



Brandsimulationen – dem Feuer virtuell auf der Spur

Sowohl der Wunsch als auch der Versuch des Menschen, Feuer und dessen Erscheinungen (Auswirkungen) beschreiben und vorhersagen zu können, ist wahrscheinlich so alt wie die Nutzbarmachung des Feuers selbst. Während die Versuche einer Vorhersage in Bezug auf das Verhalten von Feuererscheinungen bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts weitgehend auf die Beobachtungen von brennenden Objekten und die Übertragung der Rückschlüsse aus diesen Beobachtungen auf andere Objekte beschränkt blieben, werden seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts mathematische Methoden angewandt, um Feuererscheinungen berechenbar und vorhersagbar zu machen.^[1]

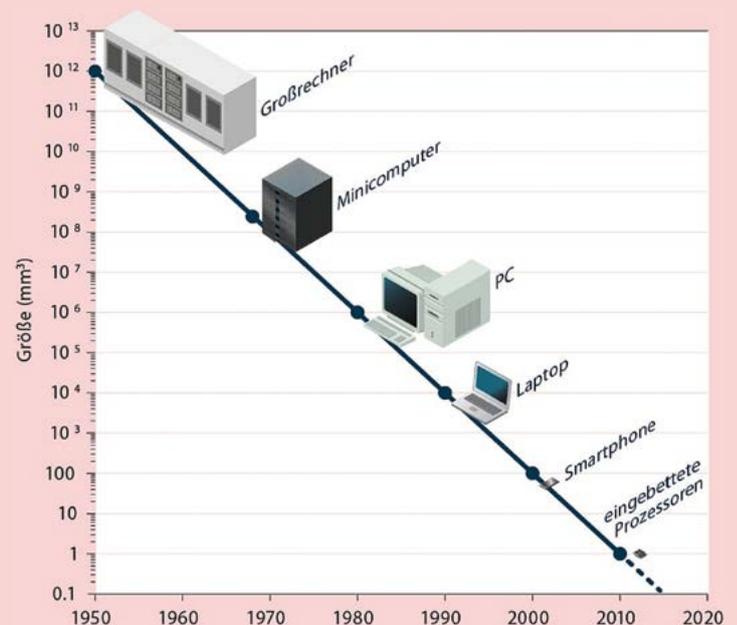
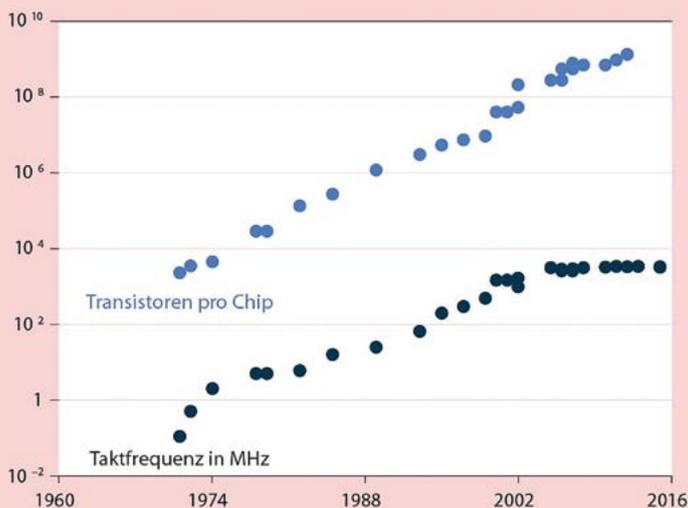


Bild 1 / Entwicklung der Transistoranzahl auf Computerchips als Maß der Leistungsfähigkeit in den letzten 50 Jahren (*links*): Mit der wachsenden Rechenleistung und der damit einhergehenden Größenänderung entstanden neue Generationen von Rechengenäten (*rechts*).
 Quelle: © NATURE, NACH: INTEL (*LINKS*); SIA / SRC (*RECHTS*); AUS WALDROP, M.M.: MORE THAN MOORE. IN: NATURE 530, S. 144-147, 2016;
 DT. BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (AUSSCHNITT)



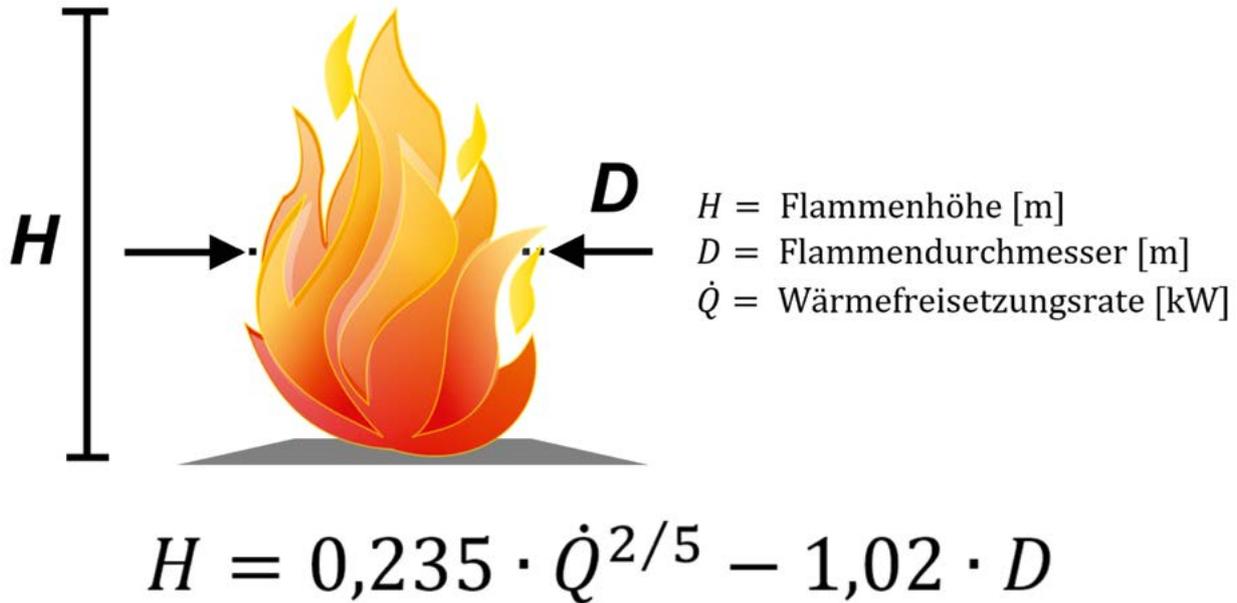


Bild 2 / Die Berechnung der Flammenhöhe H mit der Plume-Formel nach Hekstad als Beispiel für eine einfache Handrechenformel

Die dabei eingesetzten Methoden und mathematischen Modelle wurden seit dieser Zeit, vor allem dank der rasant fortschreitenden Entwicklung der Computertechnologie, ständig weiterentwickelt und verbessert (Bild 1).

Dieser Artikel soll einen Einblick in den Stand der Technik von Brandsimulationen geben und aufzeigen, welche Möglichkeiten die Anwendung dieser Methode auf die Untersuchung realer Brandereignisse bietet.

Handrechenverfahren

Am Anfang dieser Entwicklung standen vergleichsweise einfache Handrechenverfahren, die, wie der Name schon andeutet, sozusagen per Hand gelöst werden konnten. Mithilfe von empirischen Formeln können zum Beispiel Abbrandraten und Temperaturen von Brandlasten berechnet werden.

Auf Bild 2 ist beispielhaft die Formel zur Berechnung der mittleren Flammenhöhe eines Lachenbrandes in Abhängigkeit

von der Wärmefreisetzungsrate und dem Lachendurchmesser dargestellt. Die mithilfe von Handrechnungen ermittelten Werte beziehen sich dabei auf einen bestimmten Zeitpunkt des Brandes.

Der zeitliche Verlauf und die Veränderung der betrachteten Größen können mit Handrechenverfahren nur eingeschränkt bestimmt werden.^[2]

Trotz dieser Einschränkungen kommen Handrechenverfahren auch in der heutigen Zeit zum Einsatz, zum Beispiel um einfache Brandphänomene zu beschreiben oder Simulationsergebnisse aufwendigerer Verfahren zu überprüfen. Für Berechnungen mittels Handrechenverfahren wird heutzutage auch auf Tabellenkalkulationssoftware zurückgegriffen, mit der eine Vielzahl von wiederholenden Berechnungen schnell durchführbar ist.^[1]

Eine umfangreiche Sammlung von Excel-Arbeitsblättern wird unter dem Namen Fire Dynamic Tools von der U.S. Nuclear Regulatory Commission auf deren Webseite frei zur Verfügung gestellt.^[3]

Zonenmodelle

Die seit etwa Mitte der Siebzigerjahre des letzten Jahrhunderts eingesetzten Zonenmodelle zur mathematischen Beschreibung von Bränden stellen den nächsten Schritt hinsichtlich der Abbildungstiefe der Realität von Brandsimulationen dar. Bei diesen Verfahren wird der Brandraum bei den meisten Berechnungen in zwei Zonen unterteilt - eine untere kalte Zone und eine obere heiße Zone (Bild 3). ▶

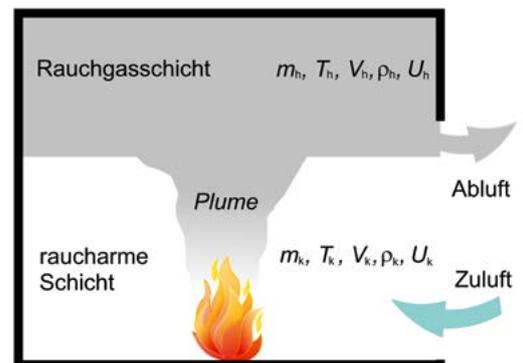


Bild 3 / Schematische Darstellung eines Zwei-Zonen-Modells [m = Masse, T = Temperatur, V = Volumen, p = Dichte und U = innere Energie der kalten raucharmen Schicht (k) und der heißen Rauchgasschicht (h)]

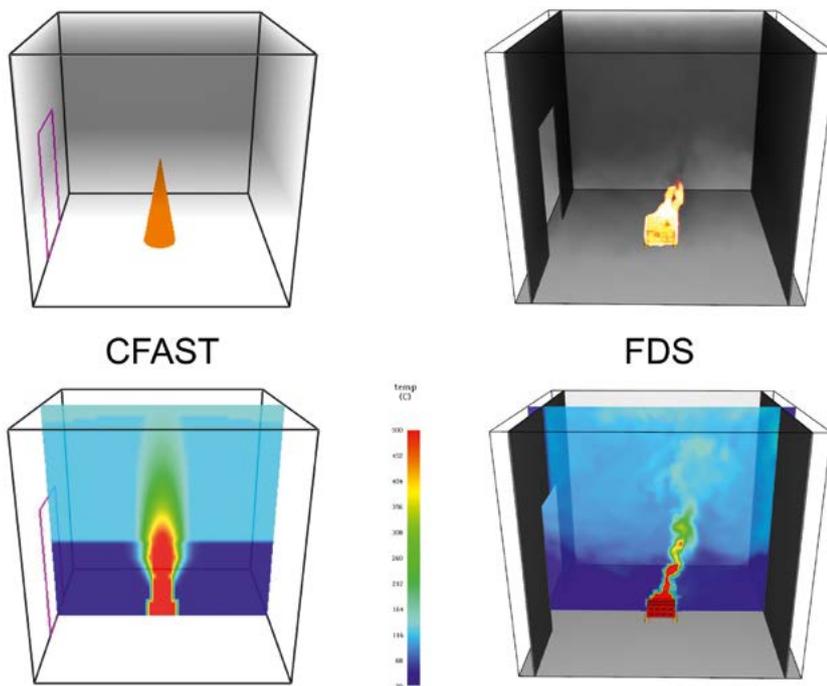


Bild 4 / Vergleichende Darstellung einer Brandsimulation mittels Feldmodell (CFAST, links) und mittels CFD-Modell (FDS, rechts): Simuliert wurde der Abbrand eines Holzstapels. Dargestellt sind die Wärme-freisetzungsrates / Rauchausbreitung (oben) und die Temperaturverteilung (unten).

In der oberen heißen Zone sammeln sich die Rauchgase an, sodass man hier von der Rauchsicht spricht, während die untere Zone als raucharme Schicht bezeichnet wird. Die Grenze dieser Schichten verschiebt sich dabei im Brandverlauf durch die aufsteigenden heißen Brandgase, den sogenannten Plume. Der Stoff- und Energietransport zwischen diesen Zonen erfolgt ausschließlich über den Plumestrom und wird mathematisch mit empirisch abgeleiteten Plumeformeln beschrieben. Der Stoff- und Energieaustausch durch Zu- und Abluftflächen des Brandraums wird über Erhaltungsgleichungen berücksichtigt. Die Unterteilung des Brandraumes in nur zwei Zonen (in fortschrittlichen Zonenmodellen können auch mehr als zwei Zonen berechnet werden, aber auch bei diesen bleibt die Anzahl begrenzt) hat jedoch zur Folge, dass zu jedem betrachteten Zeitpunkt nur über die gesamte Zone gemittelte Werte der betrachteten physikalischen Größen – Temperatur, Stoffkonzentration etc. – für einen Brandraum ermittelt werden können. Lokale Änderungen dieser Größen, z. B. die lokale Erwär-

mung bestimmter Objekte oder Bauteile innerhalb der Brandraumgeometrie, sind dadurch nur stark vereinfacht berechenbar. Trotz dieser Einschränkungen bieten Zonenmodelle aufgrund des wesentlich geringeren Rechenaufwandes im Vergleich zu Simulationen mit den komplexeren Feldmodellen ein wertvolles Hilfsmittel für den Einsatz bei einfachen Geometrien, wie z. B. großen Hallenbauten.

Zur Berechnung von Brandszenarien mit Zonenmodellen kann auf nicht kommerzielle Softwarepakete, wie z. B. CFAST (NIST)^[4] und B-RISK (Colleen Wade, BRANZ Ltd, New Zealand)^[5], zurückgegriffen werden.

Feldmodelle

Infolge der wachsenden Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer Rechner-systeme stehen heute zur Berechnung von Brandphänomenen Methoden zur

Verfügung, die auf Feldmodellen basieren und für deren Berechnung aufgrund ihrer Komplexität bis vor wenigen Jahrzehnten noch Hochleistungsrechner nötig waren. Mit der Anwendung von Feldmodellen, auch numerische Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD) genannt, konnte gegenüber älteren Modellansätzen, wie Handrechenverfahren oder Zonenmodellen, der Detailgrad der Berechnungen deutlich erhöht werden (**Bild 4**). Bei diesen CFD-Modellen wird die Brandraumgeometrie in eine endliche Anzahl von Volumenelementen zerlegt, für welche die interessanten physikalischen Größen (Temperatur, Dichte, Druck etc.) berechnet werden. Die Geometrie des Brandraums, dessen Zu- und Abluftöffnungen sowie weitere Faktoren des Brandobjektes können nahezu realitätsgetreu erfasst und abgebildet werden. Die Berechnungen von CFD-Modellen basieren auf der Lösung partieller Differentialgleichungen für die Masse-, Energie- und Impulserhaltung, welche nicht mehr analytisch zu lösen sind. Zum Lösen dieser Gleichungssysteme kommen verschiedene numerische Verfahren zum Einsatz. Durch die Art der Berechnung sind bei der Kenntnis der Eingangsparameter detaillierte Aussagen zu lokalen Auswirkungen, wie zum Beispiel der Temperaturentwicklung oder der Rauchbelastung, möglich. Zudem kann mit modernen Visualisierungsansätzen ein Brandverlauf realitätsgetreu nachverfolgt werden. Erfahrungsgemäß steigt mit dem Realitätsgrad der Visualisierung auch die Verständlichkeit von Antworten auf branddynamische Vorgänge bei fachfremden Beobachtern, was zur Verbreitung und Akzeptanz von CFD-Berechnungen von Brandsimulationen beigetragen hat. Zur Erstellung von Brandsimulationen mit CFD-Modellen steht eine Reihe von kommerziellen und nicht kommerziellen Programmen zur Verfügung. Als Beispiele seien das kommerzielle Softwarepaket Ansys-CFD von Ansys, Inc. und das nicht kommerzielle Programm Fire Dynamics Simulator (FDS)^[6], welches vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelte wurde, genannt.

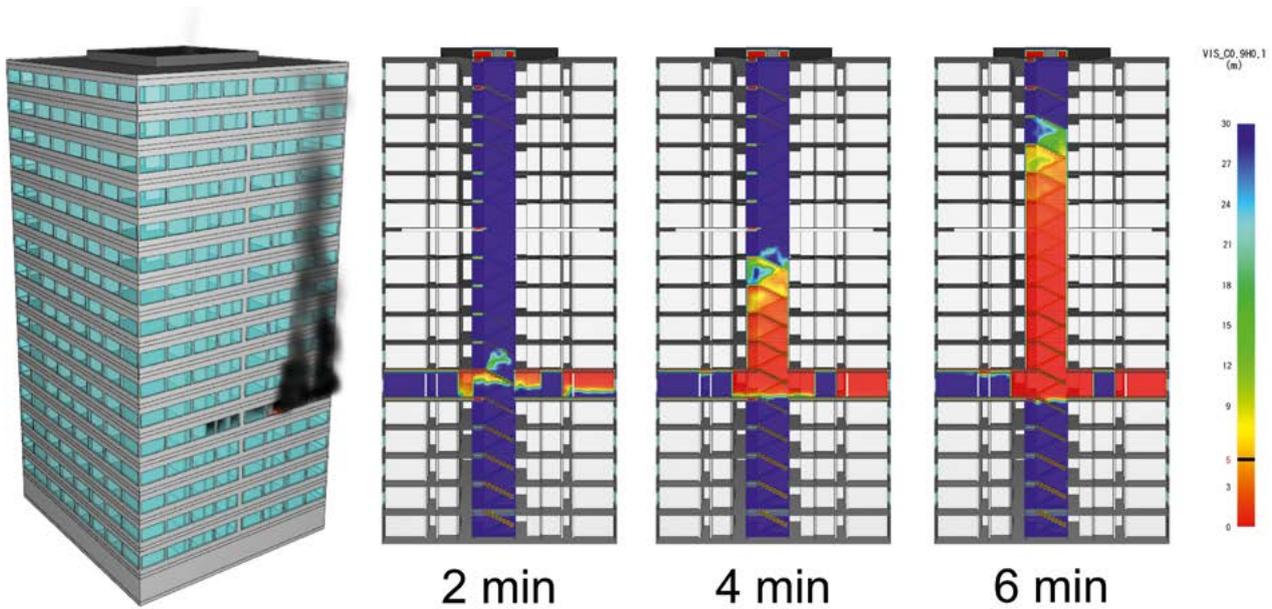


Bild 5 / Simulation der Rauchausbreitung im Treppenraum eines Hochhauses bei einem Brandereignis in einer Wohneinheit im fünften Obergeschoss und des Versagens einer Rauchschtür: Die Schnittbilder zeigen in einer Fehlfarbandarstellung die zeitlichen Veränderungen der Sichtweite im Treppenraum. In roter Farbe sind Bereiche dargestellt, in denen die Sichtweite unterhalb von 5 m liegt und die somit nicht mehr als Fluchtweg geeignet sind.

Anwendung

Mit CFD-Modellen erstellte Brandsimulationen stellen mittlerweile ein weitverbreitetes und nicht mehr wegzudenkendes Hilfsmittel im vorbeugenden Brandschutz dar.^[7] Diese Simulationen werden dort zur Erstellung von Brandschutzkonzepten und zum Nachweis des Erreichens brandschutztechnischer Schutzziele bei komplexen Fragestellungen eingesetzt und haben sich in diesem Themengebiet aufgrund der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten in den letzten Jahren schnell etabliert. Mithilfe der Simulationen ist es zum Beispiel möglich, den Nachweis der Wirksamkeit der vorgesehenen Brandschutzmaßnahmen bezüglich der Einstellung schutzzielorientierter Verhältnisse von der Sichtweite, der Temperatur und der Stoffkonzentration (z. B. Kohlenstoffmonoxid und Cyanwasserstoff) zu führen. Die Einhaltung definierter Grenztemperaturen und Rauchbelastung auf den baulichen Rettungswegen kann überprüft werden (**Bild 5**). Des Weiteren kann anhand der Simulationsergebnisse die Temperaturbelastung von Bauteilen ermittelt werden, um so mithilfe statischer Berechnungen Rückschlüsse auf die Möglichkeit eines Versagens im Brandfall zu treffen.

Mit dem A-posteriori-Einsatz von Brandsimulationen, etwa als Hilfsmittel der Brandursachenermittlung oder der retrospektiven Analyse von Brandereignissen, eröffnete sich ein weiteres Einsatzgebiet von Brandsimulationen, welches mehr und mehr an Bedeutung gewinnt.

Auch die Zahl der Veröffentlichungen zum Einsatz von Brandsimulationen in der Nachbetrachtung von Brandereignissen nimmt ständig zu.

Im englischsprachigen Raum seien beispielhaft dafür die technischen Berichte des NIST zum Einsatz von Brandsimulationen genannt.^[8, 9, 10] Wurden in diesen Berichten noch in den 2000er-Jahren Brandsimulationen nur bei ausgewählten, besonders verhängnisvollen Brandereignissen, wie zum Beispiel den Untersuchungen zu den Terroranschlägen vom 11. September^[8] oder dem Brand im Station Night Club^[9], eingesetzt, so finden in jüngerer Zeit auch vermehrt Untersuchungen des NIST mithilfe von Brandsimulationen von Bränden kleineren Ausmaßes statt.^[10] Häufig wurden dabei Brandereignisse betrachtet, bei denen Opfer unter den Einsatzkräften

der Feuerwehr zu beklagen waren. Mithilfe der Brandsimulationen sollte geklärt werden, welche Umstände zu diesen Verlusten geführt haben und welche Erkenntnisse bezüglich der Einsatztaktik oder der baulichen Vorschriften sich daraus ableiten lassen, um diese künftig zu vermeiden. Auch von deutschen Arbeitsgruppen sind mittlerweile Veröffentlichungen zu Untersuchungen von Brandereignissen mithilfe von Brandsimulationen verfügbar, zum Beispiel die Veröffentlichungen zu forensischen Untersuchungen von Frau Dr. Hofmann-Böllinghaus et al. (BAM).^[11] Im IFS werden seit einiger Zeit computergestützte Brandsimulationen als ergänzendes Hilfsmittel in der Nachbetrachtung von Brandereignissen eingesetzt. Zum Einsatz kommt dabei das Programm FDS, eines der bekanntesten und am weitesten verbreiteten Brandsimulationsprogramme. Die Methode wurde erfolgreich zur Gefährdungsbeurteilung und zur Plausibilisierung von Brandverläufen bei strafrechtlichen Fragestellungen angewendet. Aber auch zu versicherungsrelevanten Fragestellungen, zum Beispiel im Schadenmanagement, konnten Brandsimulationen in der retrospektiven Betrachtung von Brandereignissen bereits erfolgreich eingesetzt werden. ▶



Beispiel 1 | Brand in einem Mehrfamilienhaus

Ein Brand in einem Mehrfamilienhaus überrascht dessen Bewohner in den frühen Abendstunden eines Januartages. Bemerkt wird der Brand von einem Bewohner, der in seiner Wohnung den Alarmton eines Rauchwarnmelders aus dem Treppenraum wahrnimmt. Bei der Nachschau stellt der Bewohner den Brand in einer Wohnung im Erdgeschoss fest. Der Brand ist zu diesem Zeitpunkt bereits so weit entwickelt, dass die Brandwohnung kurz vor dem Vollbrand steht, es dringen beträchtliche Rauchmengen in den Hausflur. Der Brandentdecker alarmiert die Feuerwehr und versucht die Bewohner des Hauses zu warnen. Die meisten Bewohner des Hauses sind zum Zeitpunkt der Brandentdeckung zu Hause. Trotz der Bemühungen des Brandentdeckers, alle Bewohner zu alarmieren und des schnellen Eingreifens der Feuerwehr

schaffen es einige Bewohner nicht mehr, sich aus eigener Kraft in Sicherheit zu bringen, und können erst durch die Einsatzkräfte der Feuerwehr gerettet werden. Für einen Bewohner des Hauses kommt aber jede Hilfe zu spät. Er wird bewusstlos in seiner Wohnung im ersten Obergeschoss aufgefunden und verstirbt trotz sofort eingeleiteter notfallmedizinischer Versorgung auf dem Weg in das Krankenhaus.

Zur Bewertung des Brandgeschehens gibt die untersuchende Polizeibehörde ein Gutachten zur Brand- und Rauchausbreitung in Auftrag. Die Rekonstruktion des Brandobjektes erfolgt anhand von vorhandenen Bauunterlagen und anhand von nach dem Brand angefertigten 3D-Scannerdaten des Gebäudes (**Bild 6**).

Das Brandgeschehen wurde anhand eines Bemessungsbrandes nach Ingenieurmethoden nachgestellt, der die vorhandene Brandlast und den

zeitlichen Verlauf abbildet.^[7] Dabei handelt es sich um eine quantitative Beschreibung des möglichen Brandverlaufes in Form von zeitabhängigen spezifischen Parametern (Wärmefreisetzungsrate, Rauchentwicklungsrate).

Die Brandentwicklungsgeschwindigkeit wurde mit einem sogenannten t^2 -Ansatz beschrieben, wobei von einer mit der Zeit exponentiell wachsenden Wärmefreisetzungsrate ausgegangen wird.^[12]

Für die vorliegende Brandwohnung wurde von einer mittleren Brandentwicklungsgeschwindigkeit ausgegangen. Zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Umgebungsbedingungen innerhalb des Brandobjektes wurden Schnittebenen durch die Simulationsgeometrie gelegt, um sowohl die Flammen- und Rauchausbreitung als auch die damit einhergehende zeitliche Veränderung der Messgrößen, welche die kritischen Bedingungen für eine



Bild 6 / Rekonstruktion des Brandobjektes anhand der 3D-Scannerdaten des Gebäudes und der Gebäudepläne
(Die Brandwohnung im Erdgeschoss ist rot markiert. Die Wohnung des Opfers im ersten Obergeschoss ist gelb markiert)

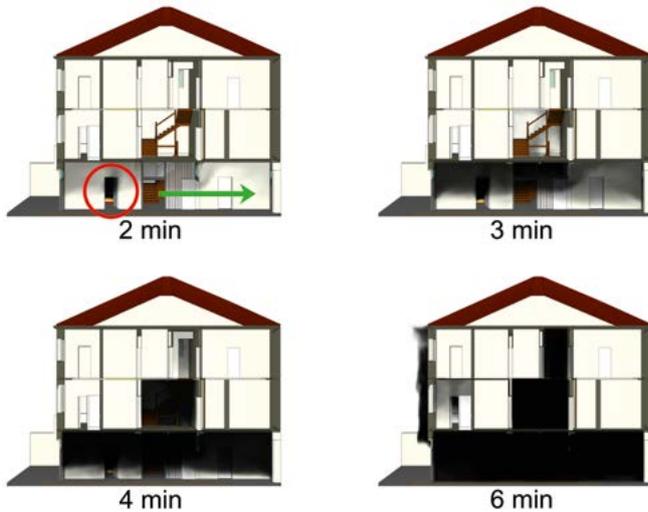


Bild 7 / Zeitliche Entwicklung der Rauchausbreitung im Gebäude:
Die Wohnungseingangstür der Brandwohnung im Erdgeschoss ist mit einem roten Kreis markiert. Der grüne Pfeil markiert den Fluchtweg der Bewohner. Innerhalb kürzester Zeit sind der Erdgeschossflur und der gesamte Treppenraum mit Brandrauch gefüllt.

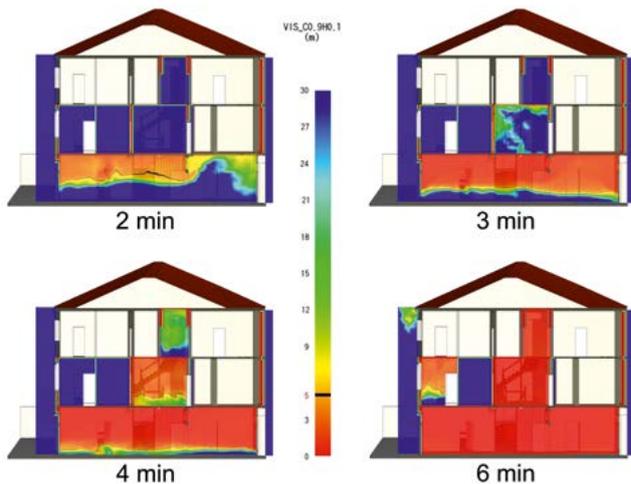


Bild 8 / Fehlfarbenanstellung der zeitlichen Entwicklung der Sichtweite im Gebäude:
Mit der Rauchausbreitung innerhalb des Gebäudes sinkt die Sichtweite sehr schnell unter den für eine erfolgreiche Flucht kritischen Wert.

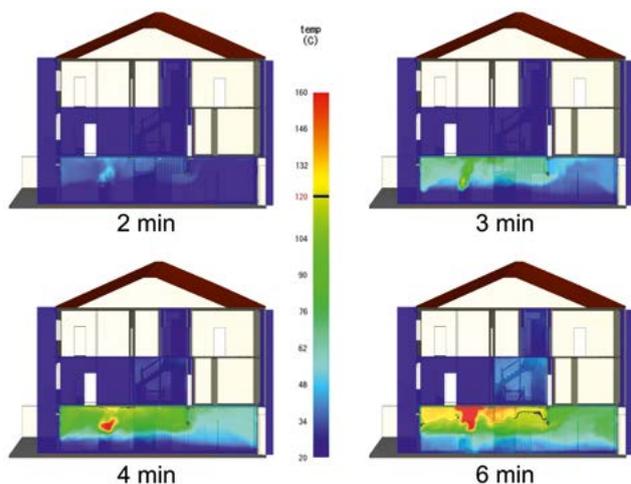


Bild 9 / Fehlfarbenanstellung der zeitlichen Entwicklung der Temperatur im Gebäude:
Die aus der Brandwohnung dringenden heißen Brandgase führen zu einer Temperaturerhöhung im Bereich des Rettungsweges, welche eine erfolgreiche Flucht behindert.

Selbstrettung charakterisieren (Temperatur, Sichtweite, Kohlenstoffmonoxidkonzentration), innerhalb des Gebäudes visualisieren zu können. Außerdem wurden an den zur Beurteilung des Brandgeschehens kritischen Stellen in der Simulationsgeometrie die zeitliche Entwicklung der Messgrößen mithilfe von virtuellen Sensoren erfasst. Die Simulationsergebnisse sind auf den Bildern 7 – 9 dargestellt.

Die durchgeführte Simulation des Brandgeschehens dokumentiert, wie schnell sich die Bedingungen innerhalb des Gebäudes verändern. Innerhalb weniger Minuten breiten sich die freigesetzten Rauchgase durch die offene Wohnungseingangstür der Brandwohnung in den Erdgeschossflur und den Treppenraum aus. Mit den Brandgasen wird Wärmeenergie aus dem Brandraum transportiert, der eine zusätzliche Gefahr für die Flüchtenden darstellt. Dadurch kam es nach wenigen Minuten zu einem Versagen des Fluchtweges der Bewohner der oberen Etagen durch den Treppenraum.

Für den verstorbenen Bewohner der Wohnung oberhalb des Brandraums bedeutete dieser Umstand, dass er sich den sich schnell verschlechternden Bedingungen durch den Raucheintrag in seine Wohnung, die hauptsächlich durch den Deckenaufbau der darunterliegenden Brandwohnung erfolgte, aus eigener Kraft nicht entziehen konnte. Die Flucht durch den Treppenraum war dem Bewohner durch das Brandgeschehen – die daraus resultierende schnelle Rauchausbreitung im gesamten Haus und die Wärmeentwicklung – auf dem Fluchtweg unmöglich.

Eine Flucht oder ein Barmachen über die Fenster der Wohnung, und somit die mögliche Nutzung des zweiten Rettungsweges, blieben dem Bewohner durch den massiven Rauchaustag aus der darunterliegenden Brandwohnung ebenfalls verwehrt. Das Opfer war in seiner Wohnung eingeschlossen. Die Ergebnisse der Simulation flossen im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung in die juristische Bewertung des Brandgeschehens ein. ▶

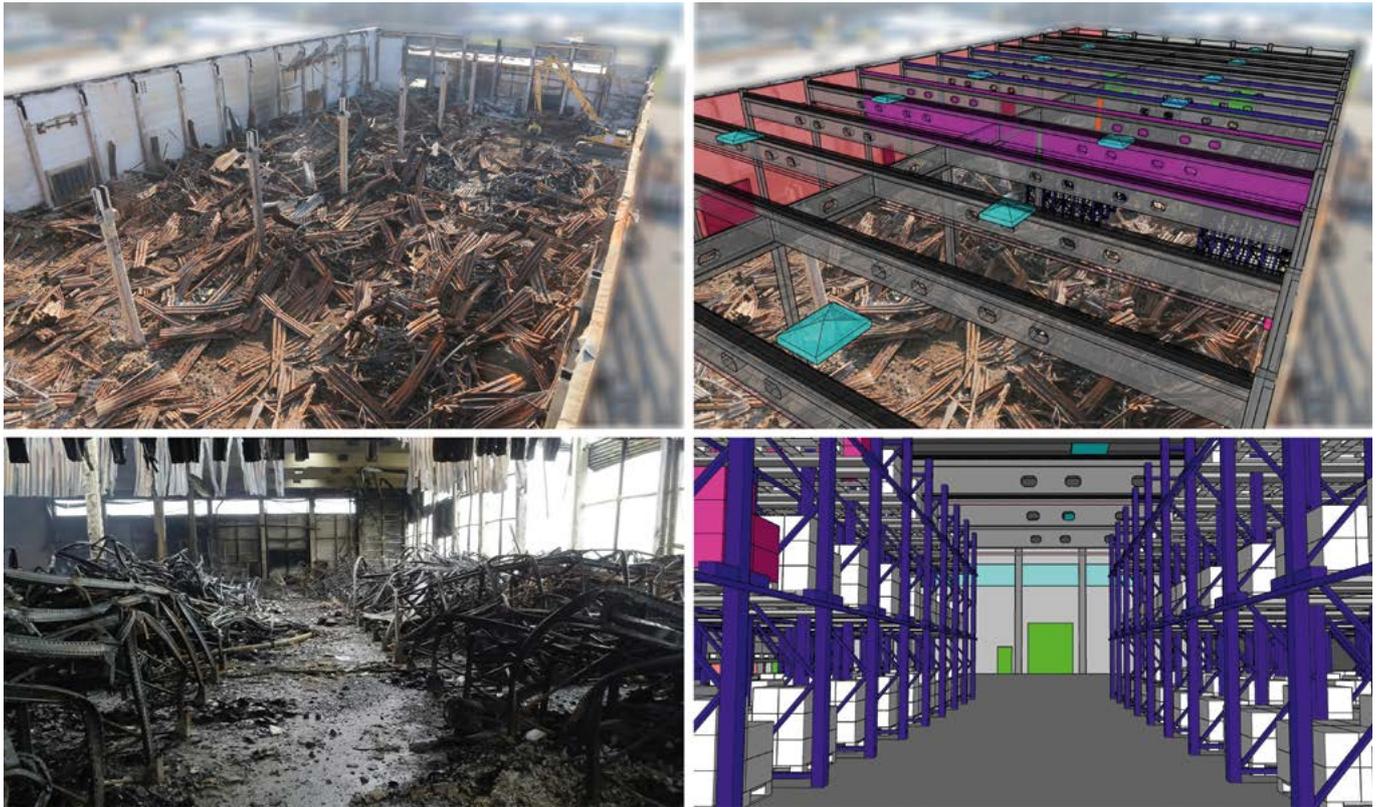


Bild 10 / Rekonstruktion einer weitgehend zerstörten Lager- und Logistikhalle: Die Gebäudegeometrie (oben) und die Regallager (unten) werden anhand der Gebäudepläne und Fotos des Schadenobjektes virtuell in den Zustand vor dem Brand versetzt.

Beispiel 2 | Brand in einer Lager- und Logistikhalle

Bei einem Brand wird eine Lager- und Logistikhalle vollständig zerstört. Die nach dem Brandereignis eingeleiteten Untersuchungen zur Brandursache führen zu einem elektrotechnischen Defekt innerhalb des Lagergutes an zwei möglichen Regalpositionen des Lagerbereiches der Halle. Da die beiden potenziellen Brandausbruchsstellen in den Verantwortungsbereich unterschiedlicher Nutzer fallen, war es für das Schadenmanagement von entscheidender Bedeutung zu erfahren, an welcher Stelle genau das Feuer entstanden ist.

Um diese Frage beantworten zu können, wurde eine Reihe von Simulationen zur Rauchausbreitung in der Entstehungs-

phase des Brandes innerhalb der Halle erstellt. Dazu wurde zunächst die bei dem Brand weitgehend zerstörte Halle anhand von Gebäudeplänen und Fotos virtuell wiederaufgebaut (**Bild 10**).

Das Regallager und das Lagergut wurden unter Zuhilfenahme von Lagerlisten im Brandobjekt verteilt. Durch eine Auswertung der Alarmprotokolle der Brandmeldeanlage war die Auslöserienfolge der in der Halle installierten linienförmigen Rauchmelder bekannt.

Durch einen Vergleich der Auslöserienfolge der virtuell in der Simulation platzierten Rauchmelder – an identischen Positionen und mit identischen Auslösecharakteristika der tatsächlich in der Halle verbauten Rauchmelder – sollte überprüft werden, ob sich die Auslöserienfolge in den beiden

verschiedenen Brandausbruchsbereichen unterscheidet und wenn ja, in welchem Brandausbruchsbereich die Auslöserienfolgen übereinstimmen.

Die durchgeführten Simulationen zeigten, dass sich die Rauchausbreitung innerhalb der Halle in den beiden möglichen Brandausbruchsbereichen trotz des nur geringen räumlichen Abstandes zueinander signifikant unterscheiden (**Bild 11**).

Begünstigt wurde dieser Umstand durch die spezielle Hallengeometrie. Die unterschiedliche Rauchausbreitung führt zu verschiedenen Auslöserienfolgen der Rauchmelder, sodass anhand der Simulation eindeutig festgestellt werden konnte, in welchem Regallagerbereich das Schadenfeuer seinen Ursprung hatte.

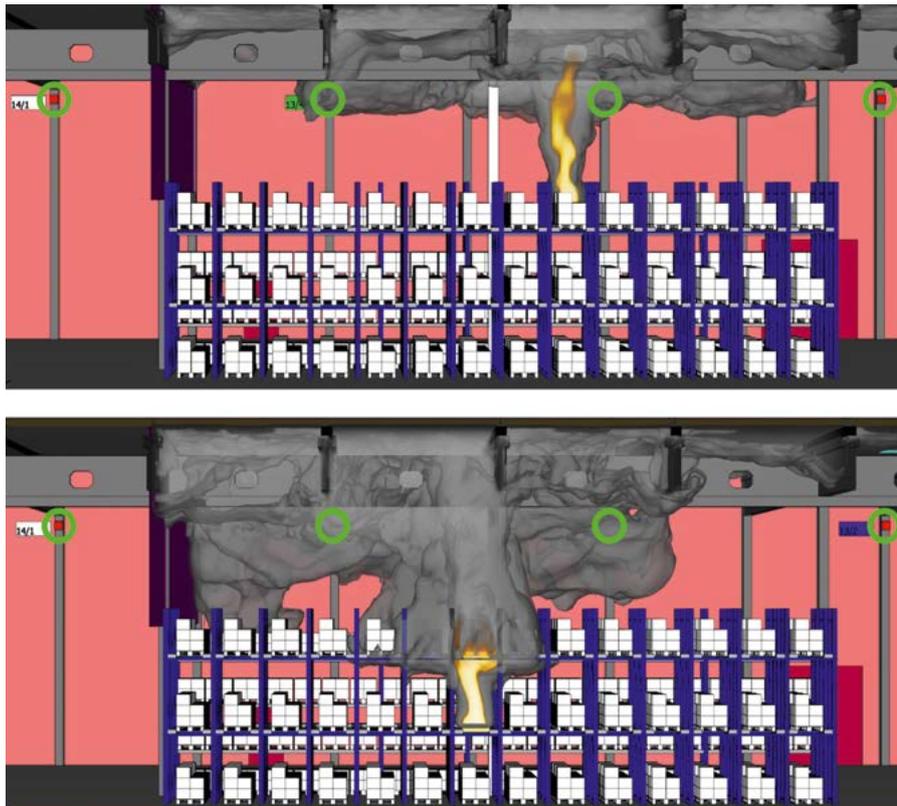


Bild 11 / Unterschiedliche Rauchausbreitung oberhalb der beiden als Brandausbruchsbereich infrage kommenden Lagerbereiche: Die Positionen der Linienrauchmelder sind mit grünen Kreisen markiert.

▲ Fazit und Ausblick

Brandsimulationen stellen ein neues wertvolles Hilfsmittel zur Analyse und Rekonstruktion von Brandereignissen dar. Die Anwendungsgebiete reichen dabei von der Gefährdungsbeurteilung über Plausibilitätsstudien bis hin zur ergänzenden Brandursachenermittlung.

Die gewonnenen Ergebnisse lassen sich anschaulich dreidimensional visualisieren und können so auch einem fachfremden Publikum nähergebracht werden.

Durch die fortschreitende Entwicklung der Digitalisierung werden sowohl der Einfluss als auch die Nachfrage nach Simulationstechnik bei der Untersuchung von Brandereignissen zunehmend an Bedeutung gewinnen und weiter wachsen. ▲

Weitere Informationen zu den Einsatzmöglichkeiten der Brandsimulation im Schadenmanagement und im Riskmanagement finden Sie auf der Internetseite www.ifs-ev.org/brandsimulation

Dr. Marko Pehm
 Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung
 der öffentlichen Versicherer e.V. (IFS),
 Kiel

LITERATUR

(1) Gregory E. Gorbett; Computer Fire Models for Fire Investigation and Reconstruction, International Symposium on Fire Investigation Science and Technology 2008

(2) Kathrin und Gerald Grewolls; Praxiswissen Brandschutz, Simulationen, FeuerTRUTZ Network; 1. Edition (7. Oktober 2012)

(3) <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1805/index.html>

(4) Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST); URL: <https://pages.nist.gov/cfast/>

(5) B-Risk - Design Fire Tool; URL: <https://www.branz.co.nz/fire-safety-design/b-risk/>

(6) Fire Dynamics Simulator (FDS) and Smokeview; URL: <http://www.fire.nist.gov/fds>

(7) D. Hoser (Hrsg.); Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht 04/01, Verein zur Förderung des deutschen Brandschutzes e.V., 3. Aufl., 2013.

(8) K. B. McGrattan, C. Bouldin, and G.P. Forney; Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Computer Simulation of the Fires in the WTC Towers, NIST NCSTAR 1-5F, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2005.

(9) W.L. Grosshandler, N. Bryner, D. Madrzykowski, and K. Kuntz; Report of the Technical Investigation of The Station Nightclub Fire, NIST NCSTAR 2, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2005.

(10) a) C.G. Weinschenk, K. J. Overholt, D. Madrzykowski; Simulation of an Attic Fire in a Wood Frame Residential Structure - Chicago, IL, NIST Technical Note 1838, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2014.
 b) K. J. Overholt, C.G. Weinschenk, D. Madrzykowski; Simulation of a Hillside Residential Structure - San Francisco, CA, NIST Technical Note 1856, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2014.
 c) C.G. Weinschenk, K. J. Overholt, D. Madrzykowski; Simulation of a Residential Wind Driven Basement Fire - Riverdale Heights, MD, NIST Technical Note 1870, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2015.

(11) a) A. Hofmann, R. Muehlhnickel; Experimental and numerical investigation of fire development in a real fire in a five-storey apartment building, Fire and Materials, Volume 35, Issue 7, 2011, Pages: 453-462.
 b) A. Hofmann, C. Knaust, S. Krüger, T. Raspe, Jan H. Deubel; Detailed analysis of a smouldering fire scenario at the murder scene, experimental and numerical investigations, Fire and Materials, Volume 38, Issue 8, 2014, Pages: 806-816.

(12) D. Drysdale; An Introduction to Fire Dynamics, Wiley-Interscience, New York, 2011.