2000. /
.....Teppich Ende

.....Gipskarton Beginn
.....Waende
&SURF ID = 'GYPSUM BOARD1'
  RGB = 160,160,160
  MATL_ID = 'GYPSUM PLASTER'
  THICKNESS = 0.0095 /

.....Decke
&SURF ID = 'GYPSUM BOARD2'
  RGB = 160,160,160
  MATL_ID = 'GYPSUM PLASTER'
  THICKNESS = 0.019 /

&MATL ID = 'GYPSUM PLASTER'
  FYI = 'Quintiere, Fire Behavior'
  CONDUCTIVITY = 0.48
  SPECIFIC_HEAT = 0.84
  DENSITY = 1440. /
.....Gipskarton Ende

.....Spruce Beginn
&SURF ID = 'SPRUCE'
  STRETCH_FACTOR = 1.
  CELL_SIZE_FACTOR = 0.5
  BURN_AWAY = .TRUE.
  MATL_ID(1:13) =
'CELLULOSE','WATER','LIGNIN'
  MATL_MASS_FRACTION(1:13) = 0.70,0.1,0.20
  MATL_ID(2,1) = 'CASI'
  THICKNESS(1:2) = 0.01,0.01
  COLOR = 'CHOCOLATE 4' /

&MATL ID = 'CELLULOSE'
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_cell'
  SPECIFIC_HEAT = 2.3
  DENSITY = 400.
  N_REACTIONS = 1
  A = 2.8E19
  E = 2.424E5
  HEAT_OF_REACTION = 0.
  NU_RESIDUE = 1.0
  RESIDUE = 'ACTIVE' /

&MATL ID = 'ACTIVE'
  EMISSIVITY = 1.0
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_cell'
  SPECIFIC_HEAT = 2.3
  DENSITY = 400.
  N_REACTIONS = 2
  A(1:2) = 1.3E10, 3.23E14
  E(1:2) = 1.505E5, 1.965E5
  HEAT_OF_REACTION(1:2) = 418., 418.
  NU_RESIDUE(1:2) = 0.35, 0.0
  NU_FUEL(1:2) = 0.65, 1.0
  RESIDUE(1) = 'CHAR' /

&MATL ID = 'WATER'
  EMISSIVITY = 1.0
  DENSITY = 1000.
  CONDUCTIVITY = 0.6
  SPECIFIC_HEAT = 4.19
  N_REACTIONS = 1
  A = 1E20
  E = 1.62E+05
  NU_WATER = 1.0
  HEAT_OF_REACTION = 2260. /

&MATL ID = 'CASI'
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_CASI'
  DENSITY = 200.
  SPECIFIC_HEAT = 1.0 /

&MATL ID = 'LIGNIN'
  EMISSIVITY = 1.0
  DENSITY = 550.
  CONDUCTIVITY = 0.1
  SPECIFIC_HEAT = 1.1 /

&MATL ID = 'CHAR'
  EMISSIVITY = 1.0
  DENSITY = 140.
  CONDUCTIVITY_RAMP = 'k_char'
  SPECIFIC_HEAT = 1.1 /

&RAMP ID='k_cell', T= 20., F=0.15 /
&RAMP ID='k_cell', T=500., F=0.29 /
&RAMP ID='k_char', T= 20., F=0.08 /
&RAMP ID='k_char', T=900., F=0.25 /
&RAMP ID='k_CASI', T= 20., F=0.06 /
&RAMP ID='k_CASI', T=400., F=0.25 /
.....Spruce Ende

.....Open up the domain on all sides except the bottom (ZMIN)
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

.....Auswertungen
.....Sensorbaum Nordsäule
&DEVC XYZ=1.250,5.450,0.500, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A1' /
&DEVC XYZ=1.250,5.450,1.000, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A2' /
&DEVC XYZ=1.250,5.450,1.500, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A3' /
&DEVC XYZ=1.250,5.450,2.000, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A4' /

.....Sensorbaum Mittelsäule
&DEVC XYZ=1.250,3.650,0.500, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='B1' /
&DEVC XYZ=1.250,3.650,1.000, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='B2' /
&DEVC XYZ=1.250,3.650,1.500, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='B3' /
&DEVC XYZ=1.250,3.650,2.000, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='B4' /

.....Sensorbaum Südsäule
&DEVC XYZ=1.250,1.850,0.500, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='C1' /
&DEVC XYZ=1.250,1.850,1.000, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='C2' /
&DEVC XYZ=1.250,1.850,1.500, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='C3' /
&DEVC XYZ=1.250,1.850,2.000, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='C4' /

.....Wandsensoren Südseite
&DEVC XYZ=0.100,0.500,1.950, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W1' /
&DEVC XYZ=0.100,0.500,1.200, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W2' /
&DEVC XYZ=0.100,0.500,0.150, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W3' /

.....Wandsensoren Mitte
&DEVC XYZ=0.100,3.750,1.950, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W4' /
&DEVC XYZ=0.100,3.750,1.200, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W5' /
&DEVC XYZ=0.100,3.750,0.150, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W6' /

.....Wandsensoren Nordseite
&DEVC XYZ=0.100,7.100,1.950, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W7' /
&DEVC XYZ=0.100,7.100,0.300, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='W8' /

.....Fenstersensoren Nordfenster
&DEVC XYZ=1.250,7.200,1.100, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='F1' /
&DEVC XYZ=1.250,7.200,1.650, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='F2' /

.....Fenstersensoren Südfenster (geküpft)
&DEVC XYZ=1.250,0.050,1.100, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='K1' /
&DEVC XYZ=1.250,0.050,1.650, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='K2' /

.....Sauerstoffsensoren
&DEVC XYZ=2.150,0.650,1.100, QUANTITY='oxygen', ID='Ox' /

.....Oberflächentemperatur
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE' /

.....Schnitte
&SLCF PBX=1.25, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=1.25, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=1.25, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=1.25, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=1.25, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBX=1.25, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBY=5.4, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=5.4, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=5.4, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=5.4, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=5.4, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBY=5.4, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

```

```

&SLCF PBZ=0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.0, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=1.5, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY='TEMPERATURE',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY='VISIBILITY',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY='carbon dioxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY='carbon monoxide',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY='oxygen',VECTOR=.TRUE. /
&SLCF PBZ=2.0, QUANTITY='VELOCITY',VECTOR=.TRUE. /

.....noerdliche Glasscheibe
&OBST XB=0.600,1.850,7.200,7.250,0.900,1.850, SURF_ID='GLAZING',
PERMIT_HOLE=.FALSE., DEVC_ID='glassbreak' /
&DEVC XYZ=1.25,7.15,1.35, ID='glassbreak', SETPOINT= 600,
QUANTITY='TEMPERATURE', INITIAL_STATE=.TRUE. /

.....Tuere
&OBST XB=2.350,2.400,4.750,5.300,0.000,1.950, SURF_ID='SHEET METAL',
PERMIT_HOLE=.FALSE. /

.....Obstacles
.....Data from Layer: FDS_Vorhang
&OBST XB=0.600,0.400,7.200,7.150,0.800,1.950, SURF_ID='VORHANG' /
&OBST XB=0.600,1.850,7.200,7.150,1.750,1.950, SURF_ID='VORHANG' /
&OBST XB=1.850,2.050,7.150,7.200,0.800,1.950, SURF_ID='VORHANG' /

.....Data from Layer: FDS_Jacke
&OBST XB=0.200,0.500,5.200,5.250,1.050,1.800, SURF_ID='JACKE' /

.....Data from Layer: FDS_Stoff
&OBST XB=0.350,0.950,1.000,2.700,0.000,0.400, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.950,1.750,0.700,1.500,0.000,0.400, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.950,0.550,0.700,1.000,0.000,0.600, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.550,0.950,2.700,2.950,0.000,0.600, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.100,0.700,1.000,0.000,0.800, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.100,0.350,1.000,2.700,0.000,0.800, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.550,0.100,2.700,2.950,0.000,0.800, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=0.250,0.350,4.150,4.100,0.900,1.600, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=2.350,2.300,6.650,6.300,0.800,1.500, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=1.300,1.700,6.600,7.000,0.500,0.550, SURF_ID='UPHOLSTERY' /
&OBST XB=1.300,1.350,6.600,7.000,0.600,1.000, SURF_ID='UPHOLSTERY' /

.....Data from Layer: FDS_Papier
&OBST XB=0.100,0.300,0.750,1.050,0.800,0.800, SURF_ID='PAPIER' /

.....Data from Layer: FDS_Metall
&OBST XB=0.150,0.550,4.100,4.150,0.000,0.400, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=0.550,0.150,4.000,3.950,0.000,0.400, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=0.150,0.550,3.950,4.150,0.350,0.400, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=0.200,0.750,3.050,3.200,0.050,0.700, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.000,2.350,3.650,3.700,1.250,1.550, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.350,2.000,3.800,3.750,1.250,1.550, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.000,2.350,4.000,4.050,1.250,1.550, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.000,2.350,3.650,4.050,1.500,1.550, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.000,2.350,4.050,3.650,1.300,1.350, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.350,1.950,3.500,3.450,0.000,0.400, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=1.950,2.350,3.600,3.650,0.000,0.400, SURF_ID='SHEET METAL' /
&OBST XB=2.350,1.950,3.650,3.450,0.350,0.400, SURF_ID='SHEET METAL' /

.....Data from Layer: FDS_Kunststoff
&OBST XB=0.500,0.250,5.150,4.500,0.650,0.700, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=0.250,0.500,4.100,4.000,0.300,0.350, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=0.750,0.800,3.200,3.050,0.100,0.650, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=0.100,0.150,1.750,2.000,0.800,1.000, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=1.000,1.250,2.950,2.650,0.250,0.300, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.000,2.050,3.750,3.700,1.350,1.500, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.000,2.050,3.800,4.000,1.350,1.500, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.100,2.250,3.450,3.100,0.750,0.800, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /

```

```

&OBST XB=2.100,2.350,3.050,3.000,0.750,1.100, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.100,2.350,2.700,2.650,0.750,1.100, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.100,2.350,2.650,3.050,1.050,1.100, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.150,2.200,2.400,2.250,0.750,1.100, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.200,2.350,2.250,2.400,1.050,1.100, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.150,2.300,3.300,2.900,0.400,0.600, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,3.800,1.050,1.300, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.250,2.000,3.500,3.600,0.300,0.350, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.150,2.300,4.050,4.200,1.250,1.400, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.350,2.150,0.050,0.500,0.000,0.300, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=0.100,0.250,0.800,1.000,0.850,0.950, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=2.200,2.350,6.250,6.700,1.750,1.800, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=0.100,0.350,4.150,5.200,2.000,2.050, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /
&OBST XB=0.850,1.050,6.650,6.950,0.700,0.750, SURF_ID='KUNSTSTOFF' /

.....Data from Layer: FDS_Glas
&OBST XB=2.100,2.150,2.100,2.750,0.400,0.700, SURF_ID='GLAZING' /

.....Data from Layer: FDS_Holz
&OBST XB=0.100,0.550,5.150,5.200,0.000,2.000, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.100,0.550,4.150,4.200,0.000,2.000, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.100,0.150,4.150,5.200,0.000,2.000, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.150,0.550,4.200,5.150,0.100,0.150, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.150,0.550,4.200,5.150,1.950,2.000, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.150,0.550,4.200,5.150,0.600,0.650, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.150,0.550,4.200,5.150,1.000,1.050, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.150,0.550,4.200,5.150,1.750,1.800, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.350,4.250,4.200,0.000,1.250, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.350,2.300,4.250,3.650,0.000,1.250, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.350,2.000,3.650,3.700,0.000,1.250, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.000,3.700,3.700,0.000,0.000, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,4.200,1.200,1.250, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,4.200,1.000,1.050, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,4.200,0.750,0.800, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,4.200,0.500,0.550, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,4.200,0.250,0.300, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.000,2.300,3.700,4.200,0.000,0.050, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.200,1.050,6.650,7.000,0.650,0.700, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.200,0.250,6.650,7.000,0.350,0.650, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=1.000,1.050,6.650,7.000,0.350,0.650, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.350,2.200,6.800,6.050,1.700,1.750, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.350,2.050,3.450,2.100,0.000,0.050, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.050,2.350,3.450,2.100,0.350,0.400, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.100,2.350,3.450,2.100,0.700,0.750, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.050,2.350,3.450,0.000,0.400, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.050,2.350,2.100,2.150,0.000,0.400, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.100,2.350,3.400,3.450,0.400,0.750, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.100,2.350,2.150,2.100,0.400,0.750, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.050,2.100,3.450,2.100,0.000,0.400, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.200,2.350,2.400,2.350,0.750,1.050, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.200,2.350,2.250,2.300,0.750,1.050, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=2.350,2.100,3.200,2.400,1.750,1.800, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.250,1.000,6.650,6.700,0.350,0.650, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.250,1.000,7.000,6.950,0.350,0.650, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.650,0.600,7.000,6.650,0.350,0.650, SURF_ID='SPRUCE' /
&OBST XB=0.200,1.050,7.000,6.650,0.350,0.400, SURF_ID='SPRUCE' /

.....Teppichboden
&OBST XB=2.400,0.050,7.250,0.000,0.000,-0.050, SURF_ID='CARPET' /

.....Waende
&OBST XB=0.100,2.350,0.000,0.050,0.000,2.150, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.350,2.400,0.000,7.250,0.000,2.150, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.100,2.350,7.200,7.250,0.000,2.150, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,0.100,0.000,7.250,0.000,2.150, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,0.000,0.050,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,0.600,0.650,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,1.200,1.250,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,1.800,1.850,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,2.400,2.450,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,3.000,3.050,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,3.600,3.650,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,4.200,4.250,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,4.800,4.850,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,5.400,5.450,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,6.000,6.050,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,6.600,6.650,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=2.400,2.450,7.200,7.250,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,7.200,7.250,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,6.600,6.650,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,6.000,6.050,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,5.400,5.450,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,4.800,4.850,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,4.200,4.250,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,3.600,3.650,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,3.000,3.050,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,2.400,2.450,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,1.800,1.850,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,1.200,1.250,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,0.600,0.650,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.000,0.050,0.000,0.050,0.000,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,0.600,0.650,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,0.000,0.050,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,1.200,1.250,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /

```

```
&OBST XB=0.050,2.400,1.800,1.850,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,2.400,2.450,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,3.000,3.050,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,3.600,3.650,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,4.200,4.250,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,4.800,4.850,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,5.400,5.450,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,6.000,6.050,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,6.600,6.650,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /
&OBST XB=0.050,2.400,7.200,7.250,2.150,2.200, SURF_ID='GYPSUM BOARD1' /

.....Decke
&OBST XB=0.100,2.350,0.050,7.250,2.100,2.150, SURF_ID='GYPSUM BOARD2', COLOR
='INVISIBLE' /

.....Fenster 10 cm gekippt
&OBST      XB=0.600,1.850,0.000,0.050,0.900,1.650,      SURF_ID='GLAZING',
PERMIT_HOLE=.FALSE. /

.....Holes
&HOLE XB=0.600,1.850,-0.01,0.060,0.900,1.850, /
&HOLE XB=0.600,1.850,7.190,7.260,0.900,1.850, /
&HOLE XB=2.340,2.460,4.750,5.550,0.050,2.000, /

&TAIL /
```