

FDS LEITFADEN

Version 1.0.0

Stand 12. November 2015

Veröffentlichungs- und Überarbeitungsrichtlinien für den FDS Leitfaden

Dieser Leitfaden wird als geschützte PDF-Datei veröffentlicht, die nur in ihrer Gesamtheit weitergegeben werden darf. Dies bedeutet insbesondere, dass es nicht erlaubt ist, einzelne Kapitel des Leitfadens zu entnehmen und separat zu verteilen.

Dieser gemeinschaftliche Beschluss der FDS Usergroup wird gestützt durch die Überlegung, dass eine qualitativ hochwertige FDS-Simulation nur unter Berücksichtigung aller Bestandteile des Leitfadens erzielt werden kann.

Der Download des Leitfadens ist unmittelbar auf der Intro-Seite von ShareIdeas möglich, siehe www.shareideas.de, ohne dass hierzu eine explizite Registrierung in der FDS Usergroup notwendig ist. Dies trägt zu einer möglichst breiten und unkomplizierten Verbreitung des Leitfadens bei. Es ist ausdrücklich erwünscht, dass die unter ShareIdeas veröffentlichte Fassung des Leitfadens zusätzlich auf den Homepages der einzelnen Teilnehmer verlinkt bzw. bereitgestellt wird.

Änderungen und Erweiterungen des vorliegenden Leitfadens werden durch das Redaktionsteam vorgenommen. Hierzu werden Änderungswünsche und Ergänzungen über die Seite ShareIdeas zentral gesammelt. Aktuell besteht das Redaktionsteam in alphabetischer Reihenfolge aus Lukas Arnold, Andreas Müller, Matthias Münch, Christian Rogsch und Andreas Vischer.

Der Gebrauch dieses Leitfadens geschieht auf eigene Gefahr. Er spiegelt nur die Meinungen der Autoren wider und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gilt immer die aktuelle Version, welche unter

http://www.shareideas.de/FDS_Leitfaden.pdf

verfügbar ist.

Inhaltsverzeichnis

0	Vorwort	4
1	Wie ist dieser Leitfaden zu verstehen?	6
2	Orientierungshilfe	8
2.1	Bezugsquelle	8
2.2	Fachliche Kenntnisse	8
2.3	Erstellung des Simulationsmodells	9
3	Möglichkeiten und Grenzen	10
4	Auswertung	12
4.1	Möglichkeiten der Datenaufzeichnung	12
4.2	Grundsätzliche Kontrollen und Plausibilitätsüberprüfung der Modellierung	12
4.3	Schutzzielbezogene Ergebnisausgaben	13
4.4	Darstellung der Ergebnisse	14
5	Dokumentation der Simulation und der Ergebnisse	15
5.1	Textliche und graphische Darstellung	15
5.2	Tabellarische Zusammenfassung der Randbedingungen	16
Anhang A	Definition der Brandquelle	18
A.1	Allgemeine Hinweise zur Brandmodellierung	18
A.2	Konzeptionelle Hinweise	19
A.2.1	Brandszenarium	19
A.2.2	Brandverlauf	20
A.2.3	Lage des Brandherds	20
A.3	Hinweise zur Definition der Brandquelle in FDS	21
A.3.1	Standardbrandmodell	21

A.3.2 Spezifische Wärmefreisetzungsrates	22
A.3.3 Weitere Brandparameter.....	22
Literaturverzeichnis	24
Links	26
Vortragsübersicht aller Treffen der FDS Usergroup.....	27

0 Vorwort

Die Entwicklung des Brandschutzes zeigt in den vergangenen Jahren einen deutlichen Trend hin zur Verwendung numerischer Ingenieurmethoden auf. Durch den Einsatz komplexer Simulationsprogramme kann das Phänomen „Brand“ sowie die daraus resultierenden Prozesse der Ausbreitung von beispielsweise Brandrauch oder thermischer Strahlung durch den Ingenieur simuliert und hinsichtlich der Bedeutung für das individuelle Sicherheitsniveau eines Gebäudes bewertet werden.

Fire Dynamics Simulator

Der Fire Dynamics Simulator (FDS) ist ein Programm zur Simulation von Bränden. FDS wurde im Jahre 2000 am amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) unter Leitung von Dr. Kevin McGrattan ins Leben gerufen und wird seither fortlaufend weiterentwickelt. Es wird weltweit sowohl von Brandschutzingenieuren in der Praxis als auch von Beschäftigten wissenschaftlicher Einrichtungen, wie Universitäten, Hochschulen, Forschungszentren und Instituten zur Untersuchung von Brandereignissen und deren Auswirkungen eingesetzt, getestet und weiterentwickelt.

Die Software simuliert dreidimensionale Strömungen auf Grundlage der Navier-Stokes-Gleichungen. Das umfasst den zugrunde liegenden Brandprozess und die Ausbreitung von Feuer und Brandrauch. Die Ergebnisse der FDS-Simulationen können u.a. mit Hilfe von Smokeview (SMV) – einem Teil des gesamten FDS-Programmpaketes – visualisiert werden.

FDS Usergroup

Die deutschsprachige FDS Usergroup ist ein unabhängiges Forum für deutschsprachige FDS-Anwender. Sie bietet den Nutzern von FDS die geeignete Plattform für einen wissenschaftlichen und praxisbezogenen Austausch. Das Ziel der FDS Usergroup besteht darin, ein umfassendes Kontakt- und Kooperationsnetzwerk aufzubauen, das den Austausch von Informationen und Erfahrungen sowie Anregungen und Unterstützung rund um das Programm FDS ermöglicht.

Das Online-Forum, das den registrierten Mitgliedern zur Verfügung steht, bietet zudem die Möglichkeit, konkrete Anwenderprobleme direkt und zeitnah zu diskutieren und gemeinsam zu lösen.

Auf dem alljährlich im Herbst durchgeführten Anwendertreffen können Erfahrungen, Fragestellungen, Probleme und Anregungen, die sich aus der praktischen Anwendung und der wissenschaftlichen Weiterentwicklung des Programms ergeben, zusammengetragen und gemeinsam diskutiert werden.

Zusätzlich veranstaltet die Arbeitsgruppe NRW in regelmäßigen Abständen regionale Treffen und Workshops zu praxisorientierten Themen an verschiedenen Orten in Deutschland, Österreich und der Schweiz, die eine intensive Vernetzung ermöglichen.

Die Teilnahme in der FDS Usergroup ist kostenlos und steht allen Interessierten offen.

Zielsetzungen des FDS Leitfadens

Das Ziel des FDS Leitfadens besteht darin, einheitliche und gut nachvollziehbare Qualitätsindikatoren bei der Erstellung und Auswertung von Brand- und Rauchsimulationen auf Basis des Simulationsprogrammes FDS festzulegen.

Für Anwender soll kenntlich gemacht werden, welche Mindestkriterien bei der Anwendung von FDS erfüllt sein müssen; Prüfenden soll ein Hilfsmittel zur Plausibilitätsprüfung gegeben werden.

Aufbau des FDS Leitfadens

Der Leitfaden gliedert sich in zwei Teile: den Hauptteil und die Anhänge. Während sich der Hauptteil mit der generellen Orientierung und Fragestellungen beschäftigt, vertiefen die einzelnen Kapitel im Anhang ausgewählte Themenfelder.

Autoren des FDS Leitfadens:

Bei der Verfassung des vorliegenden Leitfadens haben mitgewirkt:

- Dr. Lukas Arnold, Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich
- Dipl.-Ing. (FH) Adelbert Blatter, Aachen
- Dipl.-Ing. (FH) Ralf Galster, Ingenieurbüro Riesener GmbH & Co. KG, Balingen
- Dr.-Ing. Gerald Grewolls, SIMTEGO GmbH, Ulm
- Dr. Kathrin Grewolls, Ingenieurbüro für Brandschutz Grewolls, Ulm
- Dr. rer. nat. Susanne Kilian, hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Berlin
- Dipl.-Ing. Manuel Kitzlinger, HALFKANN+KIRCHNER, Erkelenz
- Dr.-Ing. Christoph Klinzmann, hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Berlin
- Dipl.-Ing. (FH) Florent Lushta, Gruner AG, Basel
- Dipl.-Chem. oec. Thomas Luthardt, Ingenieurbüro Riesener GmbH & Co. KG, Balingen
- Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Metzger, Quantum Brandschutz GmbH, Basel
- B.Eng. Daniel Mohr, Ingenieurbüro Riesener GmbH & Co. KG, Balingen
- M.Sc. Andreas Müller, HALFKANN+KIRCHNER, Erkelenz
- Dr.-Ing. Matthias Münch, INURI GmbH, Berlin
- Dr.-Ing. Christian Rogsch, Brandschutzplanung, Neustadt / Weinstraße
- Sachverständigenbüro BFT Cognos GmbH, Aachen
- Dr.-Ing. Andreas Vischer, Wijnveld//Ingenieure, Osnabrück
- Dr.-Ing. Jürgen Will, HHP Nord/Ost Beratende Ingenieure GmbH, Braunschweig

1 Wie ist dieser Leitfaden zu verstehen?

Die praktische Anwendung numerischer Ingenieurmethoden im Bereich des Brandschutzes bietet dem Anwender eine Reihe von Vorteilen gegenüber der rein deskriptiven, unflexiblen Bewertung auf der Basis von Verordnungen oder Richtlinien.

Allerdings sind die Anforderungen an ein ausreichendes, systematisches Qualitätsmanagement für komplexe numerische Simulationsprogramme ungleich höher als an die Anwendung von Normen oder Richtlinien.

Daher sollten nach der Feststellung der grundsätzlichen Eignung des Programms die Annahmen zum betrachtenden Anwendungsfall näher überprüft und die berechneten Daten einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden. Letztlich ist jeder Anwender angehalten, seine Simulationen und vor allem die berechneten Raumströmungen sorgfältig und ganzheitlich zu prüfen und dies auch zu dokumentieren. Durch diese anwenderbezogene Qualitätssicherung wird wiederum bei der Prüfung im Genehmigungsverfahren der Behörde oder dem Prüfer eine umfassende Bewertung der Simulationen ermöglicht. Weiterhin ungeklärt sind bisher Mindestanforderungen hinsichtlich der individuellen Qualifikation, welche die Anwender bzw. die jeweiligen Programme erfüllen müssen.

Die FDS-Usergroup als unabhängige Interessengemeinschaft zum Themenkreis FDS vertritt die Ansicht, dass ein Leitfaden zur Anwendung der genannten Programme einerseits zur Sensibilisierung von Anwendern, andererseits aber auch von Prüfern den numerischen Ingenieurmethoden im Ganzen zu mehr Akzeptanz verhelfen kann und gleichzeitig eine Hilfestellung zur Vermeidung von groben Fehlern darstellt.

Dieser Leitfaden gibt Hinweise, welche Aspekte bei den genannten Nachweisen und Kontrollen eine Rolle spielen können und für eine sachgerechte Anwendung und Prüfung berücksichtigt werden müssen. Er versteht sich als Anregung zur Qualitätssicherung. Hierbei sollen Antworten auf die nachfolgenden zentralen Fragestellungen gegeben werden:

- Was muss bei der Anwendung von FDS mindestens beachtet werden?
- Welche fachlichen Grundkenntnisse sind zur Anwendung von FDS notwendig?
- Was sind die Möglichkeiten und Grenzen bei FDS-Simulationen?
- Welche Daten müssen zur Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse mindestens dokumentiert werden?

Was kann dieser Leitfaden nicht leisten:

- er ist nicht als Handbuch zu verstehen,
- er enthält keine Handlungsanweisungen im Sinne von „Befolge A, B und C, und die Simulation wird einwandfrei sein.“,
- er erhebt nicht den Anspruch vollständig zu sein,

- er befreit weder den Anwender noch den Prüfer von der Verpflichtung sich weiterführend mit dem Themenkomplex auseinanderzusetzen.

2 Orientierungshilfe

2.1 Bezugsquelle

Das Simulationsprogramm FDS sowie das zugehörige Visualisierungsprogramm Smokeview stehen auf der FDS-Webseite [FDS] zum freien Download zur Verfügung. Im Programmumfang enthalten sind ausführliche Informationen zu der Benutzung des Programmes, den zugrunde liegenden mathematischen Modellen und diversen Verifikations- und Validierungsbeispielen. Nach der Installation des Programmpaketes ist es möglich, eines der zahlreichen Beispiele oder eine darauf aufgebaute Eingabedatei mit FDS zu starten. Die berechneten Simulationsergebnisse können dann mit Hilfe des Programmes Smokeview visualisiert werden.

2.2 Fachliche Kenntnisse

Bei FDS handelt es sich um ein Programm, das ausgesprochen robust arbeitet. Diese "Robustheit" garantiert jedoch keine sachgerechten Rechenergebnisse. Ein abgeschlossener Berechnungsvorgang ohne Fehlerausgaben und mit scheinbar "plausiblen" Ergebnis erfordert daher immer eine fachgerechte Überprüfung. Zur korrekten und belastbaren Anwendung von FDS sind daher dringend Grundkenntnisse in Strömungslehre, Thermodynamik und Numerischer Mathematik erforderlich.

Daher sind folgende Hinweise zu beachten:

- FDS wurde hauptsächlich für die Untersuchung von brandinduzierten Strömungen entwickelt. Aus diesem Grund muss ein Verständnis für brandspezifische physikalische und chemische Vorgänge vorhanden sein (z.B. Heißgas-Plume, Temperaturschichtung, Brandausbreitung, chemische Reaktionsgleichungen).
- Da der Anwender das Brandereignis definiert, müssen ihm die physikalisch-chemischen Prozesse bei der Verbrennung und die beschreibenden Parameter (z.B. Heizwert, effektive Verbrennungswärme, spezifische Wärmefreisetzungs- und Abbrandrate, Ruß- und Schadgasausbeute) bekannt sein.
- Für die Bewertung der Rauchausbreitung ist es weiterhin erforderlich die Zusammenhänge zwischen Rußfreisetzung, der daraus resultierenden Rauchausbreitung und den Sichtbedingungen zu kennen (z.B. Rußausbeute, spezifischer Extinktionskoeffizient, Extinktionskoeffizient / optische Dichte, Erkennungsweite).
- Die numerischen Modellparameter (z.B. Zellgröße, Zeitschrittweite, Turbulenzmodell) haben einen vergleichbaren Einfluss auf das Rechenergebnis wie die Physikalischen und Chemischen. Daher sind numerische Grundkenntnisse ebenfalls erforderlich.

Ein sorgfältiges Studium der mitgelieferten Programmdokumentation (User Guide, Technical Reference Guide, Verification und Validation Guide) ist für eine qualifizierte Anwendung

unabdingbar. Für das Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge, die für eine qualifizierte Plausibilitätsprüfung erforderlich sind, kann z.B. folgende Literatur verwendet werden:

- Laurien, Oertel jr, Numerische Strömungsmechanik [LO2013]
- Yeoh & Yuen, Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering [YY2009]
- Quintiere, Fundamentals of Fire Phenomena [QUI2007]
- Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics [DRY2011]
- SFPE-Handbuch [SFPE2016]
- vfdb-Leitfaden [VFDB2013]

2.3 Erstellung des Simulationsmodells

Grundsätzlich wird das diskrete Rechengebiet durch einen oder mehrere Quader gebildet, deren Randflächen (Boden, Decke und vier Seiten) durch den Anwender als Randbedingung definiert werden müssen. Im diskreten Rechengebiet können in der FDS-Simulation nur die Objekte strömungstechnisch richtig berücksichtigt werden, die mit dem vom Anwender gewählten Gitter geeignet abgebildet werden können. Dem Anwender obliegt daher die Aufgabe, die für sein Problem relevanten Objekte gegebenenfalls geeignet zu vereinfachen. Des Weiteren muss der Anwender für die von ihm verwendeten Modellansätze geeignete Modellparameter festlegen.

Die Informationen zur Geometrie und zu den gewählten Parametern wird in einer gewöhnlichen Textdatei eingetragen. Alternativ kann die Eingabe auch durch eine grafische Benutzeroberfläche (GUI: Graphical User Interface) erfolgen, die durch externe Software (z.B. Pyrosim oder BlenderFDS) bereitgestellt wird.

In allen Fällen empfiehlt sich noch vor Simulationsbeginn eine Überprüfung der Geometrie des Simulationsmodells mit Hilfe von Smokeview durchzuführen. In der Einarbeitungsphase ist zu empfehlen, die ersten Eingabedateien in einem Texteditor zu erstellen und auf die Nutzung einer graphischen Benutzeroberfläche zunächst zu verzichten. Dies kann zu einem besseren Verständnis der Struktur einer Eingabedatei beitragen.

Über verschiedene Online-Foren, z.B. NIST [FDS], deutschsprachige FDS Usergroup [FDSUSER] oder F-Sim Simulationstechnik [FSIM], kann der Kontakt zu anderen Benutzern aufgenommen und Probleme diskutiert werden.

3 Möglichkeiten und Grenzen

FDS ist – wie jedes andere Simulationsprogramm – ein Werkzeug, das den Anwender bei der Lösung eines Problems unterstützt. Es ist konzipiert worden, um schutzzielorientierte Fragestellungen zur Rauch- und Wärmeausbreitung im baulichen und anlagentechnischen Brandschutz zu bearbeiten, wie z.B.:

- Rauchableitung / Entrauchung von Gebäuden
- thermische Beaufschlagung von Bauteilen
- Reaktion von Sensoren (z.B. Rauchmelder) zur Branderkennung und/oder Steuerung von anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen
- Reaktion und Wirkung von Sprinklern
- Entzündung und Brandausbreitung

Wie alle Simulationsprogramme beruht auch FDS auf vereinfachenden Annahmen, da die darzustellenden Prozesse in der Regel nicht mit der notwendigen Detailtiefe berechnet werden können. In einem ersten grundlegenden Schritt muss der Anwender daher zunächst entscheiden, ob FDS bzw. die darin von ihm ausgewählten Modelle und ihre Annahmen für den betrachteten Anwendungszweck tatsächlich geeignet sind.

Nachfolgende Modellbereiche enthalten Vereinfachungen, welche unter Umständen die Anwendbarkeit von FDS im konkreten Fall einschränken oder sogar verhindern können. Ihre Anwendbarkeit ist für die zu untersuchende konkreten Fragestellung im Detail besonders zu prüfen.

Thermische Beaufschlagung von Bauteilen

- Wärmeübergang zwischen Gasvolumen zu Bauteilen,
- Wärmeleitung im Festkörper,
- Wechselwirkung von Wärmestrahlung von und auf Bauteile.

Verbrennungsvorgang

- nur nicht-vorgemischte Verbrennung (z.B. keine Explosionsvorgänge, keine Rauchgasdurchzündung)
- Freisetzung von Verbrennungsprodukten auf Grund von empirischen Korrelationen (keine detaillierte Verbrennungskinetik)

Brandausbreitungs- und Entzündungsvorgang

- nur Abbildung vom Anwender vordefinierter Brandausbreitungs- und Entzündungsvorgänge

Löschvorgang

- nur Abbildung vom Anwender vordefinierter Löschvorgänge

Abbildung der Gebäudegeometrie

- Vereinfachte Modellbereiche:
- Zellgröße (Gitterweite)
- Kopplung von Berechnungsgittern (Multi-Mesh, Parallelisierung)

4 Auswertung

Bei der numerischen Simulation mit FDS wird in jedem Zeitschritt für jeden Gitterpunkt ein voller Satz der Variablen (u.a. Druck, Geschwindigkeit, Temperatur, Dichte, Gaskonzentrationen) berechnet. Zusätzlich werden Wärmeströme, Temperaturen auf Oberflächen und Temperaturverteilung (1-dimensional) in Körpern bestimmt. Aus dieser Vielzahl von Daten müssen die für die Auswertung und zur Beantwortung der jeweiligen Fragestellung(en) relevanten Werte herausgefiltert und die örtliche und zeitlichen Datenaufzeichnung festgelegt werden.

Nur auf zum Simulationsbeginn festgelegte Ausgabegrößen kann im Nachgang zugegriffen werden, da nur diese gespeichert werden. Das zeitliche Ausgabeintervall kann durch den Anwender festgelegt werden.

4.1 Möglichkeiten der Datenaufzeichnung

Als Möglichkeiten zur Ergebnisdarstellung bietet FDS eine Vielzahl von Auswertemöglichkeiten an, welche teilweise auch in Smokeview angezeigt werden können. Bezüglich weiterführender Details wird auf den User-Guide verwiesen. Beispielsweise:

- Ausgabe definierter Größen in jedem Gitterpunkt (Plot 3D)
- Ausgabe definierter Größen in definierten Schnittebenen (Slice)
- Ausgabe von Flächen definierter konstanter Größen (Iso-Surfaces)
- Ausgabe der Rauchverteilung und der spezifischen Wärmefreisetzungsrates im gesamten Berechnungsgebiet (Smoke 3D / HRRPUV)
- Ausgabe definierter Größen an einzelnen Punkten (Device)
- Ausgabe definierter Größen auf Oberflächen (Boundary)

Anmerkungen:

- Es ist teilweise möglich die Ausgabegrößen durch vom Anwender zu definierenden mathematischen Funktionen aufzubereiten (z.B. Mittelung, Minima, Maxima).
- Grundsätzlich ist zu beachten, dass aufgrund der standardmäßigen aktivierten Mittelung bei der graphischen Darstellung in Smokeview, die dargestellten Werte nicht exakt den berechneten Werten entsprechen.

4.2 Grundsätzliche Kontrollen und Plausibilitätsüberprüfung der Modellierung

Unabhängig vom Nachweisziel muss jede Simulation ein Mindestmaß an Ausgabegrößen zur Plausibilitätskontrolle des Gesamtsystems enthalten. Zusätzlich sind schutzzielabhängig weitere Ausgaben zu definieren.

Hinweise und Empfehlungen:

- Zur Kontrolle der gewünschten Energiefreisetzung ist in jedem Fall der zeitliche Verlauf der simulierten Energiefreisetzung abzugleichen. Die Ursachen für große Abweichungen liegen in der Regel in unterventilierten Bränden oder Eingabefehlern.
- Grundsätzlich sind alle Ventilationsrandbedingungen auf Lage und ggf. ihr zeitliches Verhalten zu kontrollieren.
- Die Massenbilanz kann geprüft werden, wenn alle Öffnungen mit Ausgabegrößen des Massenstroms versehen werden.
- Mit Hilfe von Temperatureslices durch jeden Brandort können die Plume-Temperaturen auf Plausibilität geprüft werden.
- Die Machzahl als Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit (temperatur- und druckabhängig) sollte gemäß FDS User Guide kleiner als 0,3 sein [FDSUSER2015]. Eine Machzahl von nicht mehr als 0,1 entspricht bei Normalbedingungen einer Strömungsgeschwindigkeit von weniger als 30 m/s, die deutlich über den im Brandschutz zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten liegt. Unabhängig davon sollte zur Plausibilitätsprüfung die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit zusammen mit der Strömungsrichtung betrachtet werden, wobei insbesondere Bereiche mit hohen Geschwindigkeiten zu überprüfen sind.
- Im Allgemeinen sollte bei der Darstellung der Ergebnisse eine geeignete Skala gewählt werden, wobei gegebenenfalls vorgegebene Grenzwerte innerhalb der Skala nicht zu nah am oberen oder unteren Rand liegen sollten (z.B. Rußkonzentration 0 - 100 mg/m³, Optische Dichte 0 - 0,5 m⁻¹ zum Nachweis raucharmer Bedingungen).
- Zur Kontrolle des Strömungsfelds sind insbesondere die Geschwindigkeitsprofile des zu untersuchenden Systems auszugeben. Diese werden mit Vector-Slices durch die Brandorte, Zu- und Abluftöffnungen sowie an ausgezeichneten Orten der Raumgeometrie bei Umströmungen von relevanten Bauteilen (Galerien, Stürze etc.) und Einbauten (Möbiliar etc.) aussagekräftig dargestellt.
- Über das Strömungsfeld zusammen mit der Temperaturverteilung und der Verteilung von Rauch (Rußkonzentration, Extinktionskoeffizient oder Optische Dichte) lassen sich wesentliche Aussagen zur Rauch- und Wärmeausbreitung gewinnen. Anhand des Strömungsfelds können am ehesten Fehler bei der Eingabe der Geometrie und der strömungstechnischen Randbedingungen identifiziert werden.

4.3 Schutzzielbezogene Ergebnisausgaben

In Abhängigkeit des nachzuweisenden Schutzziels sind die für den Nachweis notwendigen Ausgabegrößen im Vorfeld der Simulation festzulegen, im zeitlichen Verlauf zu betrachten und auszuwerten.

Hinweise und Bemerkungen:

- Temperaturen
Die von FDS standardmäßig ausgegebenen Temperaturen sind Gastemperaturen. Diese allein bestimmt nicht die thermische Einwirkung auf eine Oberfläche.
- Gaskonzentrationen
Die Konzentrationen von Schadgasen (z.B. CO₂, CO) hängen ganz wesentlich von den vom Anwender definierten Bildungsraten ab.
- Rauchausbreitung
Die Rauchausbreitung zusammen mit der Ausbildung von Rauchgasschichten und raucharmen Schichten insbesondere im Zusammenhang mit sogenannten Entrauchungsnachweisen kann mit Hilfe der Rußkonzentration dargestellt werden. Die Rußkonzentration wird mit Hilfe des spezifischen Extinktionskoeffizienten und der Konstante C (beide Parameter sind zu definieren) in den Extinktionskoeffizienten / die Optische Dichte und in eine (lokale) Erkennungsweite umgerechnet. Im Vorfeld kann mit den Projektbeteiligten abgestimmt werden in welcher Form die Rauchausbreitung / Rauchverteilung dargestellt werden soll: Rußkonzentration, Extinktionskoeffizient, optische Dichte oder Erkennungsweiten.
Grenzwerte und weitere Schutzzielkriterien für den Extinktionskoeffizienten finden sich in der Literatur (z.B. vfdb-Leitfaden [VFDB2013]).

4.4 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse müssen auf die jeweilige Fragestellung(en) bezogen übersichtlich und nachvollziehbar dargestellt werden. Beispielsweise kann anhand von Bildfolgen (z.B. Temperatur, Rußkonzentration) die zeitliche und räumliche Entwicklung der Ausgabegrößen verdeutlicht werden.

Strömungstechnisch wichtige Details – z.B. die Geschwindigkeitsverteilung hinter einer Zuluftöffnung – können mit Hilfe von Vector-Slices dargestellt werden. Die über Sensoren aufgezeichneten Werte können in Diagrammen vergleichend gezeigt werden.

5 Dokumentation der Simulation und der Ergebnisse

5.1 Textliche und graphische Darstellung

Eine vollständige Dokumentation einer durchgeführten Brandsimulation mit FDS erfordert einen ausführlichen Bericht. Nachfolgend ist eine mögliche Gliederung mit wesentlichen inhaltlichen Stichpunkten dargestellt:

Anlass und Auftrag

- Fragestellung, Ziel der Untersuchung, ggf. baurechtliche Anforderung

Verwendete Unterlagen

- Planunterlagen
- Brandschutzkonzept
- FDS User, Verification und Validation Guides [FDSUSER2015, FDSVER2015, FDSVAL2015]
- Fachliteratur

Grundlagen der Nachweisführung

- Kurzbeschreibung von FDS
- Begründung für die Verwendung von FDS und Aussage über die Eignung des Programmes und die verwendete Programmversion (Versionsnummer, Betriebssystem)
- Ableitung von Ausgabegrößen aus den in der Aufgabenstellung festgelegten Bemessungs- / Schutzziel(en)
- Festlegung des Toleranzbereichs der Ausgabegrößen

Darstellung der Rahmenbedingungen für die Simulation

- Beschreibung des Gebäudemodells, inkl. möglicher Abweichungen oder Vereinfachungen
- Brandverläufe, Brandorte und Brandeigenschaften
- Rauch- und Wärmeabzugsmaßnahmen, Lüftung
- Zeitliche Interaktion von Brandschutzmaßnahmen, ggf. Steuerungslogik und Steuerzeitpunkte
- Beschreibung der verwendeten Materialparameter (Schichtdicken, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Dichte, Emissionsgrad)
- Beschreibung der verwendeten Zellgröße und Gebietsaufteilung
- Darstellung der Messpunkte/-ebenen für die Auswertung im Grundriss/Schnitt

- Tabellarische Auflistung der zu untersuchenden Szenarien mit den jeweils relevanten Parametern

Ergebnis

- Verwendete Skalen (mit Bezug auf Bemessungs-/Schutzziele)
- Plausibilitätskontrollen
- Ergebnisse für einzelne Szenarien inklusive Bilder, Diagramme mit Bewertung
- Vergleichende Darstellung mehrerer Szenarien inklusive übergreifender Bewertung
- Auflistung von Szenarien mit den relevanten Parametern und Ergebnissen
- Darstellung der Ergebnisse mittels geeigneter Diagramme und/oder Abbildungen (mit Angabe der Einheiten) für den zeitlichen Verlauf
- Prüfung der Eingabeparameter und kritischer Ergebnisse
- Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung der Genauigkeit bzw. Unsicherheit der Eingabeparameter und der verwendeten Modelle

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Antworten auf die vorgegebene Fragestellung
- Ggf. Ableitung von Anforderungen (z.B. brandschutztechnische Infrastruktur, Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen)

Die Wahl bzw. Vorgabe der Rahmenbedingungen ist plausibel und nachvollziehbar zu begründen.

Aussagen zu Ergebnissen der numerischen Simulationen müssen anhand von Darstellungen (Bilder, Diagramme, Tabellen) plausibel belegt werden. Anhand der Darstellungen müssen die Aussagen und Schlussfolgerung nachvollzogen werden können.

5.2 Tabellarische Zusammenfassung der Randbedingungen

Die Dokumentation der durchgeführten CFD-Berechnung(en) mit FDS kann zusätzlich in einer tabellarischen Auflistung erfolgen (z.B. Datenblatt VDI 6019 Blatt 2). Die tabellarische Zusammenfassung kann einem ausführlichen Bericht als Anlage beigefügt werden.

Nachfolgend ist ein grobes Gliederungsbeispiel einer solchen Tabelle dargestellt. Die zu den einzelnen Unterpunkten aufgeführten Parameter sollen hierbei nur einen Hinweis auf die Art der Angaben geben und sind keinesfalls als vollständig anzusehen. Die Tabelle ist damit je nach Anforderung zu erweitern oder zu kürzen.

Aufgabenstellung

- Objektbeschreibung
- Beschreibung der/des Schutzziele/-s

Angaben zum Programm

- Programmdatei (Name, Version, Betriebssystem, Systemart, Hersteller)

Modellparameter

- Modellbeschreibung (Interaktionsablauf, Simulationszeitraum)
- Netz (Art, Kantenlänge, Anzahl Gitter und Gitterzellen, Ausmaße Modellraum)
- Physikalische Modelle (Turbulenzmodell, Strahlungsmodell, Verbrennungsmodell)
- Randbedingungen (Innen-/ Außentemperatur, Strömungsfelder)

Brandquelle

- Beschreibung (Art, Position, Abbrandfläche)
- Parameter (Wärmefreisetzungsrate, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Strahlungsanteil)
- Abbrandmodell (Zusammensetzung, Abbrandgeschwindigkeit, CO- und Rußausbeute)

Bauteile

- Beschreibung (Art, Materialität)
- Materialparameter (Bauteilstärke, Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Dichte)

Öffnungen

- Zuluft (Art, Position, Fläche, Interaktionsverlauf)
- Abzug (Art, Position, Fläche, Interaktionsverlauf)
- Maschinelle Zuluft/Entrauchung (Art, Position, Anlagenparameter, Interaktionsverlauf)

Anlagentechnik

- BMA (Art, Interaktionsverlauf)
- Löschanlage (Art, Interaktionsverlauf)
- Rauchschutzvorhänge (Position, Interaktionsverlauf)
- Lüftungs- und Klimaanlage (Art, Interaktionsverlauf)

Anhang A Definition der Brandquelle

A.1 Allgemeine Hinweise zur Brandmodellierung

Um mit FDS oder jedem anderen Simulationsprogramm Brandsimulationen durchführen zu können, ist die Definition der Brandquelle eine der hauptsächlichen Eingabegrößen im Simulationsprozess. Durch die Wahl der Brandquelle ergeben sich zahlreiche zu interpretierende Ergebnisse, wie bspw. Höhe der raucharmen Schicht, Sichtweiten, Verteilung toxischer Gase, usw., so dass der Brandquelle eine besondere Bedeutung innerhalb der Modellierung zufällt.

Da es nicht möglich ist, eine Brandquelle wie in der Realität abzubilden [MGO2013], d.h. Modellierung jeder einzelnen chemischen Reaktion, jedes einzelnen Rußpartikels, jedes einzelnen Gasmoleküls und dies noch auf mikroskopischer Ebene, handelt es sich bei den Modellierungen der Brandquelle um Modellvereinfachungen, um die jeweiligen praxisrelevanten Problemstellungen angehen zu können. Durch die genannten Modellvereinfachungen ergeben sich jedoch auch unter anderem folgende Einschränkungen:

- In FDS können ausschließlich diffusionsgetriebene, nicht vorgemischte Verbrennungsprozesse simuliert werden. Verbrennungsreaktionen wie bspw. in Explosionen und Rauchgasdurchzündungen sind nicht darstellbar.
- Die Freisetzung von Verbrennungsprodukten erfolgt aufgrund empirischer Korrelationen und ist nicht Gegenstand einer detaillierten Verbrennungsrechnung.
- Das Brandverhalten und die daraus resultierenden Energie- und Speziesfreisetzungen werden maßgeblich durch die Vorgaben des Anwenders bestimmt und sind nicht Gegenstand einer chemisch-physikalischen Wechselwirkung auf der Grundlage einer detaillierten Verbrennungsrechnung.
- Die Darstellung des Pyrolysevorganges, also die Einbringung brennbaren Gases in das Strömungsgebiet, kann durch den Anwender über einen definierten Massen- bzw. Wärmefreisetzungsverlauf erfolgen.
- Die Wahl der Gitterweite beeinflusst ebenfalls das Brandverhalten sowie Ort und Zeitpunkt der Energiefreisetzung.

Anstelle der Berechnung eines detaillierten Verbrennungsvorganges tritt die nutzerspezifische Definition des zeitlichen Verlaufs der Rauch- und Energiefreisetzungsrate. Im Kontext eines rechnerischen Nachweises z.B. im Rahmen eines bauaufsichtlichen Verfahrens, sind in der Regel die Auswirkungen eines Brandes relevant, insbesondere weil z.B. Art, Ort und Material der Brandlast vom Anwender zum Planungszeitpunkt meist nicht genau spezifiziert werden können. Vielmehr ist die Definition eines maßgebenden Szenarios für den Einzelfall erforderlich.

Die Brandquelle kann unter Berücksichtigung der o.g. Vereinfachungen / Einschränkungen definiert werden. Bei der Erstellung eines rechnerischen Nachweises z.B. im Rahmen eines

bauaufsichtlichen Verfahrens muss im Allgemeinen ein Bemessungsbrand aus normativen Vorgaben oder aus sog. Naturbränden für die vorliegende Nutzung entwickelt werden (Abs. 6.2).

Bei der praktischen Umsetzung in FDS ist die Definition von Modellparametern erforderlich. Dies beinhaltet die Vorgabe des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzungsrates, die Festlegung weiterer Brandparameter auf Basis der vorhandenen bzw. möglichen brennbaren Stoffe und die Wahl von Brandorten unter Berücksichtigung der baulichen und strömungstechnischen Randbedingungen (Abs. 6.3).

A.2 Konzeptionelle Hinweise

Für die Durchführung von Brandsimulationsberechnungen ist ausgehend vom spezifischen Brandszenarium (Abs. 6.2.1) die Ableitung des Brandverlaufs (Abs. 6.2.2) und der Lage des Brandherdes (Abs. 6.2.3) erforderlich.

Der vorzugebende Brandverlauf, die Brandorte und die weiteren Brandparameter können im Vorfeld mit den Projektbeteiligten – insbesondere Genehmigungsbehörden und/oder Prüfsachverständigen – abgestimmt werden.

A.2.1 Brandszenarium

Im Brandszenarium müssen berücksichtigt werden:

- Lage des Brandorts innerhalb des Gebäudes (Höhenlage, Wandbereich, Eckbereich etc.)
- zeitliche Entwicklung der Brandfläche, Zündquellen, zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrates, Brandlasten
- haus- und brandschutztechnische Einrichtungen, soweit diese Einfluss auf den Brandverlauf bzw. Raumströmungen haben (z.B. Zuluft- und Abluftöffnungen)

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass äußere Einwirkungen durch Personen, wie beispielsweise die Feuerwehr, berücksichtigt werden. Dies erfordert jedoch entsprechende organisatorische Voraussetzungen und Festlegungen.

Für die Untersuchung der thermischen Beaufschlagung (z.B. Bauteilbemessung) sind ggf. andere bzw. zusätzliche Aspekte bei der Definition der Brandquelle zu betrachten. Hinweise finden sich in den Teilen 1-2 (Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke bzw. Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall) der Eurocode Normen und deren nationalen Anhängen. Eine weiterreichende Darstellung ist ebenfalls in Abschnitt 4 des vfdb-Leitfadens [VFDB2013] enthalten.

A.2.2 Brandverlauf

Der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzungsrates und die spezifische Wärmefreisetzungsrates können u.a. abgeleitet werden aus:

- vfdb-Leitfaden [VFDB2013]
- DIN 18232-2 bzw. -5
- VDI 6019 Blatt 1
- VdS 2728
- TR Strab BS
- Bemessungsbrände für S-Bahnen und den gemischten Reisezugverkehr
- Naturbrände (Fachliteratur)
- individuelle Brandversuche

Bei normativen Verfahren wird die Brandentstehungsphase im zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrates aufgrund der vielfältigen Ungewissheiten vernachlässigt. Das Brandmodell beginnt erst mit der Brandentwicklungsphase, die meist einen parabolischen Anstieg der Wärmefreisetzungsrates beinhaltet ($\dot{Q} = \alpha \cdot t^2$, α : Brandintensitätskoeffizient). In der anschließenden Phase eines entwickelten Brandes wird im Allgemeinen eine konstante Wärmefreisetzungsrates angesetzt. Zusätzliche Einflussgrößen (z.B. Einfluss von Löschanlagen) können jedoch berücksichtigt werden (siehe oben angegebene Quellen).

Generell muss sowohl bei der Verwendung von experimentell als auch normativ abgeleiteten Brandverläufen die Übertragbarkeit auf die zu untersuchende Situation durch den Anwender geprüft und begründet werden. Ggf. können zusätzliche Untersuchungen mit einem niederenergetischen Brand erforderlich werden.

A.2.3 Lage des Brandherds

Bezüglich der entstehenden Rauchmenge und der Rauchausbreitung ist bei ungestört aufsteigendem Plume ein Brand am Boden am kritischsten: Wegen der großen Aufstiegshöhe wird vermehrt Umgebungsluft in den aufsteigenden Rauchgasstrom (Plume) eingemischt, so dass verglichen zu einem höher gelegenen Brandherd die Rauchmenge größer und die mittlere Rauchgastemperatur niedriger ist. Bei einer niedrigen Rauchgastemperatur ist der Auftrieb geringer. Dies kann beispielsweise dazu führen, dass die Schichtung des Rauchgases weniger stabil ist und Raumströmungen – z.B. Zuluft – verstärkt zu Verwirbelungen bzw. Rauchverschleppungen führen.

Befindet sich der Brandherd an einer Wand oder in einer Ecke, dann wird das Einmischen von Luft in den Plume eingeschränkt. Demzufolge steigt – verglichen zu einem freistehenden Plume /Brandherd – weniger, aber wärmeres Rauchgas auf. Somit ist die Positionierung des Brandherds an einer Wand oder in einer Ecke bei der Bewertung der Rauchausbreitung in der Regel wenig sinnvoll, bei der Bewertung der Bauteilerwärmung aber in der Regel dem freistehenden Brandherd vorzuziehen, siehe auch [W1-02].

Bei mehrgeschossigen Lufträumen mit Galerien (z.B. Atrien, mehrgeschossige Ladenstraßen) und der Positionierung der Brandquelle unterhalb der Galerie, d.h. im überdeckten Bereich, kommt es zu Verwirbelung an der Deckenkante. Dies kann zu einem verstärkten Raucheintrag in Galerieebenen, auch unterhalb der eigentlichen Rauchgasschicht, führen.

Mit zunehmender Entfernung zum Brandherd sinken die Rauchgase aufgrund der Abkühlung herab. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass eine Zuluftströmung in der Nähe eines Brandherdes zu einer verstärkten Einmischung in den über dem Brandherd aufsteigenden Heißgasplume führen kann. Bei der Vorgabe der Brandherdpositionen für die Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen sind diese Aspekte zu berücksichtigen.

A.3 Hinweise zur Definition der Brandquelle in FDS

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge der Eingangsparameter zur Steuerung der Brandquelle in FDS beschrieben. Mit ihrer Hilfe erzeugt der Anwender einen künstlichen Brandherd zur Freisetzung von Wärme, Rauch und Ruß. Nach der Vorstellung des Standardbrandmodells (Abs. 6.3.1) und der Definitionsmöglichkeiten der Wärmefreisetzungsrate (Abs. 6.3.2) werden weitere Brandparameter, im speziellen die Stoffausbeuten (Abs. 6.3.3), erläutert. Der Anwender muss prüfen, ob sich sein Anwendungsfall mit den Standardparametern in FDS abbilden lässt. Gegebenenfalls muss er diese anpassen.

A.3.1 Standardbrandmodell

Das in den meisten Fällen zur Anwendung kommende Brandmodell beruht auf der Vorgabe der Wärmefreisetzungsrate und eines gasförmigen Brennstoffs durch den Anwender. Mit dieser Vorgehensweise kann sowohl die gasförmige Freisetzung brennbarer Bestandteile während des Pyrolysevorgangs eines Festkörpers, als auch der Verdampfungsprozess eines Flüssigkeitsbrandes, abgebildet werden.

Hierfür definiert der Anwender neben der Festlegung des gasförmigen Brennstoffs, die spezifische Wärmefreisetzungsrate (Abs. 6.3.2) und weitere Brandparameter, wie die Stoffausbeuten (Abs. 6.3.3), die in diesem Standardbrandmodell die Eigenschaften der Brandquelle (z.B. Leistung, Stoffausbeuten) bestimmen.

Dieses vereinfachte Brandmodell geht von einer ausreichenden Sauerstoffzufuhr in den Brandbereich aus. Bei unterventilierten Verbrennungsprozessen wird die Freisetzung von gasförmigem Brennstoff über die Brandquelle nicht gedrosselt. Eine Regulierung der Brennstofffreisetzung in Abhängigkeit der verfügbaren Sauerstoffkonzentration erfolgt nicht. Somit kann insbesondere in kleinen Räumen mehr Brennstoff freigesetzt werden, als tatsächlich verbrannt werden kann; in diesem Fall ist die Anwendbarkeit des Brandmodells zu prüfen.

A.3.2 Spezifische Wärmefreisetzungsrate

Im einfachsten Fall definiert der Anwender den zeitlichen Verlauf der flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate. Er kann somit berücksichtigen, dass die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate, oder auch die Abbrandrate, im Verlauf eines natürlichen Brandes variieren kann.

Bei der Festlegung der flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate sollte die Aufgabenstellung berücksichtigt werden. Eine geringere spezifische Wärmefreisetzungsrate erfordert bei gleicher Brandleistung eine größere Brandherdoberfläche. Im Vergleich zu hohen flächenspezifischen Wärmefreisetzungsraten kann dies zu einer geringeren mittleren Temperatur des Plumes als auch der Rauchgasschicht führen. Dem Zuzufolge entsteht ein geringerer thermischer Auftrieb, so dass sich ein geringerer Massenstrom bei natürlichen (thermischen) Rauchabzusanlagen einstellt. Diese allgemeinen Zusammenhänge hat der Anwender zu beachten.

Grundsätzlich gibt es in FDS unterschiedliche Möglichkeiten den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate vorzugeben:

- Eine mögliche Methode ist die Angabe einer Brandfläche und einer flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate, so dass das Produkt beider die Wärmefreisetzungsrate vorgibt. Dabei kann ein zeitlicher Verlauf der flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate vorgegeben werden und damit eine zeitliche Entwicklung des Produkts. Diese Form der Brandherddarstellung kann bei großen Wärmefreisetzungsraten in der Anfangsphase zu unrealistischen Verhältnissen führen, da der Brennstoffeinstrom von Beginn an über die gesamte Brandfläche erfolgt. Durch eine gleichzeitige Anpassung der Brandfläche kann dieser Effekt aufgefangen werden [WILL2008].
- Als weitere Option ist es in FDS möglich den zeitlichen Verlauf der Brandausbreitung durch die Definition eines Startpunktes des Brandes auf der Brandfläche zusammen mit einer radialen Brandausbreitungsgeschwindigkeit anzugeben. Bei Angabe einer konstanten flächenspezifischen Wärmefreisetzung ergibt sich die zeitlich veränderliche Wärmefreisetzungsrate als Produkt aus der flächenspezifischen Wärmefreisetzung und der aktuellen Größe der Brandfläche bis zum Erreichen der vorgegebenen Brandfläche. Wird dazu noch ein zeitlicher Verlauf der flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate vorgegeben, so kann der zeitliche Verlauf zusätzlich gesteuert werden.

Möglichkeiten zur praktischen Definition einer Brandquelle sind bspw. in [VIS2012] zu finden.

A.3.3 Weitere Brandparameter

Die Freisetzung von Verbrennungsprodukten (beispielsweise Ruß, CO₂, CO) und der Sauerstoffverbrauch sind über Brandparameter, wie z.B. Stoffausbeuten und Verbrennungswärme, an die Wärmefreisetzungsrate gekoppelt.

In nahezu allen Anwendungsfällen liegt verschiedene brennbare Materie vor. In diesen Fällen wird angeraten eine repräsentative Mischbrandlast mit entsprechenden Brandparametern zu wählen. Eine Orientierung hierzu bietet der vfdb-Leitfaden [VFDB2013].

Bei der Erstellung einer repräsentativen Mischbrandlast sollte zur Auswahl der Stoffe nicht nur der Ist-Zustand betrachtet sondern auch mögliche Nutzungsänderungen und / oder Umbauten berücksichtigt werden. Neben den aus der Nutzung herrührenden Brandlasten (Einrichtungsgegenständen, Lagergütern, Waren etc.) sollten brennbare Baustoffe bei der Zusammenstellung des Brandlastgemischs nicht vergessen werden.

Hinweis: Einfache Verbindungen wie z.B. Methan, Propan oder Methanol führen wegen einer überdurchschnittlich hohen effektiven Verbrennungswärme und einer unterdurchschnittlich geringen Rußausbeute zu einer sehr geringeren Rußfreisetzung, so dass derartige Stoffe bei Simulationen im Rahmen eines Entrauchungsnachweisen nicht als Brennstoff angesetzt werden sollten.

Ein weiterer zu nennender Brandparameter ist der radiative Anteil der Wärmefreisetzung. Bei einer Verbrennung wird die Energie konvektiv und in Form von Wärmestrahlung (radiativ) freigesetzt. Der radiative Anteil der Wärmefreisetzung kann insbesondere bei der Bewertung der Bauteilerwärmung einen signifikanten Einfluss haben.

Literaturverzeichnis

[DRY2011] D. Drysdale: An Introduction to Fire Dynamics, Wiley, ASIN B005K047S6, 2011

[FDSMATH2015] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.: Fire Dynamics Simulator (Version 6.2.0) - Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model. NIST Special Publication 1018-6, National Institute of Standards and Technology, 13. April 2015.

[FDSUSER2015] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J. Weinschenk C., Overholt K.: Fire Dynamics Simulator (Version 6.2.0) – User’s Guide. NIST Special Publication 1019-6, National Institute of Standards and Technology, 13. April 2015.

[FDSVAL2015] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K.: Fire Dynamics Simulator (Version 6.2.0) – Technical Reference Guide Volume 3: Validation. NIST Special Publication 1018-6, National Institute of Standards and Technology, 13. April 2015.

[FDSVER2015] McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J. Weinschenk C., Overholt K.: Fire Dynamics Simulator (Version 6.2.0) - Technical Reference Guide Volume 2: Verification. NIST Special Publication 1018-6, National Institute of Standards and Technology, 13. April 2015.

[GRE2012] Grewolls, K. und Grewolls, G: Praxiswissen Brandschutz - Simulationen: Schneller Einstieg und kompaktes Wissen. Feuertrutz Verlag, 2012.

[JIN2002] Jin, T.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, SFPE/NFPA, Third Edition 2002, NFPA, Quincy MA (USA).

[JON1983] John R.: Forschungsbericht Nr. 59, Ermittlung der Luftvolumenströme zur Verdünnung von Brandrauch auf ein die Gesundheit und Sichtbarkeit in Rettungswegen gewährleistendes Mass, Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Dezember 1983.

[LO2013] von E. Laurien, H. Oertel jr.: Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit, Springer Vieweg, ISBN 978-3658031442, 2013.

[MGO2013] Münch M., Gerber S., Oevermann M.: Analyse von verschiedenen Verbrennungsmodellen im Hinblick auf Brandsimulationen in praktischen Geometrien, 3. Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Tagungsband, Hrsg. U. Krause, S. 1 - 18, , Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 21.-22. März 2013.

[MUEDISS2013] Münch, M.: Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr, Verlag INURI GmbH Berlin, ISBN 978-3-944809-00-7, (zugleich Dissertation Otto-von-Guericke Universität Magdeburg), 2013.

[MUEKIL2010] Münch M.; Kilian S.: A new generalized domain decomposition strategy for the efficient parallel solution of the FDS-pressure equation, Part II: Verification and Validation, ZIB-Report ZR_09-20, 40 p., ISSN 1438-0064, Zentrum für Informationstechnik Berlin, Takustraße 7, 14195 Berlin, Germany, Juni 2010.

[QUI2007] J. G. Quintiere: Fundamentals of Fire Phenomena, Wiley, ASIN B000U0OPKQ, 2007

[SFPE2016] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, ISBN 978-1-4939-2565-0, 2016

[SIW2002] Siegfried W., Will J.: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb Zeitschrift Forschung und Technik 51 (2002) 3, S. 101 - 107 ISSN 0042-1804, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart.

[VFDB2013] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 3. Auflage November 2013.

[VIS2012]: Vischer A.: Möglichkeiten zum Ansatz und zur Modellierung von Bränden und Brandszenarien in FDS - eine Diskussionsgrundlage. Tagungsband 6. Anwender-Treffen der FDS Usergroup S. 41-56, Berlin, ISSN 2191-463X, 15.-16. November 2012.

[WILK2004] vfdb-Zeitschrift, Heft 3 August 2004, Seite 168 ff.: Untersuchungen zur Sichtweite im Rauch und zur Brandgaseinwirkung auf Menschen, Erhardt Wilk, Rüdiger Lessig, August 2004.

[WILL2008] Will J.: Ingenieurmäßige Anwendung von FDS am Beispiel einer Halle. Tagungsband 2. Anwender-Treffen der FDS Usergroup S. 27-47, Berlin, ISSN 2191-463X, 04.-05. Dezember 2008.

[YY2009] G. H. Yeoh, K. K. Yuen: Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering: Theory, Modelling and Practice, Butterworth-Heinemann, ASIN B002ZJSU10, 2009.

Links

[FDS] <https://firemodels.github.io/fds-smv>

[FDSUSER] <http://www.shareideas.de/pg/groups/45/fds-usergroup/>

[FSIM] <http://www.f-sim.de/>

Vortragsübersicht aller Treffen der FDS Usergroup

1. Anwendertreffen in Berlin (07.03.2008)

[A1-01] Anwendung von FDS im Rahmen brandschutztechnischer Nachweise – Erfahrungen, Grenzen und Herausforderungen – *Jochen Zehfuß*

[A1-02] Optimierung der Parallelisierungsstrategien von FDS – Cluster-Architektur bei hhpberlin – *Susanne Kilian*

[A1-03] Parallelrechnung in der Praxis - Ist FDS 5 wirklich „besser“ als FDS4? – *Christian Rogsch*

[A1-04] Vergleich FDS 4 vs. FDS 5 und die daraus resultierende Varianz bei Bauteiltemperaturen bzw. der Strahlungsintensität – *Boris Stock, Karl Wallasch*

[A1-05] Weiterentwicklung von FDS hinsichtlich der dreidimensionalen Wärmeleitung in Bauteilen – *Andreas Vischer*

[A1-06] Ausgewählte Szenarien zur Fehleranalyse der Rechenergebnisse aus FDS – Brand- und Rauchausbreitungssimulationen für die Versionen 4.0 und 5.0 – *Dimitrios Toris*

[A1-07] Verifikation und Validierung bei der Softwareentwicklung – Warum Vergleiche mit Brandversuchen nicht ausreichen – *Matthias Münch*

[A1-08] Vergleichsrechnungen zwischen einem Realbrandversuch (Straßenbahn) und einer FDS Simulation – *Klaus Veenker*

[A1-09] Vergleich verschiedener CFD-Modelle – Anwendungsgebiete von CFX und FDS – *Martin Steinert*

2. Anwendertreffen in Berlin (04. – 05.12.2008)

[A2-01] Sensitivitätsuntersuchungen zur FDS-Validierung anhand einfacher strömungstechnischer Standardfälle Boris Stock – *Karl Wallasch*

[A2-02] Parameterstudie zur Modellierung von Brandszenarien mit Zonen und Feldmodell im Vergleich zu dem Brandmodell der DIN 18232-2 – *Sebastian Metzger*

[A2-03] Ingenieurmäßige Anwendung von FDS am Beispiel einer Halle – *Jürgen Will*

[A2-04] FDS Simulation (FDS 5.2.0), Sprinkleranlage, Hochregallager(HRL) – *Christian Kohler*

[A2-05] Erfahrungsbericht über Aufbau und Pflege verschiedener Clustersysteme bei hhpberlin – *Martin Steinert*

[A2-06] Performance-Vergleich von Linux- und Windows-Clustersystemen / FDS-Parallelisierungs-benchmark – *Susanne Kilian*

[A2-07] FDS+EVAC – Verifizierung und Anwendung – *Gregor Jäger*

[A2-08] Methodik zur vergleichenden Bewertung von Zeitreihen Volker Hohm – *Christoph Klinzmann*

[A2-09] Nachrechnungen der McCaffrey-Experimente / Variation von Gitterweite und Smagorinsky-Zahl – *Dimitrios Toris*

[A2-10] Iterative Gebietszerlegungskonzepte für den FDS-Drucklöser zur Stärkung der globalen Kopplung – *Susanne Kilian*

[A2-11] Ist eine Gebietszerlegung in mehrere Gitter bei FDS-Rechnungen zulässig? – *Matthias Münch*

[A2-12] In FDS integriertes Submodell zur Berechnung der dreidimensionalen instationären Wärme-leitung in Bauteilen – *Andreas Vischer*

[A2-13] FDS und OpenMP – *Christian Rogsch*

3. Anwendertreffen in Berlin (29. – 30.10.2009)

[A3-01] Simulation von Atriumbränden, Ringvergleich und Parameterstudie – *Volker Schneider*

[A3-02] Comparison of numerical simulations with large scale experiments (blind simulations) – *Xavier Deckers*

[A3-03] Qualitätssichernde Kriterien bei der Anwendung von FDS: Untersuchungen zum Einfluss der Modellierung und Diskretisierung von natürlichen Rauchabzugsanlagen – *Boris Stock, Karl Wallasch*

[A3-04] Mechanische Entrauchung – *Markus Kraft*

[A3-05] Strahlung, Wärmeübergang, Einfluss von Bauteilen – *Florent Lushta*

[A3-06] Brandherdmodellierung – *Klaus Veenker*

[A3-07] Vergleich von FDS und Star CCM+ anhand des Steckler Room Fires – *Sebastian Metzger*

[A3-08] Sprinkler und Nozzles in FDS-Simulationen – *Benjamin Kloss*

[A3-09] Dokumentation von CFD-Studien – *Oliver Krüger*

[A3-10] Korrektur der Vergleichsgrundlagen bei der Validierung des Fire Dynamic Simulator (FDS) durch die Mc Caffrey-Versuche – *Michael Grünewald*

[A3-11] Verifikation und Validation des neuen Sub-Modells zur Berechnung der 3-D Wärmeleitung in Bauteilen – Nachrechnung von Brandversuchen – *Andreas Vischer*

[A3-12] Richtig schnell rechnen – Vorstellung einer neuen Initiative – *Matthias Münch*

[A3-13] FDS-ScaRC: Ein optimierter Parallelisierungsansatz für die FDS-Druckgleichung auf Basis adaptiver Gittervernetzungstechniken – *Susanne Kilian*

[A3-14] FDS und OpenMP – Erfahrungen bei der Entwicklung – *Christian Rogsch*

[A3-15] Auswirkungen der Zellgröße auf den aerodynamisch wirksamen Querschnitt – *Thomas Kolb*

[A3-16] Parameterstudie zur Modellierung von Entfluchtungsszenarien im Rahmen einer Sicherheitsanalyse für Seilbahnen – *Gregor Jäger*

[A3-17] Building Information Model (BIM) basierte Evakuierungssimulation – *Puyan Abolghasemzadeh*

1. Workshop der Arbeitsgruppe NRW in Aachen (24. – 25.06.2010)

[W1-01] Übertragung von Geometrie-Informationen aus CAD-Dateien in FDS-Inputfiles –
Stephan Derkowski

[W1-02] Plumesimulationen an Wänden - Einflussgrößen und Erkenntnisse – *Ralf Galster*

[W1-03] Entrauchung in der Schweiz und CFD-Vergleichsberechnungen FDS/CCM+ –
Jörg Kasburg

[W1-04] Untersuchung von Glasbauteilen in Bezug auf den Temperatur- und
Strahlungsdurchgang mit FDS – *Markus Kraft*

[W1-05] Vergleich physikalischer und rechnerischer Modellierungsmethoden und derer
Anwendungsbereiche sowie eventueller Grenzen - Vorstellung des Modellversuchs –
Wilfried Mertens

[W1-06] Einflüsse von unterschiedlichen Berechnungsstrategien und äußeren
Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse von FDS – *Andreas Müller*

[W1-07] Entwicklung von FDS - Ein Überblick – *Christian Rogsch*

[W1-08] Gestern, Heute, Morgen und Übermorgen – *Georg Spennes*

[W1-09] Untersuchungen zu Modellierungen von Rauchabzügen in FDS – *Boris Stock und
Karl Wallasch*

[W1-10] Ergebnisse des Modellversuchs – I.F.I. Institut für Industrieraerodynamik GmbH

4. Anwendertreffen in Berlin (04. – 05.11.2010)

- [A4-01] Welche aerodynamisch wirksame Öffnungsfläche ist „richtig“? – *Jürgen Will*
- [A4-02] Rekonstruktion eines Zimmerbrandes aufgrund des Spurenbildes unter Anwendung des Feldmodells „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) – *Michael Pulker*
- [A4-03] Skalierbarkeit von Clustersystemen – *Martin Steinert, Stefan Truthän*
- [A4-04] Rückblick zum 1. Workshop der FDS-Usergroup Arbeitsgruppe NRW vom 24.–25. Juni in Aachen – *Christian Rogsch*
- [A4-05] Vorstellung der durchgeführten Brandsimulation zur natürlichen Entrauchung einer Industrie-halle mittels eines physikalischen Modells zur Vergleichsrechnung mit FDS – *Andreas Müller*
- [A4-06] Qualitätssichernde Kriterien bei der Anwendung von FDS: Ein Kurzbericht zum aktuellen Stand der Simulation isothermer Freistrahle – *Gregor Jäger*
- [A4-07] Qualitätssichernde Kriterien bei der Anwendung von FDS: Untersuchungen zum Einfluss diverser Parameter bei der Strömungssimulation in einem „Annex 20 Raum“ – *Boris Stock*
- [A4-08] Wärmeübertragung auf und in Bauteilen – neue Modelle in FDS – *Andreas Vischer*
- [A4-09] Berücksichtigung von abwehrenden und anlagentechnischen Maßnahmen in Bemessungs-bränden – *Christoph Klinzmann*
- [A4-10] Analysis of turbulent fluctuations in a 1/3 scale room corner using FFT – *Bjarne Husted*
- [A4-11] Gegenwärtiger Stand des Konzeptes zur Eignungsprüfung des Fire Dynamics Simulators – *Matthias Münch*
- [A4-12] Numerische Vergleichsrechnungen zur Verifikation des optimierten parallelen FDS-Druck -lösers ScaRC – *Susanne Kilian*
- [A4-13] Versuch zum Aufstellen von Energiebilanzen gesprinkelter Szenarien mit FDS 5 – *Manuel Kitzlinger*
- [A4-14] Analyse des Einflusses der C, H, O, N-Werte auf den soot-yield sowie die Relevanz des Luftverbrauchs – *Sebastian Metzger*
- [A4-15] Nachrechnung von Brandversuchen mit FDS/ANSYS – *Dimitrios Toris*

2. Workshop der Arbeitsgruppe in Erkelenz (14. – 15.7.2011)

[W2-01] Theoretische Grundlagen in FDS hinsichtlich des Wärmeübergangs auf Bauteile – *Christian Rogsch*

[W2-02] Durchführung und Auswertung von FDS-Berechnungen zur Bestimmung von raucharmen Schichthöhen im Rahmen einer Round-Robin-Testreihe der FDS-Usergroup – *Mesuda Ramic*

[W2-03] Auswirkung der Größe der Berechnungszellen auf die aerodynamische Wirksamkeit von natürlichen Rauchableitungsöffnungen bei der Simulation mit FDS – *Andreas Müller*

[W2-04] Bemessung von natürlichen Rauchabzugsanlagen im Industriebau - Vergleich der DIN 18232-2:2007-11 mit dem Rheinland-Pfalz-Papier durch Anwendung eines computergestützten Simulationsverfahrens – *Paul Häringer*

[W2-05] Plumesimulationen an Wänden, Teil 2 - Vergleich zweier gängiger CFD-Programme (FDS und Kobra3D) – *Ralf Galster*

[W2-06] Ergebnisvergleich Realbrand, Modellversuch, Simulationsrechnung am Beispiel eines Vortragssaals – *Wilfried Mertens*

[W2-07] Vorschlag für die Dokumentation der wesentlichen Anfangs- und Randbedingungen bei der Brandsimulation mit FDS – *Oliver Krüger/Boris Stock*

5. Anwendertreffen in Berlin (10. – 11.11.2011)

[A5-01] Auswirkungen der Zellgröße auf den aerodynamisch wirksamen Querschnitt -
Ergebnisse einer Parameterstudie mit unterschiedlichen Druckdifferenzen – *Thomas Kolb*

[A5-02] FDS-Simulationen richtig auswerten – *Christian Kohler*

[A5-03] Integration von numerischer Brandsimulation in die digitale Gebäudemodellierung für
die Anwendung im Einsatzfall Umgebungsbedingte und verhaltensabhängige mikroskopische
Entfluchtungsanalyse basierend auf BIM und FDS – *Puyan Abolghasemzadeh*

[A5-04] Erfahrungsbericht bei der Handhabung von FDS-EVAC im Vergleich zu ASERI –
Jürgen Will

[A5-05] Sicherstellung eines Zuganges für die Feuerwehr in einstöckigen, ungesprinklerten
Industriegebäuden mit Dachöffnungen – *Tim McDonald*

[A5-06] Comparison of inert Shaft Fire Experiment and CFD Modelling in FDS5/6 –
Bjarne Husted

[A5-07] Vergleichende Anwendung von FDS+Evac in den FDS-Versionen 5 und 6 –
Gregor Jäger

[A5-08] Ein Beitrag zur Simulation druckbelüfteter Treppenträume – *Boris Stock*

[A5-09] Wärmeübertragung auf und in Bauteilen bei Brandsimulationen mit FDS –
Andreas Vischer

[A5-10] Wärmestrahlung in FDS: Wärmt es noch oder brennt es schon? – *Matthias Münch*

[A5-11] Wie genau müssen Brandparameter sein? Probabilistische Analyse der Sensitivität von
Brandsimulationen auf Basis des Latin-Hypercube-Samplings – *Kathrin Grewolls*

[A5-12] Vergleichsrechnungen mit FDS im Rahmen der Normungsarbeit der DIN 18230-4 –
Christoph Klinzmann

[A5-13] Optimierung der FDS-Drucklösung auf Basis algebraischer Mehrgittermethoden –
Susanne Kilian

3. Workshop der Arbeitsgruppe NRW in Köln (28. – 29. 6 2012)

[W3-01] 2-tägiger Workshop für die Ausarbeitung des FDS-Leitfadens

6. Anwendertreffen in Berlin (15. – 16.11.2012)

[A6-01] Nachweise der Personensicherheit mit FDS – *Burkhard Forell*

[A6-02] Bestimmung von Sicht- und Erkennungsweiten im Rahmen einer CFD-Analyse – *Volker Schneider*

[A6-03] Möglichkeiten zum Ansatz und zur Modellierung von Bränden und Brandszenarien in FDS – eine Diskussionsgrundlage – *Andreas Vischer*

[A6-04] Die Brandsimulation: Zwischen Glaskugel und Wissenschaft? – *Matthias Münch*

[A6-05] Validierungsrechnungen für ANSYS CFX und FDS anhand eines spezifischen Brandszenarios – *Ulrich Krause*

[A6-06] Use of alternative sub grid turbulence models in FDS – *Bjarne Husted*

[A6-07] Die FDS-Drucklösung im numerischen Visier: Eingabegrößen, Genauigkeit und Skalierbarkeit – *Susanne Kilian*

[A6-08] Einführung in das FireModeler Framework: Motivation, Konzeption und Visionen – *Björn Schünke*

[A6-09] FireSim – Das Werkzeug für den Brandschutzingenieur – *Stefan Truthän*

4. Workshop der Arbeitsgruppe NRW in Karlsruhe (27. – 28.6.2013)

[W4-01] Rückblick auf den ersten Versuch mit dem Versuchskörper - Modellberechnungen zum Brandversuch in Erkelenz – Andreas Meunders, Bergische Univ. Wuppertal

[W4-02] Objektbezogene Bewertung der Novelle zur IndBauRL durch Betrachtung der Entrauchung im Brandfall – Daniel Mohr, Ingenieurbüro Riesener GbR

[W4-03] Bestimmung von Oberflächentemperaturen - CFD-Simulation und Experiment – Volker Schneider, IST GmbH

[W4-04] Nachweis eines RDA-unterstützten Entrauchungskonzepts mittels Brandsimulation und Warmrauchversuchen – Sebastian Metzger, Gruner AG

[W4-05] Modelluntersuchungen zum Strömungsfeld in Tiefgaragen bei Leckagen gasbetriebener Fahrzeuge – Kiyoshi Makabe und Mary Weigand, Forschungsstelle für Brandschutztechnik

7. Anwendertreffen in Berlin (14. – 15.11.2013)

[A7-01] Fire simulation manager – intelligente Verwaltung von FDS-Brandsimulationen – *Sirko Höer*

[A7-02] Werkzeuge des Brandschutzingenieurs aus der Cloud – Ein Statusbericht – *Stefan Truthän*

[A7-03] Fire analytics – Einsatz moderner software-technologien zur Auswertung von FDS Daten – *Sascha Gottfried*

[A7-04] Simulation of the activation of pressure line detectors placed under roof eaves and Comparison with experimental data – *Bjarne Husted*

[A7-05] Vorstellung der Ergebnisse des Arbeitskreises, aerodynamisch wirksamer Querschnitt – *Thomas Kolb*

[A7-06] Brandversuch an der FFB in Karlsruhe – Versuchsauswertung und Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse – *Andreas Meunders*

[A7-07] Untersuchung der Prognosefähigkeit von FDS am Beispiel eines Mehrraumszenarios – *Jochen Zehfuß, Matthias Siemon, Olaf Riese*

[A7-08] Ermittlung der äquivalenten Branddauer durch Brandsimulation – *Gregor Jäger*

[A7-09] Glaubwürdige Brandsimulationen – nachweisbar richtig simuliert – *Matthias Münch*

[A7-10] Wärmestrahlung in FDS 6 – eine Analyse – *Andreas Vischer*

[A7-11] Vergleichende Betrachtung von FDS 5 und FDS 6 an einem „multi-mesh“-Beispiel – *Jürgen Will*

[A7-12] Die FDS-Drucklösung – Einblicke in eine numerische Qualitätssicherung – *Susanne Kilian*

8. Anwendertreffen in Berlin (06. – 07.11.2014)

[A8-01] Berechnung des konvektiven Wärmeverlustes in FDS5 und FDS6-ein Fehler? – *Andreas Vischer*

[A8-02] Das Wärmestrahlungsmodell in FDS – *Matthias Münch*

[A8-03] pyFDSEvac – Make It Simple – *Gregor Jäger*

[A8-04] Performance Analysis and Shared Memory Parallelisation of FDS – *Lukas Arnold*

[A8-05] Erfahrungen mit der FDS 6.1.2 OpenMP Version im Vergleich zur MPI Version für den "SP Retail Case 2 – *Bjarne Husted*

[A8-06] FDS6 – Laufzeiten und Benchmarking – *Susanne Kilian*

[A8-07] Integration und Anwendung eines 3D-Wärmeleitungsmodells in FDS6 – *Matthias Siemon*

[A8-08] Einfluss der Pyrolyseparameter auf die Brandsimulation – *Corinna Trettin*

[A8-09] Sensitivitätsanalysen mittels CFD Simulationen von U-Bahnstationen unter Berücksichtigung unterirdischer Klimamodelle – *Lukas Arnold*

[A8-10] Untersuchungen zur Personensicherheit in rauchbelasteten Rettungswegen – Anwendung der CFD Software FDS zur Quantifizierung der Personensicherheit in horizontalen Rettungswegen – *Markus Wiezorek*

[A8-11] Sensitivitätsuntersuchungen mit FDS-EVAC auf Basis von Latin-Hypercube-Sampling – *Kathrin Grewolls*

[A8-12] Parameterstudie zur Berücksichtigung von Menschen mit Behinderungen in Evakuierungssimulationen – *Kathrin Grewolls*