



Unter dem Begriff „Brandsimulation“ etabliert sich im Brandingenieurwesen eine computergestützte Rechenmethode zur Simulation der Auswirkung von Brandereignissen. Mithilfe dieser Technik werden Lösungen für zahlreiche Problemstellungen in der Bauentwurfsplanung, der Brandursachen- und Brandfolgenermittlung sowie bei der Untersuchung von Brandphänomenen erarbeitet. Der folgende Artikel gibt einen Überblick über die Anwendungsgebiete derartiger Brandsimulationsprogramme. Er zeigt Probleme und Anwendungsgrenzen am Beispiel eines weitverbreiteten und in der Praxis häufig verwendeten Brandsimulationsprogramms auf.

Brandsimulationsprogramme – Chancen und Risiken

Brandsimulationsprogramme werden mittlerweile in zahlreichen Anwendungsgebieten eingesetzt. Hierzu gehören u. a. die Bauentwurfsplanung, die Brandursachen- und Brandfolgenermittlung sowie die Untersuchung von Brandphänomenen für wissenschaftliche Fragestellungen. Bei der Absicherung von Normen und Regelwerken kommen die Programme ebenfalls zum Einsatz.

Bauentwurfsplanung

In der Bauentwurfsplanung dienen Brandsimulationsprogramme dem gesetzlich geforderten Nachweis des Brandschutzes (**Bild 1, 2**). Dies ist insbesondere für Gebäude besonderer Art und Nutzung interessant, wie z. B. Hochhäuser, Versammlungsstätten oder auch Schulen und Krankenhäuser. Die sogenannten Sonderbauten (vgl. § 2 Abs. 4 MBO) besitzen

ein höheres Risiko- und Gefahrenpotenzial und müssen entsprechend schärfere bautechnische Anforderungen erfüllen. Häufig stehen die standardisierten Anforderungen im Widerspruch zu den Wünschen des Bauherrn. Der Brandschutzplaner darf jedoch hiervon abweichen, wenn er nachweist, dass sich die vom Gesetzgeber geforderten Ziele auch mit seinen problemangepassten

Lösungen erreichen lassen. Der Nachweis kann mittels Brandsimulationen geführt werden und ermöglicht eine auf die Wünsche des Bauherrn abgestimmtere und ggf. auch kostengünstigere Bauausführung.

Die Brandsimulation berechnet die Auswirkungen eines denkbaren Brandereignisses in einem im Computer dargestellten Gebäude.

Bild 1 | Bauentwurf

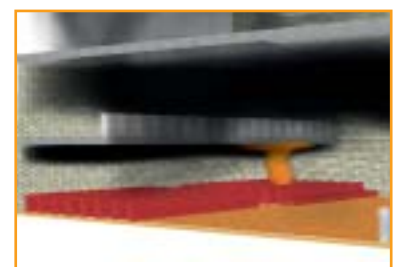


Bild 2 | Simulation der Temperaturbelastung

Hierbei untersuchte Fragestellungen sind u. a. die Verrauchung der Flucht- und Rettungswege, die Evakuierungszeiten oder die thermische Beanspruchung der Baukonstruktion. Mittlerweile wird die Möglichkeit eines derartigen Nachweises auch für kleinere Objekte wie Schulen und Einkaufszentren genutzt.

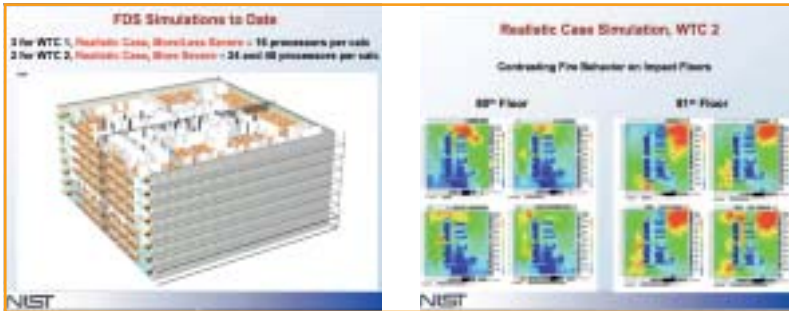


Bild 3 | Simulation der Temperaturbelastung, Quelle: NIST

Brandursachen/-phänomene

In der Brandursachen- und Brandfolgenermittlung ist die Brandsimulation zur Rekonstruktion des Schadenablaufes von Interesse. Prominentes Beispiel hierfür sind die Untersuchungen zum Schadenverlauf beim Einsturz der Gebäude des World Trade Centers am 11. September 2001.

Mithilfe von Foto- und Filmaufnahmen, Brandversuchen und Brandsimulationsrechnungen versuchte hier das National Institute of Standards and Technology (NIST) den Brandverlauf in den verschiedenen Geschossen und die Auswirkungen auf die Tragwerkskonstruktion zu ermitteln (Bild 4). [5; 6]

Ein weiteres Anwendungsgebiet der Brandsimulation ist die detaillierte Untersuchung von Brandphänomenen bzw. bestimmten Problemstellungen. Im Vergleich zum Brandversuch lassen sich in der Brandsimulation gezielt und leichter Parameterstudien durchführen und die Wirkungsweise interessierender Effekte untersuchen. Die derart gewonnenen Erkenntnisse können dann bei der Erstellung von Normen und technischen Regelwerken berücksichtigt werden. Im abgebildeten Beispiel wird der Effekt der Fenstergeometrie auf das Ausströmungsverhalten der heißen Brandgase bei mehrgeschossigen Bauwerken untersucht. Um eine Brandausbreitung auf das darüberliegende Geschoss zu vermeiden, werden Geometrien gesucht, die ein Anlegen der aus dem Fenster strömenden heißen Rauchgase an die darüber befindliche Gebäudewand erschweren [7].

Anforderungen

An Brandsimulationsprogramme stellt die Praxis des Brandingenieurwesens vielfältige Anforderungen:

- Die durch den Brand entstehenden Temperaturbelastungen der Tragwerkskonstruktion sollen vorhergesagt werden.
- Die beim Brand entstehenden Schadstoffkonzentrationen und die optische Rauchdichte sollen berechnet sowie die Rauchausbreitung prognostiziert werden.
- Der Einfluss des anlagentechnischen Brandschutzes (Löschhilfesanlagen, Rauchdetektion) auf das Brandgeschehen soll ermittelt werden.
- Die Brand- und Rauchausbreitungssimulation soll mit Evakuierungsmodellen gekoppelt sein, um die Entfluchtung von Gebäuden fallbezogen zu simulieren.

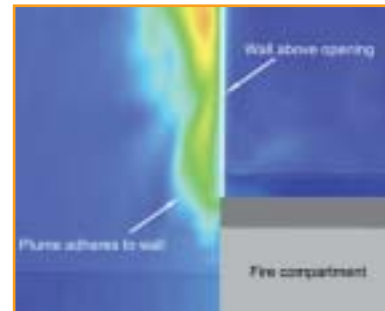
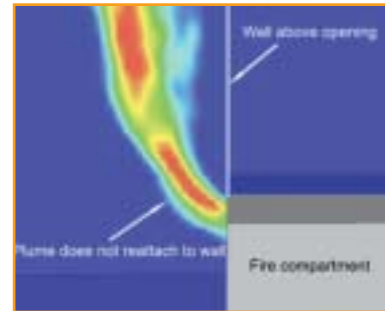


Bild 4 | Untersuchung des Ausströmungsverhaltens verschiedener Fenstergeometrien

schutzes hin zu theoretisch mathematisch-naturwissenschaftlich motivierten Methoden und Technologien. Hierbei sind Probleme zu lösen, die neue Kompetenzen und Erfahrungswerte voraussetzen. Das hierzu notwendige Wissen entstammt jedoch Fachdisziplinen, die sich bisher meist nicht mit brandschutzspezifischen Fragestellungen befasst haben. Insbesondere gehören hierzu die Numerische Strömungsmechanik, die Numerische Mathematik bzw. das Scientific Computing (Bild 5).

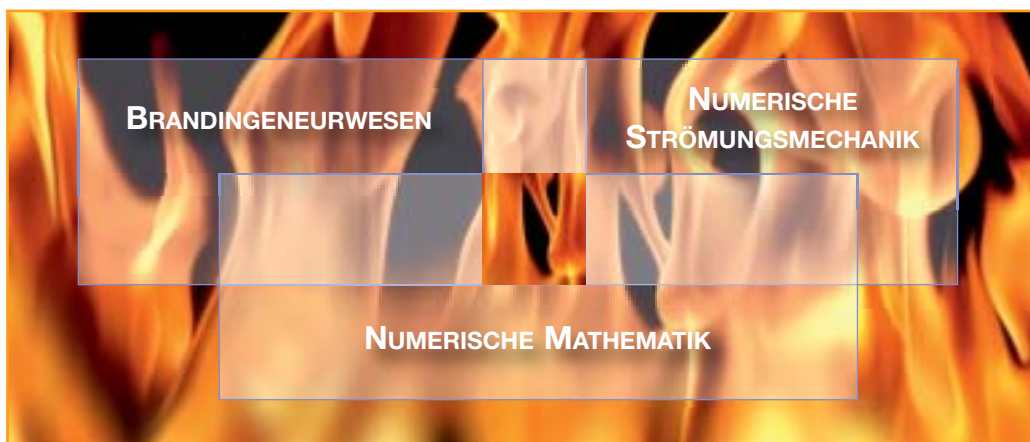


Bild 5 | Brandsimulation erfordert fachübergreifende Kompetenzen

Der Einsatz von Brandsimulationsprogrammen bedeutet einen Wechsel von den erfahrungsbasierten Methoden des Vorbeugenden Brand-

Derartige numerische Rechenverfahren unter dem Oberbegriff „Computational Fluid Dynamics“, kurz CFD, sind in anderen Anwendungs- ▶



gebieten bereits seit Längerem etabliert. Dazu zählen z. B. die Luft- und Raumfahrt, der Automobilbau sowie die Wetter- und Klimavorhersage. Für die Nutzung im Brandschutz gilt es aufgrund besonderer Schwierigkeiten, jedoch zahlreiche geeignete Lösungsansätze erst noch zu finden [1].

Ein grundsätzliches Problem ist hierbei die Tatsache, dass die zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten auch in absehbarer Zukunft nicht ausreichen werden, um die im Brandfall zu berücksichtigenden Prozesse in der höchstmöglichen Präzision mit einzubeziehen. Vor allem die Simulation des Brandes selbst bereitet noch große Schwierigkeiten und ist Gegenstand aktueller Forschung. Brandsimulationsprogramme besitzen daher eigene Spezifikationen, die auf die physikalischen und chemischen Prozesse im Brandfall zugeschnitten sein müssen. Dies erschwert einen direkten Vergleich mit CFD-Programmen aus anderen Anwendungsgebieten und erklärt die zeitliche Verzögerung in den verschiedenen Anwendungsgebieten.

Daher sind die den Brandsimulationsprogrammen zugrunde liegenden mathematisch-physikalischen Modelle immer Kompromisse zwischen der Detaillierung der berücksichtigten physikalisch-chemischen Prozesse und der Recheneffizienz.

Die resultierenden gekoppelten mathematischen Gleichungssysteme sind hochgradig nicht-linear und erfordern für eine effiziente Berechnung modernste numerische Lösungsverfahren.

Bild 6 | Die approximierte Wiedergabe einer Sinuskurve erfordert mindestens fünf Stützstellen.

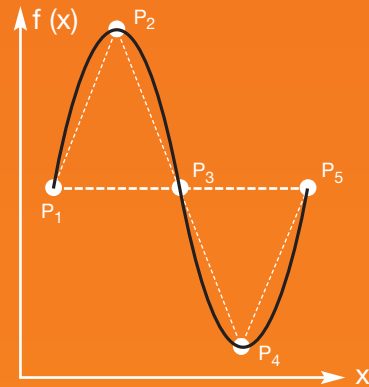
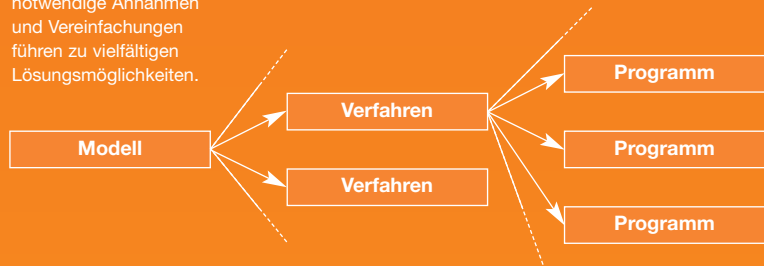


Bild 7 | Bei der Programmentwicklung notwendige Annahmen und Vereinfachungen führen zu vielfältigen Lösungsmöglichkeiten.



Von der mathematischen Gleichung zum Programm

Leider lässt sich das problembeschreibende mathematische Gleichungssystem nicht ohne weitere Annahmen und Vereinfachungen im Computer bearbeiten. Das in Form von Integral- oder Differentialgleichungen vorliegende gekoppelte Gleichungssystem muss zunächst in eine algebraische Schreibweise gebracht werden. Dieser Vorgang heißt Diskretisierung. In der Folge ist es möglich, den kontinuierlichen stetigen Verlauf einer Sinusfunktion im Computer durch eine beschränkte Anzahl von diskreten Stützstellen wenigstens näherungsweise darzustellen (**Bild 6**).

Wie die Abbildung zeigt, sind in diesem Beispiel für eine einigermaßen sinnvolle Darstellung mindestens fünf Stützstellen erforderlich. Hierbei ist auch ein wesentliches Prinzip erkennbar. Eine Erhöhung der Anzahl der Stützstellen verbessert die approximierte Wiedergabe der Kurve, erhöht jedoch auch den rechentechnischen Aufwand. Zur Diskretisierung gehört ebenfalls die Wahl eines numerischen Lösungsverfahrens, welches die Art und Weise der numerischen Abarbeitung in Teilschritten festlegt.

Allgemein ist zu sagen, dass bei der Diskretisierung zahlreiche Annahmen zu treffen sind. Dies führt zu zusätzlichen mathematisch-numerisch begründeten Beschränkungen, deren Wirkungsweise auch dem Programm-anwender bekannt sein müssen. Sowohl Anwendbarkeit und Qualität als auch Recheneffizienz des späteren Brandsimulationsprogramms sind durch den Vorgang der Diskretisierung wesentlich beeinflusst [3].

Auch die abschließende Umsetzung in einen vom Computer ausführbaren Maschinencode kann wiederum Einfluss auf die Güte des ausführbaren Programms haben. Das **Bild 7** fasst die drei beschriebenen Schritte zusammen. Es zeigt, dass aufgrund der zahlreichen versteckten Variationsmöglichkeiten aus einem mathematisch-physikalischen Modell verschiedene ausführbare Programme entstehen können. Allein eine gute Kenntnis der physikalischen Prozesse eines Brandes reicht für eine Beurteilung der Anwendbarkeit eines Programms daher nicht aus. Dies begründet die Notwendigkeit der im Bild 5 dargestellten Fachkombinationen. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in [1].

Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse

Gerade im sicherheitstechnischen Bereich stellt sich die Frage nach der Belastbarkeit der Rechenergebnisse derartiger Brandsimulationsprogramme. Die hierfür notwendigen Untersuchungen sind im CFD-Bereich unter dem Oberbegriff „Verifikation und Validierung“ zusammengefasst und berücksichtigen die in **Bild 7** dargestellten Entwicklungsschritte. Hierbei sind im Wesentlichen drei Fragen zu beantworten:

1 • Modellqualifizierung

Können die im Programm enthaltenen physikalisch-chemischen Gleichungsmodelle die zu untersuchende Realität ausreichend genau beschreiben?

2 • Modellverifikation

Liefert das Computerprogramm die von den Modellen zu erwartenden Ergebnisse? Vereinfacht ausgedrückt – sind die Modelle richtig programmiert?

3 • Modellvalidierung

Sind die berechneten Ergebnisse eine ausreichend präzise Wiedergabe der realen Welt?

Ein Brandsimulationsprogramm besteht aus einer Vielzahl von Komponenten. Die Prüfung ist sowohl für das Zusammenwirken als auch für einzelne Komponenten durchzuführen. Nur so können z.B. Kopplungsfehler ausgeschlossen werden.

Häufig fordern Anwenderkreise, dass eine solche arbeitsaufwendige Überprüfung Aufgabe des Programmherstellers sei. Entsprechend zertifizierte oder „allgemein anerkannte“ Programme könnten dann unbedenklich eingesetzt werden. Hierbei wird ver-

kannt, dass in diesen Prüfprozess auch Informationen über die jeweils konkret zu untersuchende Problemstellung einfließen. Diese sind nur dem Programmanwender vollständig bekannt. Hierzu gehören u.a. die problemabhängigen Rand- und Anfangsbedingungen sowie die erforderliche Präzisionsanforderung an die konkret zu ermittelnden Rechengrößen. Der Programmhersteller kann den Anwender bei dieser Prüfung unterstützen, indem er die Korrektheit der Programmierung der in seinen Dokumentationen beschriebenen Modellgleichungen nachweist und erfolgreiche Anwendungsbeispiele dokumentiert. Die letztliche Entscheidung der Eignung des Brandsimulationsprogramms kann jedoch nur beim Anwender liegen. Nach Wathling [4] ist in diesem Zusammenhang der Stand von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen. Die Tatsache, dass ein Programm weitverbreitet angewandt wird, ist kein Kriterium dafür, dass es auch im konkreten Anwendungsfall belastbare Ergebnisse liefert [2].

Beispiel für Anwendungsgrenzen

Verwendet der Nutzer ein Brandsimulationsprogramm, für das der Programmhersteller jegliche Gewährleistung und Garantie ablehnt, obliegt dem Anwender die gesamte Eignungsüberprüfung. Dies gilt insbesondere für Open-Source-Software wie das Programm Fire Dynamics Simulator (FDS). Veröffentlichungen in der Brandschutz-Fachpresse zeigen, dass Brandschutzplaner dieses Programm seit Jahren in der Praxis einsetzen. Im Spannungsfeld zwischen Recheneffizienz und Präzision haben sich die FDS-Programmierer

auf die Entwicklung eines sehr recheneffizienten Programms festgelegt. In der Konsequenz haben sie teilweise allerdings erhebliche Kompromisse zulasten der Präzision gemacht. Eine Stichproben-Untersuchung zeigt, dass das Programm dabei auch ein grundlegendes CFD-Kriterium verletzt. Wird das betrachtete Gesamtraumvolumen in einzelne Teilvolumina zerlegt, lassen sich diese Teilvolumina auf Parallelrechnern gleichzeitig berechnen. Diese Gebietszerlegung darf die berechnete Lösung jedoch nicht beeinflussen.

Bild 8 zeigt den Vergleich von zwei identischen Rechnungen eines Brandschachtes, die sich nur durch eine solche Gebietszerlegung unterscheiden. Deutlich sind große Unterschiede in der berechneten Temperaturverteilung zu erkennen. Dies ist ein gravierender Fehler.

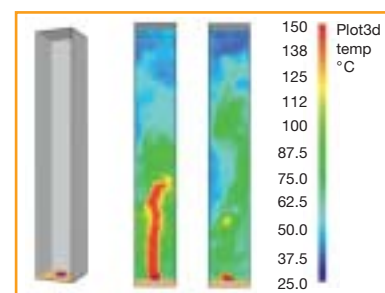


Bild 8 | Darstellung der Temperaturverteilung bei der Simulation eines Brandschachtes mit FDS Version 5.2. In der rechten Darstellung ist das Rechengebiet intern in zwei gleich große, übereinanderliegende Teilvolumina zerlegt. Die fehlerhaften Ergebnisabweichungen aufgrund dieser Zerlegung sind deutlich erkennbar.

Auch wenn in zukünftigen Versionen derartige Fehler sicherlich behoben sind, zeigt das Beispiel die Notwendigkeit einer gründlichen Validierungs- und Verifikationsprüfung durch den Anwender. ▶



Zusammenfassung

Die Verwendung numerischer Rechenverfahren zur Berechnung der Brand- und Rauchausbreitung ermöglicht neue, interessante Einsichten in den Ablauf von Brandprozessen. Für belastbare Ergebnisse sind jedoch neben der Brandschutzexpertise zusätzliche Erfahrungen und fundierte Kenntnisse aus Fachdisziplinen wie der Numerischen Strömungsmechanik und der Numerischen Mathematik erforderlich, um potenzielle

Schwachstellen überhaupt erkennen zu können. Eine entsprechende Ausbildung ist daher eine notwendige Voraussetzung für belastbare Simulationsergebnisse. Blindes Vertrauen in realitätsnah erscheinende Darstellungen kann schnell zu falschen Interpretationen mit möglicherweise katastrophalen Folgen führen.

Von einer „Brandsimulation am PC“ kann keine Rede sein, die beispielsweise mit der Bedienung eines Büro-

Tabellenkalkulationsprogramms vergleichbar ist. Vielmehr sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um bestehende Modellierungsprobleme und Unsicherheiten in der Brandsimulation zu beheben. ■

Matthias Münch
Interessengruppe Numerische
Risikoanalyse (INURI)
c/o Freie Universität Berlin
FB Mathematik & Informatik



Die Interessengruppe Numerische Risikoanalyse (INURI) ist ein Zusammenschluss von Wissenschaftlern und Ingenieuren verschiedenster Fachdisziplinen, wie z.B. der Architektur, der Strömungsmechanik, der Numerischen Mathematik und des Brandschutzes. Zu den Zielen der Interessengruppe gehört die Bewertung von numerischen Simulationsmethoden sowie der Aufbau von Beratungs-, Dienstleistungs- und Fortbildungsangeboten für deren Anwendung im Brandschutz. Nähere Informationen sind unter www.inuri.de zu finden.

Literatur

- [1] Münch, Matthias, Klein, Rupert:
Anforderungen an numerische Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung im Vorbeugenden Brandschutz, S. 145-151, Heft 3, August 2008, vfdb-Zeitschrift, Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart
- [2] Münch, Matthias, Klein, Rupert:
Critical numerical aspects for field model applications. EUSAS Journal No. 4, July 2008, S. 41-54. European Society for Automatic Alarm Systems (EUSAS) e. V., Duisburg, Germany
- [3] Münch, Matthias:
Kritische Numerische Aspekte bei der Anwendung von Feldmodellen. 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Tagungsband, Salzburg, S. 255-289. vfdb – Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (Hrsg.), Postfach 1231, 48338 Altenberge, 2006
- [4] Wathling, Klaus-Dieter:
Akzeptanz und Bewertung der ingenieurmäßigen Verfahren aus Sicht der Bauaufsicht. S. 177-183, Heft 4, 2007, vfdb-Zeitschrift, Verlag W. Kohlhammer GmbH, Stuttgart

- [5] Rehm, Ronald G., Pitts, William M., Baum, Howard R., Evans, David D., Kuldeep, Prasad, McGrattan, Kevin B., Forney, Glenn P.:
Initial Model for Fires in the World Trade Center Towers NISTIR 6879, May 2002, National Institute of Standards and Technology, USA
- [6] Kirkpatrick, Steven W., Bocchieri, Robert T., Sadek, Fahim, MacNeill, Robert A., Holmes, Samuel, Peterson, Brian D., Cilke, Robert W., Navarro, Claudia:
Analysis of Aircraft Impacts into the World Trade Center Towers Chapters 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. NIST NCSTAR 1-2B; 290 p. September 2005, National Institute of Standards and Technology, USA
- [7] Harrison, Roger, Spearpoint, Michael:
Thermal Spill Plumes. 9. International Symposium on Fire Safety Science, 21-26 September 2008, Karlsruhe