Technische Universität Braunschweig

iBMB MPA TU BRAUNSCHWEIG

Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013

27. Fachtagung Brandschutz Forschung und Praxis

25. und 26. September 2013

Tagungsband

Herausgegeben von Dietmar Hosser

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)

Heft 220 **Braunschweig** **2013**

ISBN 978-3-89288-205-3
ISSN 1439-3875 (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz)
ISSN 0934-2419 (Braunschweiger Brandschutz-Tage)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-mb.de.

Information bibliographique de la Deutsche Nationalbibliothek

La Deutsche Nationalbibliothek a répertorié cette publication dans la Deutsche Nationalbibliografie; les données bibliografiques detailliées peuvent être consultées sur Internet à l'adresse http://dnb.d-nb.de.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Geleitwort **7**
J. Hesselbach, Braunschweig

Sitzung 1 - N Neues aus der Forschung **9**
Leitung: D. Hosser, Braunschweig

1.1 Neue Erkenntnisse und Entwicklungen im mehrgeschossigen Holzbau 11
J. Wachtling, Braunschweig

1.2 Kopplung verschiedener FE-Modelle zur Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens von Betonbauteilen bei Brandbeanspruchung 29
M. Siemon, Braunschweig

1.3 Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr 47
M. Münch, Berlin

1.4 Probabilistische Risikoanalyse als Basis für die quantitative Bewertung der Personensicherheit in Atrien 71
C. Albrecht, Worcester, MA und New York City, NY (USA)

Sitzung 2 - Normen, Richtlinien, Verordnungen **89**
Leitung: G. Hoppe, Berlin

2.1 Geänderte Anforderungen an den Rauchabzug bei Verkaufsstätten, Versammlungsstätten und Industriebauten 91
J. Rübel, Düsseldorf

2.2 Umgang mit Naturbrandnachweisen nach Eurocode in bauaufsichtlichen Verfahren 101
K.-D. Wathling, Berlin

2.3 Erste Erfahrungen mit der Rauchwarnmelderpflicht in den Landesbauordnungen 113
S. Festag, Sulzburg

2.4 Neue VdS-Richtlinie zum Einsatz von Löschanlagen in Pflege- und Wohnheimen 129
U. Klinkhardt, Hoppegarten

Seite

2.5 Vorschriften zum mehrgeschossigen Holzbau in der Schweiz 141
R. Wiederkehr, Beinwil am See (Schweiz)

2.6 Untersuchung von Bränden an Fassaden im Auftrag der Bauministerkonferenz – erste Ergebnisse 149

Sitzung 3 - Brandschutzkonzepte für Sonderbauten 157
Leitung: H.-J. Gressmann, Abu Dhabi

3.1 Brandschutzkonzepte für Massentierhaltungsanlagen und deren Prüfung 159
E. Hagen und J. Upmeyer, Kleve

3.2 Brand- und Denkmalschutz auf Augenhöhe – spannende Details bei Brandschutzkonzepten für Baudenkmale 167
G. Geburtig, Weimar

3.3 Brandschutz beim Neubau Messe Basel – Planung, Ausführung und Inbetriebnahme 183
J. Kasburg und R. Schnetgöke, Basel und Zürich

3.4 Brandschutz im PalaisQuartier Frankfurt/Main: repräsentativ und zukunftsweisend 211
C. Foth, Hamburg

3.5 Brandschutzkonzepte im Spannungsfeld zwischen DIN 18230 und den Eurocodes 231
G. Spennes und G. Jäger, Aachen

3.6 Sonderbau – Chancen und Risiken aus der Sicht eines Verkehrsinfrastrukturbetreibers 257
M. Willich, Berlin

Sitzung 4 - vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 3. Auflage 273
Leitung: J. Zehfuß, Braunschweig

4.1 Fortschreibung des vfdb-Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes 275
D. Hosser und M. Siemon, Braunschweig

Seite

4.2 Aktualisierungen bei Brandszenarien, Bemessungsbränden und Simulationsmodellen 299
J. Wiese, Erkelenz, und O. Riese, Braunschweig

4.3 Aktualisierungen bei den Brandschutznachweisen für Bauteile und Tragwerke 331
J. Zehfuß und K. Paliga, Braunschweig

4.4 Aktualisierungen bei den Nachweisen zur Personensicherheit und Entfluchtung 357
V. Schneider, Frankfurt, und B. Forell, Köln

Anhänge **383**

A.1 Anschriften der Referenten und Sitzungsleiter 383
A.2 Kurzvorstellung des Veranstalters (iBMB / MPA) 389
A.3 Verzeichnis der Schriften aus dem iBMB 393

GELEITWORT

Leuchttürme sind wichtig für Universitäten. Denn neben der Forschung und Lehre zählt im internationalen Wettbewerb auch die Sichtbarkeit. Die Braunschweiger Brandschutz-Tage sind für die Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig ein solcher, weithin sichtbarer Leuchtturm.

Jährlich gelingt es den Veranstaltern im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Expertinnen und Experten aus dem ganzen Bundesgebiet und den Nachbarländern zu einer der größten Tagungen Braunschweigs und der größten Brandschutz-Fachtagung im deutschsprachigen Raum zusammenzubringen. Die Tagung trägt dadurch wesentlich zur Bekanntheit der Wissenschaftsstadt Braunschweig und zum Renommee unserer Technischen Universität in Fachkreisen und in der Öffentlichkeit bei.

Der Untertitel der Fachtagung besagt, dass hier Forschung auf internationalem Spitzenniveau die Praxis trifft, dass neueste Erkenntnisse aus der Wissenschaft zeitnah publik gemacht und in Anwendungen umgesetzt werden. Für eine Technische Universität ist es besonders wichtig, dass ihre Institute in Forschung und Lehre mit der Industrie, mit Ingenieurbüros, Behörden und Verbänden in Kontakt bleiben, deren Probleme aufgreifen und Lösungen erarbeiten. Das wird an der TU Braunschweig und insbesondere im Bereich des Brandschutzes seit Jahrzehnten erfolgreich praktiziert und durch die Braunschweiger Brandschutz-Tage seit nunmehr 27 Jahren jährlich neu unter Beweis gestellt.

Die Praxisnähe wird durch die enge Kooperation zwischen dem iBMB und der Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA) Braunschweig gefördert, die zu den größten Prüfanstalten auf dem Gebiet des baulichen Brandschutzes in Europa gehört und in der nationalen und internationalen Normung und im Zulassungswesen an vorderster Front mitwirkt. Gerade die Kombination von theoretischem Fachwissen und praktischen Erfahrungen bei Brandprüfungen von Bauteilen, Bauarten und Baustoffen macht die besondere Stärke und das Alleinstellungsmerkmal des Brandschutzes an der TU Braunschweig aus.

Obwohl der Schwerpunkt des iBMB beim vorbeugenden baulichen Brandschutz liegt, haben auch der abwehrende und der anlagentechnische Brandschutz in der Lehre und zunehmend auch in der Forschung ihren Platz. Das wird ermöglicht durch die jahrzehntelange enge Zusammenarbeit mit der Berufsfeuerwehr Braunschweig, deren ehemaliger Leitender Branddirektor Dipl.-Phys. Hans-Joachim Gressmann seit 1990 das Lehrgebiet „Abwehrender und anlagentechnischer Brandschutz“ als Lehrbeauftragter und seit 2010 als Honorarprofessor sehr erfolgreich vertritt.

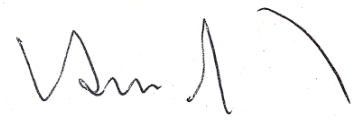
In diesem Jahr gibt es noch eine Besonderheit: Herr Professor Hosser, der die Braunschweiger Brandschutz-Tage im Jahr 1987 erfunden und seitdem als wissenschaftlicher Leiter gestaltet und zum Erfolg geführt hat, befindet sich nämlich seit Februar dieses Jahres im mehrfach hinausgeschobenen und nun wohlverdienten Ruhestand. Er hat damit so lange gewartet, bis ein qualifizierter Nachfolger gefunden war und seinen Dienst zum 1. Februar antreten konnte. Ich habe die große Freude, heute nochmals mit Ihnen gemeinsam Herrn Professor Dr.-Ing. Jochen Zehfuß als neuen Leiter des Fachgebietes Brandschutz am iBMB zu begrüßen und willkommen zu heißen. Er hat bereits im Sommersemester die Aufgaben in der Lehre und die Betreuung der Forschungsvorhaben vom Kollegen Hosser übernommen und wird wohl künftig auch die Hauptverantwortung für die Braunschweiger Brandschutz-Tage tragen.

Ich danke Herrn Kollegen Professor Hosser und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebietes Brandschutz für die ausgezeichnete Organisation der diesjährigen 27. Fachtagung und der 26 Fachtagungen davor. Von Herrn Kollegen Professor Zehfuß wünsche ich mir, dass er sich ebenso wie sein Vorgänger in Forschung, Lehre und wissenschaftlicher Weiterbildung engagiert und die Braunschweiger Brandschutz-Tage als „Aushängeschild“ der TU Braunschweig mit Erfolg und zum Nutzen der Praxis und der Forschung weiterführt.

Den Referenten und Moderatoren der Tagung gilt mein Dank für ihre wertvollen und aktuellen Beiträge, die wieder so manches Problem der Brandschutzpraxis aufgreifen und einer Klärung näher bringen.

Den Teilnehmerinnen und Teilnehmern wünsche ich eine gewinnbringende und informative Veranstaltung, lebendige Diskussionen, gute Gespräche in der begleitenden Fachausstellung und beim abendlichen Empfang, einen angenehmen Aufenthalt in unserer schönen Wissenschaftsstadt Braunschweig – und viel Freude beim Lesen dieses Tagungsbandes.

Braunschweig, 25. September 2013



Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jürgen Hesselbach

Präsident der Technischen Universität Braunschweig

SITZUNG 1

NEUES AUS DER FORSCHUNG

Sitzungsleitung: D. Hosser, Braunschweig

NEUE ERKENNTNISSE UND ENTWICKLUNGEN IM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU

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

EINLEITUNG

Die Anforderungen an den mehrgeschossigen Holzbau sind in der Musterbauordnung (MBO) [1] bzw. in den jeweiligen Landesbauordnungen festgehalten. Mit Novellierung der MBO im Jahr 2002 wurde die Gebäudeklasse 4 eingeführt. Seither sind Holzbauten bis zu einer Höhe vom 13 m zulässig. Für die erweiterte Anwendung musste nachgewiesen werden, dass das Brandrisiko nicht höher ist als bei einer Stahlbeton- oder Mauerwerksbauweise. Das ist in einem 2001 abgeschlossenen Forschungsvorhaben gelungen. Eine wesentliche Voraussetzung war, dass tragende und aussteifende Holzbauteile mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) geschützt werden und nur nichtbrennbare Dämmstoffe verwendet werden. Konkretisiert werden diese Brandschutzanforderungen in der Musterrichtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR), kurz Muster-Holzbaurichtlinie [2] bzw. in der in den einzelnen Bundesländern eingeführten Richtlinie [3].

Bereits vor der offiziellen Einführung der Gebäudeklasse 4 und der Muster-Holzbaurichtlinie gab es erste Pilotprojekte im Bereich des mehrgeschossigen Holzbaus, beispielsweise der Lignopark Kreuztal (Bild 1).

Bild 1 Lignopark Kreuztal [4]

Die unterschiedlichen Anforderungen, nicht nur seitens des Brandschutzes, haben zu einer großen Vielfalt verwirklichter mehrgeschossiger Holzbauten geführt. Diese Vielfalt und neue Entwicklungen werden nachfolgend aufgezeigt.

ENTWICKLUNG DES MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAUS

Überblick

Am iBMB wurde die Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus in Deutschland u. a. im Rahmen von [5] untersucht. Durch Literaturstudien und eine Umfrage konnten die in Tabelle 1 aufgelisteten realisierten mehrgeschossigen Holzbauten in Deutschland ermittelt werden.

Tabelle 1 Liste mehrgeschossiger Holzbauten in Deutschland

Lfd. Nr.	Gebäude	Bundesland	Baujahr
1	Münster	NRW	1996
2	Essen, Niebuhrstraße.	NRW	1996
3	Wiesbaden "Im Sauerland" Wohnanlage	Hessen	1998
4	Freiburg, Rieselfeld	BW	1998
5	Dorsten	NRW	2000
6	Kreuztal, Lignopark	NRW	2001
7	Rostock	MV	2003
8	Wenden	NRW	2004
9	Freiburg "Ida 7"	BW	2005
10	Tübingen "Loretto 12+"	BW	2005
11	Hamburg, Thiedeweg	Hamburg	2006
12	Magdeburg	ST	2007
13	Berlin, Esmarchstraße "e3"	Berlin	2008
14	Bremen, Bachstraße	Bremen	2008
15	Tübingen, Studentenwohnheim "Neuhalde"	BW	2008
16	Regensburg	Bayern	2009
17	Hofheim, Feldstraße	Hessen	2009
18	"Barminkante", Berlin, Fehrbelliner Str.	Berlin	2009
19	Berlin, Pappelallee (Leuchtturm e.G)	Berlin	2009
20	Berlin, Schönhölzer Str.	Berlin	2009
21	München, Pariser Str.	Bayern	2009
22	Berlin, Zur Börse	Berlin	2010
23	Bad Aibling "H4"	Bayern	2010
24	Berlin	Berlin	2010
25	Neu-Ulm ,Wiley	Bayern	2010
26	Berlin Schamweberstr. "Suewestsonne"	Berlin	2010
52	Münster Studentenwohnheim	NRW	2010
27	Bad Aibling "H8"	Bayern	2011

28	Berlin, Görschstraße "3xGrün"	Berlin	2011
29	Berlin, Borkumstr.	Berlin	2011
30	Berlin, Scharnweberstr. "sw40"	Berlin	2011
31	Freiburg, Im Rieselfeld	BW	2011
32	Hamburg, hybride house	Hamburg	2011
33	Burghausen	Bayern	2012
34	Hamburg "Wälderhaus"	Hamburg	2012
35	Ehingen	BW	2012
36	Regensburg	Bayern	2012
37	Berlin, Wilhelm-Kuhr-Str.	Berlin	2012
38	Hamburg, Case Study	Hamburg	2012
39	Isny, Allgäu	Bayern	2012
40	Berlin, Boyenstr. 26 "B26"	Berlin	2013
41	Berlin, Boyenstr. 27 "B27"	Berlin	2013
42	Berlin, Christburgerstr. "c_13"	Berlin	2013
43	Hamburg, Kurt-Emmerich-Platz "H 5 1/4"	Hamburg	2013
44	Mainz	RP	2013
45	Eckernförde, Rendsburger Str.	SH	2013
46	Hamburg, Woodcube	Hamburg	2013
47	Hamburg, Hybride Erschliessung	Hamburg	2013
48	Verden, Strohballenbau	NI	2013
49	Berlin-Lichtenberg Pflegeheim	Berlin	
50	Bonn, Studentenwohnheim 42, Karl-Frowein-Str.	NRW	
51	Rostock, Gerberbruch	MV	

Einige der aufgezählten Bauvorhaben umfassen mehrere Gebäude. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da nicht über jeden mehrgeschossigen Holzbau berichtet wurde und die notwendigen Informationen nicht immer für die Studie zugänglich waren. Die tatsächliche Anzahl mehrgeschossiger Holzbauten in Deutschland dürfte deutlich höher sein.

Die Liste zeigt den Zuwachs mehrgeschossiger Holzbauten im Laufe der Jahre, wobei Berlin, Hamburg, Bayern, Baden Württemberg und Nordrhein-Westfalen zu den im mehrgeschossigen Holzbau führenden Bundesländern zählen. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass die Gebäudeklasse 4 in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz noch nicht eingeführt ist. Trotzdem wurden in mindestens zwei dieser Länder entsprechende mehrgeschossige Holzbauten errichtet. Einen Überblick über die Verteilung der aufgelisteten Baumaßnahmen über die Bundesländer zeigt Bild 2.

Um die Bauweisen näher zu betrachten und miteinander zu vergleichen, reichten die vorliegenden Informationen nicht in allen Fällen aus. Bei den Gebäuden, zu denen genauere Angaben vorliegen, ist auffällig, dass sie vielfach Abweichungen gegenüber den Anforderungen der MBO bzw. Muster-Holzbaurichtlinie aufweisen.

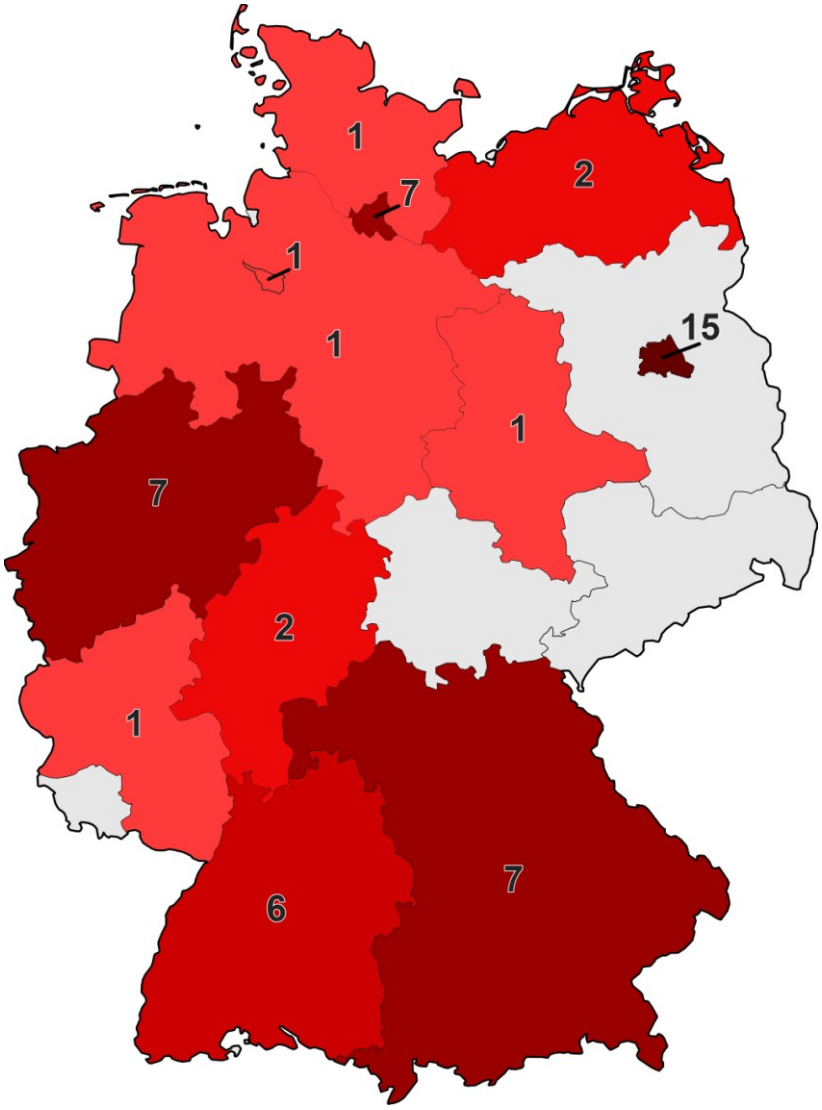


Bild 2 Mehrgeschossige Holzbauten in Deutschland

Häufige Abweichungen sind:

- Reduzierung der Kapselklasse,
- sichtbare Holzoberflächen,
- brennbare Dämmung und
- Bauten über die Gebäudeklasse 4 hinaus.

Auf diese Abweichungen und weitere Punkte wird im Folgenden näher eingegangen.

Kapselung von Holzbaubauteilen

Die Musterbauordnung schreibt vor, dass tragende und aussteifende Holzbauteile allseitig mit einer Brandschutzbekleidung zu versehen sind. Art und Aus-

führung dieser Bekleidung werden in der Muster-Holzbaurichtline konkretisiert. Es wird gefordert, dass die allseitige Bekleidung die Holzbauteile mindestens 60 min lang vor einer Entzündung schützt und als $K_2$60 nach DIN EN 13501-2 [6] klassifiziert ist.

Neben der Ausführung einer $K_2$60-Bekleidung gibt es die Möglichkeit, Brandschutzbekleidungen mit reduzierter Kapselwirkung auszuführen. In DIN EN 13501-2 [6] finden sich auch die Klassen $K_2$30 und $K_2$10 sowie $K_1$10. Dabei unterscheiden sich $K_2$10 und $K_1$10 durch die Trägerplatten, auf denen geprüft werden darf, und die Übertragung der Ergebnisse aufgrund der Trägerplatte. Untersucht wurden außerdem die in Bild 3 dargestellten Ausführungen von Bekleidungen.

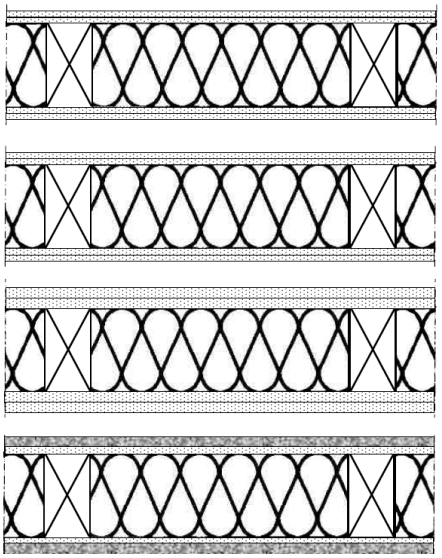


Bild 3 Verschiedene Ausführungen von Brandschutzbekleidungen [7]

Zu 28 der aufgelisteten Baumaßnahmen wurden Angaben zur Brandschutzbekleidung entweder zur Verfügung gestellt oder konnten recherchiert werden. Bei 10 Projekten (oder 36 %) wurde die Kapselung auf K30 reduziert. Realisiert wurden aber auch K45-Bekleidungen, beispielsweise bei der Wohnanlage im Hamburger Thiedeweg [8] (Nr. 11 der Liste). Reduzierte Brandschutzbekleidungen sind kostengünstiger als $K_2$60-Bekleidungen.

Das Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI), das iBMB und weitere Forschungspartner haben in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben mit dem Kurztitel „Optimierung K60“ Ansätze zur Verbesserung von Brandschutzbekleidungen untersucht. Die Klassifizierung von Brandschutzbekleidungen ist auf die Entzündungstemperatur von Holz ausgelegt. Neben den einzuhaltenden Temperaturkriterien dürfen bei der Prüfung keine Verkohlungen festgestellt werden. In der Regel werden Brandschutzbekleidungen mit metallischen Verbindungsmitteln mit einer deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit befestigt. Die Brandschutzbekleidungen werden darauf ausgelegt, dass keine Verkohlung im Bereich der Verbindungsmittel auftritt. Im Mittel beträgt die Temperatur hinter einer

ungestörten Bekleidung aus 2 x 18mm Gipskarton-Feuerschutzplatten nach 60 Minuten Normbrandbeanspruchung nur 140 °C und liegt damit deutlich unterhalb des Grenzwertes von 290 °C. Im Forschungsvorhaben sollte die Anforderung „keine Verkohlung“ genauer untersucht werden, um Vorgaben zur Interpretation zu erarbeiten. Bei den experimentellen Untersuchungen wurden Schrauben verwendet, sodass die Ergebnisse übertragbar sind auf praxisübliche Schraubendurchmesser (< 4 mm) und Klammern. In Schraubenauszugsversuchen haben sich 250 °C (gemessen 5 mm entfernt vom Verbindungsmittel) als diejenige Temperatur herausgestellt, bei der eine eindeutige Schädigung der Holzsubstanz vorliegt. Zur Beurteilung wurde daher eine Grenztemperatur von 225 °C vorgeschlagen bzw. die im Bild 4 dargestellten Verfärbungsbilder. Neben der Einhaltung der übrigen Anforderungen an Brandschutzbekleidungen ist ein ausreichender Abstand zwischen den Befestigungsmitteln sicherzustellen, denn die Verfärbungsflächen dürfen sich nicht überschneiden [9].

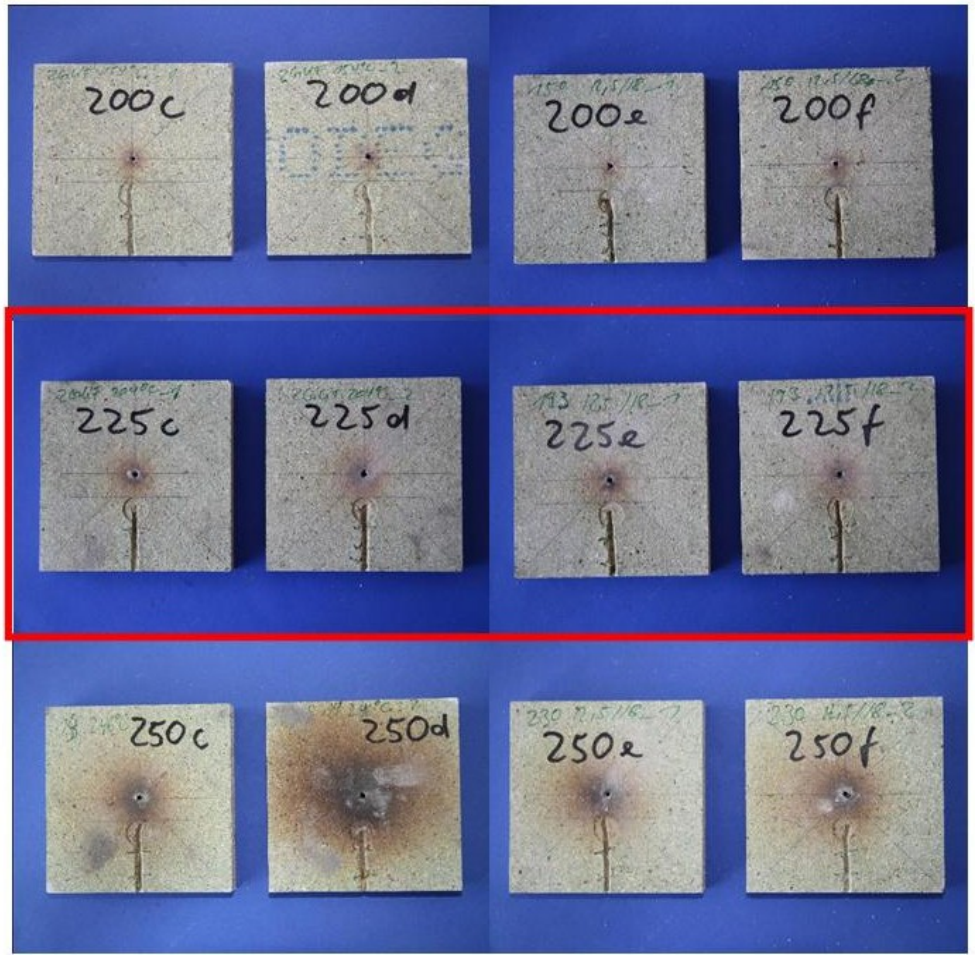


Bild 4 Verkohlungsbilder im bei verschiedenen Temperaturstufen [9]

n dem o. g. Forschungsvorhaben wurden auch Verklebungen als Verbindungstechnik untersucht sowie das Anbringen von sogenannten Konsollasten wie Küchenschränke und Regale [9]. Darauf kann aber an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden.

Im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWI) wurde ein Forschungsvorhaben unter Beteiligung des iBMB gefördert, in dem Kalk- und Lehmbekleidungen auf ihre Tauglichkeit als Brandschutzbekleidung für einen mehrgeschossigen strohballengedämmten Holzbau untersucht wurden. Dieses Projekt ist besonders auf Ökologie ausgerichtet und soll dem Strohballenbau den Zugang zur Gebäudeklasse 4 eröffnen. Zunächst wurde im Labormaßstab eine Vielzahl an Proben untersucht, um eine Vorauswahl für erste Normbrand-Versuche im Kleinmaßstab zu treffen. In weiteren Prüfungen in größerem Maßstab stellte ein Leichtkalkputz in einer Stärke von 6 cm seine Leistungsfähigkeit unter Beweis. Der Kalkputz wird in diesem Anwendungsfall direkt auf das Stroh aufgetragen. Eine Anwendung im klassischen Holzbau wäre nur mit einem Putzträger z. B. einer Schilfrohrmatte möglich, was aber im Forschungsvorhaben nicht näher untersucht wurde. In gleicher Weise wurden verschiedene Lehmputze untersucht. Dabei zeigte sich, dass eine Schichtdicke von mehr als 6 cm zum wirksamen Schutz des Strohs erforderlich wäre, die aber bei der Herstellung technische und wirtschaftliche Schwierigkeiten bereitet. Daraufhin wurden von der Firma Claytec neuentwickelte Lehmplatten geprüft, die in der Kombination aus einer 4,5 cm dicken Lehmplatte mit Leichtzuschlag und 1 cm mineralischem Lehmputz vielversprechende Ergebnisse brachte. Aus statischen Gründen ist es außerdem sinnvoll, Holzwerkstoffplatten zur Aussteifung der strohballengedämmten Holzbauteile einzusetzen. Auf diesen können die Lehmplatten befestigt werden. Eine Anwendung im klassischen Holzbau wäre also möglich, allerdings ist die Entwicklung noch nicht abgeschlossen [3].

Bild 5 Brandschutzbekleidung aus Lehm (links) und Kalkputz (rechts)

Die beschriebene Bauweise findet zurzeit Anwendung bei einem Pilotprojekt in Verden an der Aller. Bei dem fünfgeschossigen strohballengedämmten Bürogebäude mit Ausstellungsraum zum nachhaltigen Bauen wird der untersuchte Kalkputz der Firma Endress als Bekleidung eingesetzt.

Parallel zur Durchführung der Brandversuche wurden Kennwerte für das temperaturabhängige Materialverhalten experimentell ermittelt. Im ersten Schritt wird angestrebt, mit Hilfe von numerischen Modellen den in Brandversuchen gemessenen Wärmedurchgang nachzurechnen. Eine Herausforderung ist dabei, die Einflüsse der Verdunstungsenergie von im Kalk oder Lehm gebundenem Wasser und die konvektiven Transportprozesse im Porensystem zu berücksichtigen. Diese Einflüsse wirken sich auf die Dauer des Temperaturplateaus bei Werten um 100 °C aus. Gelingt eine realitätsnahe Abbildung der Versuche, können numerische Untersuchungen auf Basis der abgeleiteten Rechengrundlagen unterstützend zur weiteren Optimierung der Bekleidung und zur Erweiterung des Anwendungsbereichs, z. B. auf $K_2$30-Bekleidungen, eingesetzt werden [10].

Sichtbare Holzoberflächen können durch intumeszierenden Brandschutzbeschichtungen geschützt werden. Die Beschichtung quillt im Brandfall auf und bildet eine poröse Schicht, die den Untergrund über einen bestimmten Zeitraum vor hohen Temperaturen schützen kann. Zum Nachweis von Holzbauteilen mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen wurde im Rahmen einer Dissertation [11] am iBMB ein Ingenieurmodell entwickelt.

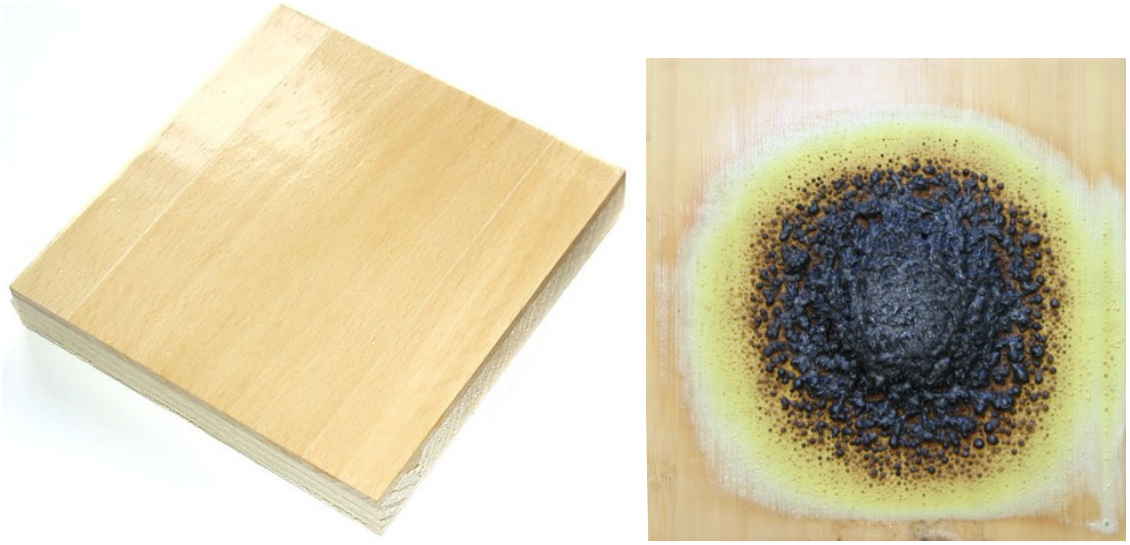


Bild 6 Transparente Hochleistungsbrandschutzbeschichtung [11]

Abschließend ist zur Kapselung festzuhalten, dass noch Entwicklungspotential in der brandschutztechnischen Bekleidung von Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen steckt. Allgemein ist bei der Reduzierung der Brandschutzbekleidung von einlagigen Plattenbekleidungen abzuraten, da die Fugen im Hinblick auf das Eindringen von Heißgasen und Rauch in die Konstruktion Schwachstellen darstellen. Die reduzierte Kapselung oder im Extremfall der Verzicht auf eine Kapselung (bei Massivholzbauteilen) ist durch geeignete Maßnahmen im Rahmen eines schutzzielorientierten Brandschutzkonzepts zu kompensieren, um das geforderte Sicherheitsniveau zu erreichen [12].

Verwendung brennbarer Dämmstoffe

Bei der Verwendung von Holz als Baumaterial liegt es nahe, auch für die Dämmung nachwachsende Rohstoffe einzusetzen. Diese Dämmstoffe wirken sich u. a. positiv auf die Ökobilanz des Gebäudes aus. Im Rahmen eines weiteren Verbundprojekts unter Beteiligung des iBMB wurde die Verwendung brennbarer Dämmstoffe im mehrgeschossigen Holzbau untersucht. Das Risikopotential eines Holzbaus mit brennbarerer Dämmung erhöht sich durch den Eintrag zusätzlicher immobiler Brandlasten und die Gefahr eines Hohlraumbrandes, der schwer zu entdecken und zu bekämpfen ist. Beim Öffnen der Bekleidung durch die Feuerwehr, können die im Innern aufgestauten Pyrolysegase durchzünden. Wird über eine Brandschutzbekleidung dasselbe Sicherheitsniveau angestrebt wie bei Verwendung einer nichtbrennbaren Dämmung, muss nicht nur die Entzündung des Dämmstoffs sondern auch das bereits bei niedrigerer Temperatur einsetzende Ausgasen verhindert werden. Hierfür wurden Grenztemperaturen der thermischen Zersetzung verschiedener brennbarer Dämmstoffe bestimmt. Die Brandschutzbekleidung muss nun so dimensioniert werden, dass diese Grenztemperatur nicht überschritten wird. Des Weiteren müssen Elektroinstallationen als potentielle Zündquellen außerhalb des Bauteils und der Brandschutzbekleidung verlegt werden [12].

Neben diesen konstruktiven Maßnahmen sind auch anlagentechnische Maßnahmen geeignet, dem erhöhten Brandrisiko zu begegnen. Die Bewertung sollte im Rahmen eines schutzzielorientierten Brandschutzkonzeptes erfolgen.

Holzbau über die Gebäudeklasse 4 hinaus

Von den oben aufgelisteten Baumaßnahmen sind 15 in die Gebäudeklasse 5 einzustufen, das sind fast 30 %. Ein Vorreiter auf diesem Gebiet war das siebengeschossige Gebäude „e3“ in Berlin [13], dem weitere Bauten folgten. In Bad Aibling steht nach den Ergebnissen der Studie der zurzeit größte mehrgeschossige Holzbau in Deutschland, der auch als „H8“ bezeichnet wird. Die Verwendung von Holz für tragende und aussteifende Bauteile stellt in der Gebäudeklasse 5 eine Abweichung von der MBO bzw. der jeweiligen Landesbauordnung dar. Deshalb ist in einem schutzzielorientierten Brandschutzkonzept der Nachweis zu erbringen, dass das geforderte Sicherheitsniveau erreicht wird.

Hybridbauweisen

Neben Abweichungen von der geregelten Holzbauweise sind im Bezug auf den mehrgeschossigen Holzbau Hybrid- oder Mischbauweisen erwähnenswert. Die Verwendung von (Stahl-)Beton schlägt sich zwar negativ auf die Ökobilanz der Gebäude nieder, bietet aber auch Vorteile: Die größere Masse des Betons wirkt sich positiv auf den Schallschutz aus. Ferner kann bei Holz-Beton-Verbundbauweisen der Beton als Brandschutzbekleidung des Holzbauteils dienen und dabei auch die Rauchdichtigkeit sicherstellen. Bei einigen Bauten mit Stahl- und Stahlbetontragkonstruktion wird die thermische Trennung durch Holztafelelemente erreicht.

Sonderbauten

Neben der Anwendung der Holzbauweise für mehrgeschossige Wohnbauten, die in der MBO bzw. z. T. in den entsprechenden Landesbauordnungen geregelt sind, findet Holz als Baustoff auch in Sonderbauten Anwendung. Als Grenzfall werden in diesem Zusammenhang Büro- und Verwaltungsbauten losgelöst von der Bauweise betrachtet. In den Geltungsbereich der MBO fallen Gebäude mit Räumen zur Büro- und Verwaltungsnutzung, die kleiner als 400 m² sind (vgl. § 2 MBO). Ein Beispiel ist der o. g. strohballengedämmte fünfgeschossige Holzbau in Verden [3]. Andere Gebäude sind klar als Sonderbau definiert, wie der Industriebau in Niesetal [14]. Die Nutzung mehrgeschossiger Holzbauen als Sonderbauten ist nicht ausgeschlossen. Das mehrgeschossige Wälderhaus in Hamburg [15] wird beispielsweise als Hotel und Versammlungsstätte genutzt.

Anforderungen an den Holzbau

Die rechtlichen Anforderungen an den mehrgeschossigen Holzbau sind über die MBO und Muster-Holzbaurichtlinie bzw. die entsprechenden Regelungen der einzelnen Bundesländer inzwischen klar definiert. Abweichungen sind über ein schlüssiges Brandschutzkonzept möglich. Einige häufigere Abweichungen sollten eventuell noch geregelt werden (s. u.).

Neben den rechtlichen Anforderungen lohnt aber auch eine Betrachtung der Ansprüche der weiteren Baubeteiligten, um den Holzbau und ggf. weitere Entwicklungen analysieren zu können. Eine bekannte Strategie ist der Zusammenschluss von Unternehmen zur Vermarktung. Die Vereinigung ZimmerMeister-Haus® wurde beispielsweise bereits 1987 gegründet, um die Holzrahmenbauweise weiterzuentwickeln und zu vermarkten [16]. Sogenannte Manufakturen bieten regional den Bau von Holzhäusern an und erschließen dabei inzwischen auch den Markt des mehrgeschossigen Holzbaus [16].

Eine ähnliche Entwicklung gibt es bei den Bauherren, die sich zu sogenannten Baugruppen zusammenschließen, um gemeinsam Großprojekte umzusetzen wie „fertighauscity 5+“ [17] oder das siebengeschossige „e3“ in Berlin [18].

Vielen Veröffentlichungen lässt sich außerdem entnehmen, dass für die Bauherren ökologische Aspekte und „gesundes Wohnen“ bei der Entscheidung für einen Holzbau im Vordergrund stehen. Vor allem für Herstellerfirmen und Planer wird von Interesse sein, welchen Aufpreis Bauherren hierfür bereit sind zu tragen. Für die weitere Entwicklung stellt sich die Frage, wie Holzbauweisen noch ökologischer und wirtschaftlicher werden können.

Weitere aktuelle Entwicklungen und Forschungsaktivitäten

Realisierte und im Bau oder in der Planung befindliche Gebäude tragen zur Verbreitung und zur Akzeptanz des mehrgeschossigen Holzbaus bei. Besondere Aufmerksamkeit ziehen dabei natürlich Bauten mit großer Höhe, besonderen Materialien, Materialkombinationen oder sonstigen Neuerungen auf sich.

Forschungseinrichtungen und Baubeteiligte im mehrgeschossigen Holzbau arbeiten in dieser Richtung kontinuierlich am Technologie- und Wissenstransfer.

So wird an der TU München zurzeit in einem Forschungsvorhaben ein Konstruktions- und Detailkatalog entwickelt, der die Planung mehrgeschossiger Holzbauten mit geprüften Bauteilaufbauten und Details unterstützen soll [19]. Des Weiteren wird das Brandverhalten von Haupt-/Nebenträger-Verbindungen erforscht [19]. Die TU Berlin forscht an biogenen Faserverbundlamellen für statisch effiziente Raumtragwerke und an PU-Beschichtungen beispielsweise für Fassadenelemente [20]. Ergebnisse dieser Forschungsvorhaben sowie weiterer Projekte anderer Forschungseinrichtungen könnten mittelfristig im mehrgeschossigen Holzbau Anwendung finden.

AUFSTOCKUNGEN UND DACHAUSBAU

Ein weiterer Bereich in dem häufig auf Holzbauweisen zurückgegriffen wird, sind Aufstockungen und der Dachausbau (Bild 7). Hier wird die Holztragkonstruktion wegen des geringen Eigengewichtes gewählt, um möglichst wenig zusätzliche Last einzubringen. Bei der Entscheidung für Holz als Baustoff spielen aber oft auch ökologische Aspekte und das Wohnklima eine Rolle.

Bild 7 Aufstockung mit Holztragkonstruktion und Holzfassade [21]

Eine Aufstockung oder ein Dachausbau kann dazu führen, dass das Gebäude in eine höhere Gebäudeklasse einzustufen ist. Wird beispielsweise in einem dreigeschossigen Gebäude das Dach ausgebaut und ein Aufenthaltsraum geschaffen, dessen Fußbodenoberkante mehr als 7 m über der Gebäudeoberkante liegt, ist das Bauwerk nach MBO [1] von der Gebäudeklasse 3 in die Gebäudeklasse 4 hoch zu stufen. Gleichermaßen verhält es sich bei einer Aufstockung. Mit steigender Gebäudeklasse ändern sich dann auch die Brand-

schutzanforderungen an das Gebäude, die auch für den Bestandsteil des Gebäudes Ertüchtigungen notwendig machen können. Hierbei kann es sich um bauliche Maßnahmen z. B. zur Anpassung der Feuerwiderstandsdauer handeln oder um anlagentechnische Maßnahmen, mit denen das brandschutztechnische Sicherheitsniveau ebenfalls erreicht werden kann.

An tragende und aussteifende Bauteile im Dachraum werden keine besonderen Brandschutzanforderungen gestellt, wenn sich über diesem Aufenthaltsraum kein weiterer befindet (vgl. § 27 und § 31 MBO). Beim Bau mehrerer Nutzungseinheiten im Dachgeschoss sind diese zu trennen und die entsprechenden Brandschutzanforderungen zu erfüllen (vgl. § 29 MBO). Durch solche zusätzlichen Anforderungen können auch im Dachraum Brandschutzmaßnahmen erforderlich werden. Es ist im Einzelfall im Rahmen eines Brandschutzkonzeptes zu prüfen, welche Anforderungen an die unterschiedlichen Bauteile und ihre Anschlüsse gestellt werden und ob es sinnvoller ist, den Brandschutz durch bauliche oder anlagentechnische Maßnahmen oder eine Kombination von beiden sicherzustellen.

FASSADEN MEHRGESCHOSSIGER HOLZBAUTEN

In diesem Abschnitt wird eine Auswahl von Fassadensystemen vorgestellt, nachdem zunächst auf die Rechtsgrundlagen eingegangen wird. Der Schwerpunkt liegt auf Holzfassaden.

Die MBO [1] fordert in § 28 für die Gebäudeklassen 4 und 5, dass „Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen […] einschließlich der Dämmstoffe schwerentflammbar sein [müssen] … Bei Außenwandkonstruktionen mit geschossübergreifenden Hohl- und Lufträumen … sind gegen die Brandausbreitung besondere Vorkehrungen zu treffen“.

Zu der von vielen Bauherren gewünschten Holzoptik eines Gebäudes kann eine Holzfassade beitragen. Der Einsatz von Holz als meist normalentflammbarem Baustoff ist jedoch ab der Gebäudeklasse 4 – wie oben dargestellt – nicht ohne weitere Maßnahmen möglich. Ein Weg ist der teilflächige Einsatz von Holz in einer Fassade. Auf diese Weise wurden sowohl die in Bild 7 dargestellte Fassade der Aufstockung realisiert als auch andere teilflächige Holzfassaden beispielsweise beim Gebäude fertighauscity 5+ in Berlin [17] und einem Bau in Rostock [22].

Die Ergebnisse zahlreicher nationaler und internationaler Forschungsvorhaben zum Brandverhalten von flächigen Holzfassaden sind in der Schweiz in ein sogenanntes „Stand-der-Technik-Papier“ [23] aufgenommen worden [24]. Hier werden konstruktive Maßnahmen wie geschossweise umlaufende Bleche (Schürzen) mit Brandschotts als wirkungsvolle Brandschutzmaßnahmen empfohlen. Auch in Deutschland scheint dies die häufigste Ausführung bei mehrgeschossigen Holzfassaden zu sein, wie z. B. bei Case Study in Hamburg [25] und H8 in Bad Aibling [26] (siehe Bild 8).

Bild 8 Case Study [25] und H8 [27]

Beim fünfgeschossigen Wälderhaus in Hamburg befinden sich hinter der sägerauen Lärchen-Stülpschalung eine Massivholzplatte sowie umlaufende horizontale Brandriegel aus Steinwolle im Bereich der Geschossdecken. Eine Brandausbreitung aus dem Gebäude über die Fassade soll mittels einer Löschanlage verhindert werden. Hierzu wurden verdichtet Sprinklerköpfe vor den Fassadenöffnungen angebracht. Einer Brandeinwirkung von außen soll mit einer detaillierten Außenanlagenplanung begegnet werden [28].

Bild 9 Wälderhaus [29]

Eine andere Variante stellen TES-Fassaden dar. Beidseitig mit Gipsfaserplatten bekleidete Holztafelelemente dienen der energetischen Sanierung wie bei einer zum Teil mehrgeschossigen Wohnsiedlung in Osthuesheide, die für den Sanierungspreis 2013 der Zeitschrift Bauen mit Holz nominiert war [30]. Das internationale Forschungsvorhaben „TES Energy Facade“ behandelt einheitliche Standards und somit Marktpotenziale dieser Elemente [31].

Es ist geplant, die Verwendung nachwachsender Rohstoffe im mehrgeschossigen Fassadenbereich und den Brandeintrag von außen am iBMB weiter zu untersuchen. Dabei sollen verschiedene Maßnahmen zum Erreichen der bauordnungsrechtlichen Schutzziele geprüft und bewertet werden.

MEHRGESCHOSSIGER HOLZBAU INNNER- UND AUSSERHALB EUROPAS

Bei der Betrachtung des mehrgeschossigen Holzbaus in Deutschland lohnt auch ein Blick über die Landesgrenzen hinaus. Im Folgenden soll ein kurzer Einblick in den mehrgeschossigen Holzbau in Europa gegeben werden, um ihn mit Deutschland zu vergleichen.

Die Entwicklung in Europa war in vielen Ländern prinzipiell ähnlich zur Entwicklung in Deutschland. Durch die Anpassung der Rechtsgrundlagen und Realisierung erster Pilotprojekte entwickelte sich der mehrgeschossige Holzbau weiter. Erwähnenswert sind folgende herausstechende Projekte und Entwicklungen:

- In Schweden wurden die Bauregeln bereits 1994 novelliert, um den mehrgeschossigen Holzbau zu ermöglichen.
- Ganze Wohnsiedlungen aus mehrgeschossigen Holzbauten entstanden und entstehen in Finnland.
- Über 1.500 mehrgeschossige Holzgebäude wurden bereits in der Schweiz erbaut.
- Keine Höhenbegrenzungen für bestimmte Baustoffe gibt es in Großbritannien. In London wurden inzwischen zwei achtgeschossige Holzbauten errichtet.
- In Italien wurde 2011 die Höhenbegrenzung von vier Geschossen aufgehoben und es werden bis zu neungeschossige Wohngebäude gebaut [32], [33], [34].

Auch außerhalb Europas entwickelt sich der mehrgeschossige Holzbau stetig weiter. Zwei aktuelle erwähnenswerte Projekte sind ein zehngeschossiger Holzbau in Australien und ein geplantes dreißiggeschossiges Gebäude in Vancouver [32].

VORSCHLÄGE ZUR ERWEITERUNG DER RECHTSGRUNLAGEN

Am iBMB und an der TU München wurden bereits im Jahr 2008 konkrete Vorschläge zur Erweiterung der rechtlichen Grundlagen für den Holzbau erarbeitet und veröffentlicht [12, 35]. Die vorstehend dokumentierte Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus zeigt die häufigsten Abweichungen von den bisherigen Rechtsgrundlagen auf. Für einige dieser Abweichungen sind Empfehlungen für eine bauaufsichtliche Regelung in den o. g. Vorschlägen formuliert. Im Folgenden werden die beiden Vorschläge miteinander verglichen.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes an der TU München wurde ein Entwurf für eine erweiterte Muster-Holzbaurichtlinie erarbeitet, der über die hochfeuerhemmende Bauweise hinaus geht und auch für die Gebäudeklasse 5 gelten soll. Der Vorschlag aus Braunschweig ist näher an der aktuellen Muster-Holzbaurichtline orientiert und geht nicht auf die Gebäudeklasse 5 sowie feuerbeständige Bauweisen ein. Beide Dokumente schlagen eine Erweiterung der Rechtsgrundlagen auf Holz-Massivbauweisen mit Ausnahme der Blockbohlenbauweise vor. Ebenso beinhalten beide zur $K_2$60-Kapselung als gleichwertig angesehene Lösungen mit reduzierter Bekleidung und zusätzlichen Brandschutzmaßnahmen. Der Braunschweiger Vorschlag geht explizit auf sichtbare Holzoberflächen in Verbindung mit anlagentechnischen Kompensationsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Größe der Nutzungseinheit ein. Beim Vorschlag der TU München werden Brandschutzbekleidungen aus brennbaren Baustoffen behandelt.

Die Studie zu den realisierten Holzbauten hat gezeigt, dass bei einigen Gebäuden Teilflächen unbekleidet ausgeführt wurden. So wurden beispielsweise beim siebengeschossigen „e3“ in Berlin nur die Decken unbekleidet ausgeführt [13]. In einem schutzzielorientierten Brandschutzkonzept kann dargestellt werden, dass ein gleichwertiges Sicherheitsniveau auch mit dieser Bauweise erreicht wird; daher könnten unbekleidete Teilflächen mit in die Regelungen aufgenommen werden. Während der Vorschlag aus Braunschweig als Besonderheit Regelungen zur Verwendung von brennbareren Dämmstoffen bzw. Dämmstoffen mit einem Flammpunkt kleiner 1.000 C empfiehlt, behandelt der Münchner Vorschlag auch spezielle Brandschutzlösungen für Holzfassaden.

Beide Dokumente verfolgen ähnliche Ziele und ergänzen sich. Die Entwicklung eines gemeinsamen Vorschlages zur Erweiterung der bestehenden Holzbaurichtlinie, der beide Entwürfe miteinander kombiniert und auch neueste Erkenntnisse einfließen lässt, wäre wünschenswert und könnte die Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus weiter beflügeln.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Beitrag beschreibt kurz die Historie des mehrgeschossigen Holzbaus in Deutschland, dessen Entwicklung anhand der Ergebnisse einer Studie aufgezeigt wird. Diese Studie gibt einen Überblick, der aufgrund der z. T. schwer zugänglichen Informationen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Eine genauere Auswertung der in Deutschland errichteten mehrgeschossigen Holzbauten könnte belastbarere Ergebnisse liefern und die Bauweise weiter voranbringen. Sie wäre auch eine belastbare Basis für eine Novellierung der Rechtsgrundlagen. Die Zahl der bisher betrachteten Objekte erscheint aber trotzdem ausreichend, um häufige Abweichungen von den Brandschutzanforderungen nach derzeitigen rechtlichen Grundlagen zu identifizieren.

Auf dieser Grundlage wird näher auf die Brandschutzbekleidungen eingegangen. Dazu werden Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben „Optimierung

K60“ sowie Neuentwicklungen von Brandschutzbekleidungen aus Lehm und Kalk vorgestellt. Des Weiteren werden sichtbare Holzoberflächen, brennbare Dämmstoffe, Bauten über die Gebäudeklasse 4 hinaus, Hybridbauweisen, Sonderbauten sowie weitere Entwicklungen und Forschungsarbeiten im Bereich des mehrgeschossigen Holzbaus thematisiert.

Ein weiterer Abschnitt befasst sich mit Aufstockungen und Dachausbauten, die u. a. die Gebäudeklasse beeinflussen können. Dies ist nur ein Aspekt, warum solche Baumaßnahmen besondere Herausforderungen für den Brandschutz darstellen. Ähnliches gilt für Fassaden aus nachwachsenden Baustoffen bei mehrgeschossigen Bauten. Es werden Lösungsmöglichkeiten für Holzfassaden vorgestellt und weitere Forschungsarbeiten zur Verwendung nachwachsender Baustoffe für mehrgeschossige Fassaden erwähnt. Zur Einordnung der Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus in Deutschland dient ein kurzer Blick über die Landesgrenzen. Vor dem Hintergrund, dass Erfahrungen aus der Forschung und Anwendung des mehrgeschossigen Holzbaus sich auch in den Rechtsgrundlagen niederschlagen sollten, werden zwei Vorschläge zur Fortschreibung der Regelungen in der Muster-Holzbaurichtlinie aufgegriffen. Die in diesen Vorschlägen behandelten Punkte werden kurz vorgestellt und es wird eine Verknüpfung in einem gemeinsamen Erweiterungsvorschlag angeregt.

Zusammenfassend kann ein erfreulicher Zuwachs an mehrgeschossigen Holzbauten in Deutschland festgestellt werden, die in vielen Facetten realisiert werden. Weitere Forschungsarbeiten im Bereich der Analyse des Istzustandes könnten bei entsprechender Auswertung Entwicklungstendenzen aufzeigen, dadurch zur Optimierung der Bauweise beitragen und die Akzeptanz des (mehrgeschossigen) Holzbaus fördern. Der Wunsch nachwachsender Baustoffe in weiteren Baubereichen einzusetzen ist einer von vielen Forschungsschwerpunkten für die Zukunft.

ANMERKUNG DER AUTORIN

Zur Vervollständigung der Studie nimmt das iBMB gerne Informationen über weitere geplante oder realisierte mehrgeschossige Holzbauten sowie genauere Angaben zu den aufgelisteten Gebäuden entgegen.

LITERATUR

[1] Musterbauordnung (MBO); Fassung November 2002, zuletzt geändert im September 2012

[2] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (Muster-Holzbaurichtlinie – M-HFHHolzR); Fassung Juli 2004

[3] Kampmeier, B.; Wachtling, J.: Norddeutsches Zentrum für nachhaltiges Bauen – Ein Pilotprojekt mit angewandter Forschung. In: Braunschweiger

Brandschutz-Tage 2012, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 218. Braunschweig, 2012, ISBN 978-3-89288-203-9.

[4] Homepage des Herstellers Lignotrend, www.lignotrend.de vom 09. August 2013

[5] Poenicke, A.: Mehrgeschossiger Holzbau in Deutschland seit 2004, Studienarbeit am iBMB, Braunschweig, 2013

[6] DIN EN 13501-2:2010-02, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen

[7] Dehne, M.: Brandschutzkonzepte für mehrgeschosige Gebäude und Aufstockungen in Holzbauweise, Vortrag bei den Baugesprächen 10 der Fachhochschule Hildesheim (http://www.hawk-hhg.de/bauwesen/media/Baugespraeche10_Dehne_Brandschutzkonzepte.pdf)

[8] Dehne, M.; Kruse, D.: Brandschutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise In: Brandschutz bei Sonderbauten, Praxisseminar 2006, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz; Heft 192. Braunschweig, 2006, ISBN 978-3-89288-174-2.Hosser, D.; Kampmeier, B.; Kruse D.; Rüther, N.: Kurzbericht über das Forschungsvorhaben Optimierung K60, Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7-08.40/ II 2 – F20-08-026, Braunschweig Dezember 2010

[9] Wachtling, J.; Hosser, D.; Zehfuss, J.: Fire Protection of multi-storey straw bale buildings. In: Fifth international conference on structural engineering, mechanics and computation, Cape Town 2013

[10] Hollmann, D.: Grundlagen und Ingenieurmodell für den Nachweis von Holzbauteilen mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtung. Dissertation TU Braunschweig; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz; Heft 215; 2011

[11] Kampmeier, B.: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau. Dissertation TU Braunschweig; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 206, 2008, ISB 978-3-89288-189-6.

[12] Fritzen, K.; Dehne, M.; Kruse. D.: Nahe der Hochausgrenze. In: Bauen mit Holz 1.2008

[13] Kruse. D.; Dehne, M.: Brandschutzkonzept für einen Industriebau mit einer Gebäudehülle in Holzrahmenbauweise. In: Braunschweiger Brandschutz-Tage 2012, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 218. Braunschweig, 2012, ISBN 978-3-89288-203-9.

[14] Bruhn, P.: Wälderhaus – moderner Brandschutz. In: FeuerTRUTZ Magazin 2.2013

[15] Homepage der Vereinigung ZimmerMeisterHaus® e. V. www.zmh.com vom 23. August 2013

[16] Roedig, G.: Grüne in Berlin. In: Bauen mit Holz 3.2011

[17] Hoeft, M.: Ein Bauherr statt dreizehn. In: Bauen mit Holz 5.2012

[18] Homepage des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion des TU München www.hb.bv.tum.de am 23. August 2013

[19] Homepage des Fachgebietes Entwerfen und Konstruieren – Verbund-konstruktionen www.ek-verbundstrukturen.tu-berlin.de/ vom 23.08.2013

[20] Aufstockung im Holztafelbau. In: FeuerTRUTZ Magazin 1.2013

[21] Informationsdienst Holz spezial: Brandschutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude und Aufstockungen in Holzbauweise, Dezember 2012

[22] Lignum-Dokumentation Brandschutz: 7.1 Außenwände – Konstruktion und Bekleidung, Lignum, Zürich, 2009

[23] Kolb, H.: Aussenwände und Fassaden in Holz bei mehrgeschossigen Bauten. In: 4. HolzBauSpezial, Akustik & Brandschutz in Holz- und Innenausbau, Bad Wörishofen 13./14.03.2103

[24] Schäfer, W.: Viergeschosse aus Holz als Konzept für die Zukunft. In: Bauen mit Holz 6.2013

[25] Trinkert, A.; Schäfer, W.: Herausragend auch im Detail. In: Bauen mit Holz 12.2011

[26] Ryll, C.: Holzstadt im Höhenrausch. In: mikado 11.2011

[27] Bruhn, P.: Wänderhaus – moderner Brandschutz. In: FeuerTRUTZ Magazin 2.2013

[28] Homepage des Norddeutschen Rundfunks www.ndr.de vom 05. August 2013

[29] Leuters, B.; Schäfer, W.: Kreative Instandsetzung mit TES-Fassade. In: Bauen mit Holz 7-8.2013

[30] TES-Flyer zum Forschungsvorhaben „TES Energy Facade“ auf der Homepage des Fachgebietes Holzbau der TU München (http://www.holz-tum.de/index.php?MENU=forschung-lfd) vom 21.09.2013

[31] Homepage der Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft pro:Holz http://www.proholz.at/mehrgeschossiger-wohnbau-aus-holz-in-europas-metropolen/ vom 19. August 2013

[32] Thurik, A.: Hoher Norden. In: mikado 12.2011

[33] Dederich, L.: Villa Kunterbund in XL. In: mikado 12.2011

[34] Winter, S.; Merk, M.: Teilprojekt 02, Brandsicherheit im mehrgeschossigen Holzbau, Forschungsprojekt im Rahmen der der High-Tech-Offensive Zukunft Bayern des Bayrischen Staatsministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst (www.holzbauderzukunft.de)

KOPPLUNG VERSCHIEDENER FE-MODELLE ZUR SIMULATION DES THERMO-MECHANISCHEN VERHALTENS VON BETONBAUTEILEN BEI BRANDBEANSPRUCHUNG

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

EINLEITUNG

Eine der Hauptanwendungsgebiete der Ingenieurmethoden im Brandschutz ist der Nachweis der Tragfähigkeit von Bauteilen oder Tragwerken unter Hochtemperaturbeanspruchung. Sind detaillierte Aussagen über das Bauteil- oder Tragwerksverhalten gefordert, werden allgemeine Rechenverfahren angewendet, welche bei der Untersuchung von Bauteilverhalten zumeist auf der Methode der finiten Elemente basieren. Die Anwendung von allgemeinen Rechenverfahren ist dabei in den jeweiligen Technischen Regeln, z. B. im Eurocode 2 Teil 1-2 [1] sowie dem dazugehörigen Nationalen Anhang [2] für die Massivbauweise, als Nachweisverfahren enthalten. Im Vergleich zu den Tabellenverfahren und dem vereinfachten Verfahren sind jedoch nur Prinzipien der Anwendung angegeben, so dass es in der Verantwortung des Anwenders liegt, alle für den Nachweis maßgebenden Grundlagen angemessen zu berücksichtigen.

Dieser Beitrag zeigt Probleme und Lösungsmöglichkeiten auf, die bei der Verwendung von kommerzieller FE-Software bei der Berechnung von Bauteilverhalten unter Hochtemperaturbeanspruchung zum Nachweis der Standsicherheit auftreten können. So existiert zwar eine Reihe von leistungsfähigen Softwarepaketen mit großem Funktionsumfang, jedoch kann besonders bei der Untersuchung neuer Materialien, wie z. B. UHPC, die Definition der Materialeigenschaften abseits der im Programm vorgesehenen Möglichkeiten nötig sein. Ein weiterer wesentlicher Punkt sind die sich widersprechenden Anforderungen an die Netzdiskretisierung für das thermische und das thermo-mechanische Modell, was in vielen Fällen zu Konvergenzproblemen oder zu untragbaren Anforderungen an die Rechenleistung führt.

Der hier gezeigte Ansatz basiert auf der Übertragung der Temperaturwerte eines fein aufgelösten und an die Anforderungen der thermischen Berechnung angepassten Netzes auf ein gröber aufgelöstes Netz für die thermomechanische Berechnung. Die Temperatur ist hier ein einfacher skalarer Wert ohne Richtungsinformation (wie z.B. Verschiebungen vorhanden) und entsprechend problemlos zu übertragen. Der aktuelle Stand der Implementierung verlangt als Randbedingung für die Übertragung von Temperaturwerten koinzidente Knoten und die gleiche Zeitschrittweite (räumliche und zeitliche Übereinstimmung der zu übertragenden Werte). Dies schränkt die praktische Verwendbarkeit auf einfache Geometrie des klassischen Hochbaus ein. Grundsätzlich ist auch die Übertragung von Werten auf Basis nichtkonformer Netze und beliebiger Geometrie bei Ansatz von Interpolationsfunktionen denkbar. Hier würde neben der

bei Ansatz der FE-Methode impliziten Modellunsicherheit eine weitere Modellunsicherheit eingeführt.

Ein hinsichtlich der Netzanforderungen vergleichbares Beispiel ist im Bereich der Brandsimulation die Möglichkeit des Feldmodells FDS [3], mehrere, auch ineinander verschachtelte Netze zur Untersuchung von Detailproblemen bei insgesamt großen Untersuchungsgebieten zu verwenden. Auch hier gelten Anforderungen hinsichtlich Netzkonformität.

PROBLEMSTELLUNG

Die Erstellung von zwei FE-Modellen unter Berücksichtigung von Randbedingungen bei der Diskretisierung und dem Anwenden eines Übertragungsprogramms ist aufwendig. Bevor das Übertragungsverfahren und als Abschluss ein kurzes Beispiel gezeigt werden, sollen daher verschiedene Gründe für dieses Vorgehen aufgeführt werden. Ein Teil dieser Gründe resultiert aus den Anforderungen aus Wissenschaft und Forschung, ein weiterer Teil ist grundsätzlichen Modelleigenschaften der FE-Methode bei Ansatz von Kontinuumselementen geschuldet. Das Anwendungsgebiet liegt daher in der Untersuchung von neuen Materialien oder Detailausbildung und –problemen.

Daneben gilt bei der Untersuchung von Bauteilen unter Hochtemperaturbeanspruchung die Annahme vom Ebenbleiben der Querschnitte nicht mehr, da die thermischen Dehnungsanteile direkt aus der Querschnittstemperatur resultieren, welche über die Höhe des Querschnitts nichtlinear verteilt sind. Beispielhaft hierfür ist in Bild 1 ein auf der Unterseite brandbeanspruchter Teil einer Spannbetonhohldecke dargestellt.

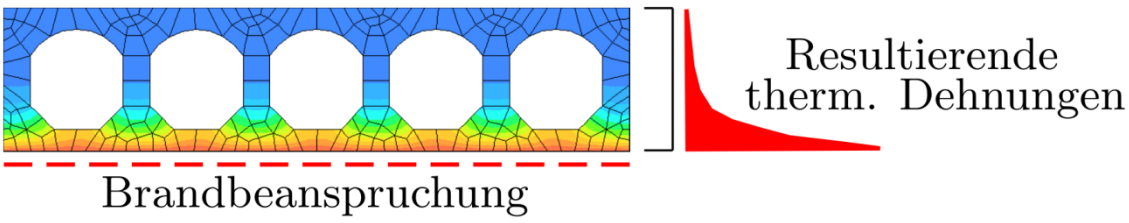


Bild 1 *Beispiel für die nichtlineare Dehnungsverteilung eines brandbeanspruchten Betonquerschnittes*

Übliche Formulierungen von Strukturelementen wie Stab-, Balken- oder Schalenelementen basieren jedoch auf der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte. Hier wird die Lage der Dehnungsebene iterativ unter Einhaltung der Gleichgewichts- und Verträglichkeitsbedingungen ermittelt. Sollen die Einflüsse aus thermischen Dehnanteilen detailliert untersucht werden, wird auf Kontinuumselemente zurückgegriffen, welche die kinematischen Beziehungen für jeden Knoten auf Basis einer Verschiebungs-Verzerrungsbedingung formulieren und den realen Dehnungszustand des Querschnittes je nach Elementtyp und Netzauflösung annähern.

ANSATZ DER TEMPERATURRANDBEDINGUNGEN

Bei der Untersuchung von Bauteilen unter Brandbeanspruchung wird das Brandszenario über Temperaturzeitkurven beschrieben, welche die Brandraumtemperatur darstellen. Wichtige Temperaturzeitkurven sind in Bild 2 dargestellt.

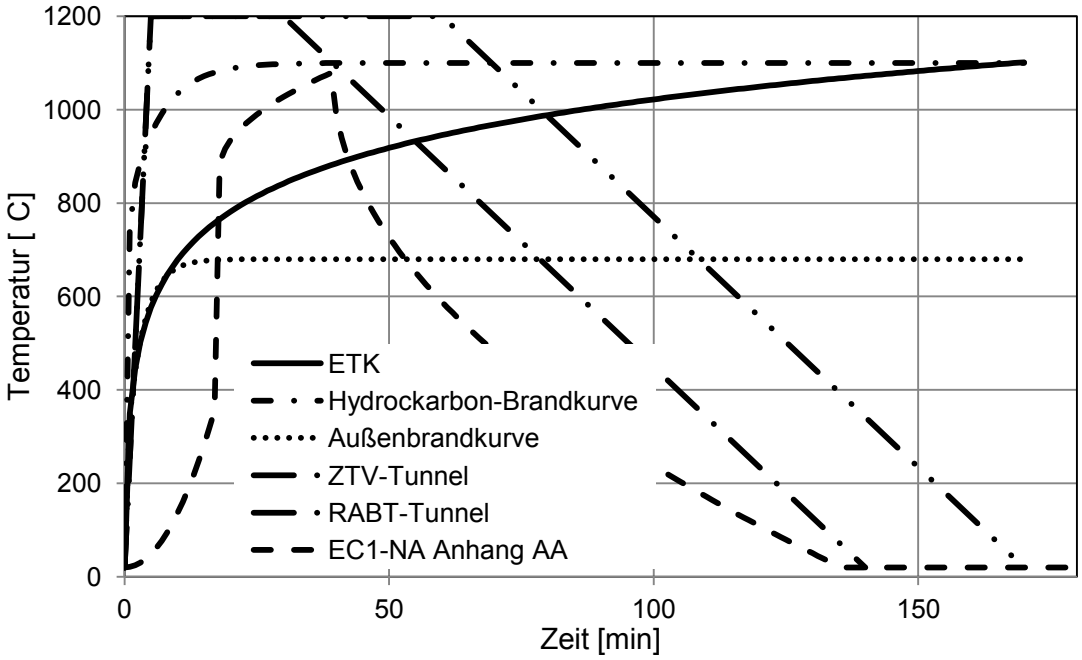


Bild 2 Verschiedene Temperaturzeitkurven für die Bauteilbemessung

Üblicherweise wird die Brandbelastung als Wärmestrom bei der Bauteiluntersuchung berücksichtigt, welcher auf Wärmeübergangsparametern wie dem Wärmeübergangskoeffizient für konvektive und dem Emmissivitätsbeiwert für radiative Anteile basiert. Zusammen mit der Brandraumtemperatur werden die resultierenden Wärmeströme als Neumann-Randbedingung bei der Modellbetrachtung angesetzt.

Gl. 1 zeigt die Fouriergleichung, welche zur Beschreibung der instationären Wärmeleitungsprozesse in Festkörpern angesetzt wird. Als Anfangsbedingung wird hier im Regelfall eine Temperatur von T = 20 °C gewählt. Die Materialparameter Wärmeleitfähigkeit λ, Rohdichte ρ und spezifische Wärmespeicherkapazität c_p sind in den meisten baupraktischen Fällen von der Temperatur abhängig und daher als Funktion von der Temperatur definiert.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\rho c_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}=-q \qquad (1)$$

Entsprechend dem Spannungs-Dehnungsverhalten werden diese temperaturabhängigen Funktionen durch Experimente ermittelt und als konstitutive Materialbeziehungen bezeichnet. Das resultierende, nichtlineare System aus partiel-

len Differentialgleichungen kann dann z. B. mit der FE-Methode und dem Newton-Raphson Iterationsverfahren gelöst werden. Da die Temperatur neben dem Ort auch von der Zeit abhängig ist (siehe Dämpfungsterm ρc_p), werden explizite oder implizite FDM-Ansätze verwendet, wie u. a. in [4] und [5] beschrieben.

BESCHREIBUNG DER KONSTITUTIVEN MATERIALBEZIEHUNG UNTER NATURBRANDBEANSPRUCHUNG

Die Berechnung der Querschnittstemperaturen ist eine Basisfunktion vieler kommerzieller und nichtkommerzieller FE-Programme. Auch die Berücksichtigung physikalisch nichtlinearer Zusammenhänge, d. h. die Abhängigkeit der Parameter wie z. B. der Wärmeleitfähigkeit λ von der gesuchten Größe Temperatur kann in den meisten Anwendungen berücksichtigt werden. Schwieriger wird es, wenn Materialgesetze verwendet werden sollen, die ein besonderes Verhalten beschreiben. Wie in Bild 2 dargestellt, enthalten sowohl die Naturbrandkurve nach dem Nationalen Anhang des Eurocode 1 (Anhang AA [6]) als auch die Temperaturzeitkurven für Straßen- und Eisenbahntunnel neben einer Aufheiz- auch eine Abkühlphase, die bei Ansatz der Einheitstemperaturzeitkurve nicht vorhanden ist. Soll das Materialverhalten bei Abkühlung unterschiedlich zum Aufheizverhalten beschrieben werden, stoßen die meisten kommerziellen Programme an ihre Grenzen. Aktuelle Untersuchungen an Proben aus Beton zeigen hier eine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit in der Abkühlphase von der erreichten Maximaltemperatur, wie in Bild 3 dargestellt.

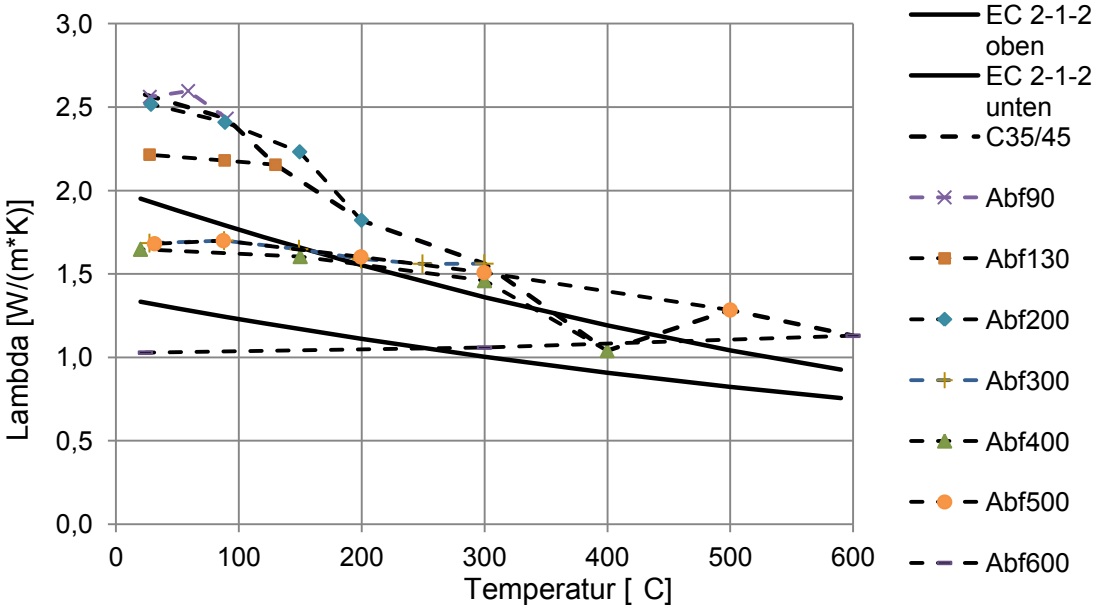


Bild 3 *Wärmeleitfähigkeit von Beton in der Abkühlphase in Abhängigkeit der erreichten Maximaltemperatur*

Die Berücksichtigung derartigen Materialverhaltens wird erst bei Ansatz einer Naturbrandbeanspruchung relevant, da die ETK keine Abkühlphase besitzt. In diesem Fall ist es notwendig, auf selbstentwickelte Programme zur Lösung des

Wärmeleitungsproblems mit vollem Zugriff auf einzelne Programmbestandteile zurückzugreifen. Die Übertragung der berechneten Temperaturen ermöglicht dann die weitere thermomechanische Berechnung mit einem validierten und allgemein anerkannten Programm, in diesem Beitrag das FE-Programmsystem DIANA [7].

UNVEREINBARE ANFORDERUNGEN AN DIE NETZDISKRETISIERUNG

Ein weiteres Problem stellen unterschiedliche und sich widersprechende Anforderungen an die Netzdiskretisierung des Modells für die thermische und die thermomechanische Berechnung dar. Der vfdb-Leitfaden [8] empfiehlt als Daumenregel eine Anpassung der Elementgeometrie an den maximal zu erwartenden Temperaturgradienten, resultierend in maximalen Kantenlängen von 2 bis 3 cm und maximalen Verhältnis der Kantenlängen von 1:2. Wie in Bild 2 dargestellt, erreicht z. B. die EBA-Tunnelbrandkurve Aufheizgeschwindigkeiten von 240 K/min, was zu stark zunehmender Elementverfeinerung an den brandbeanspruchten Kanten/Oberflächen und zu allgemein sehr hoher Netzauflösung des untersuchten Querschnitts führen würde.

Ein sehr hochaufgelöstes Netz ist für ein rein thermisches FE-Modell im Regelfall kein Problem, da die Berechnung zweidimensionale Querschnitte verhältnismäßig wenig Rechenleistung erfordert. Die komplette thermomechanische Berechnung eines dreidimensionalen Bauteils würde aber zu untragbaren Laufzeiten der Berechnungen aufgrund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden führen.

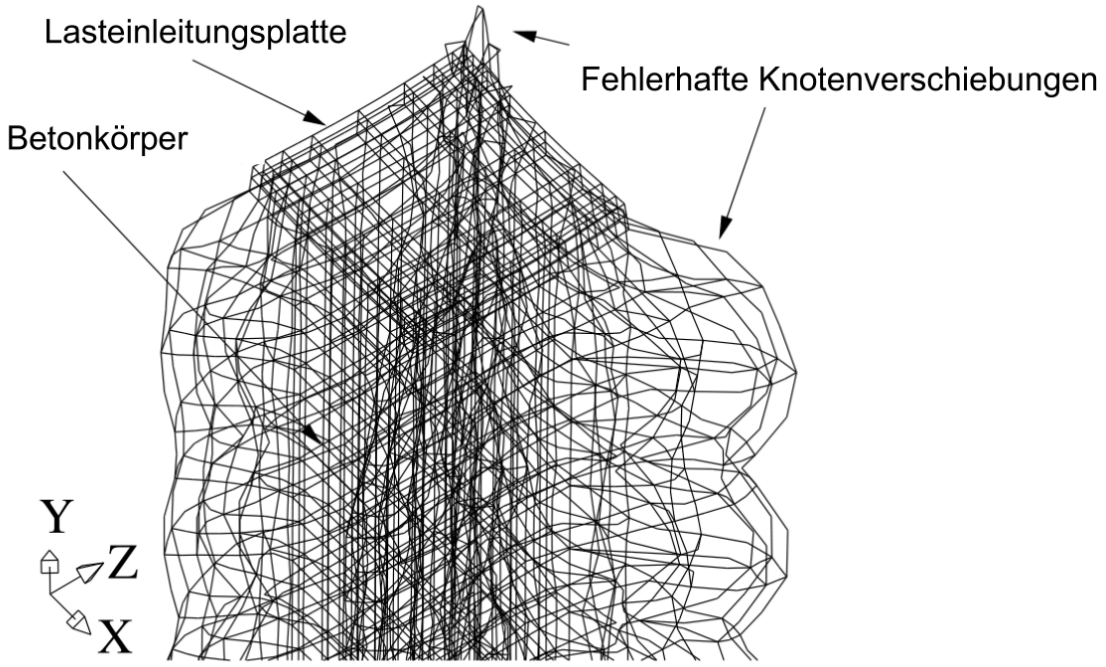


Bild 4 Auftretende Probleme bei der Berechnung einer brandbeanspruchten Stütze an den Elementen mit ungünstigen Längenverhältnissen an den Ecken

Die Verletzung der vorgenannten Kriterien führt im Regelfall zu Konvergenzproblemen und bei Ansatz von Iterationsverfahren, welche die Tangentialsteifigkeitsmatrix verwenden, wie z. B. das Newton-Raphson-Verfahren (Standardverfahren in den meisten FE-Programmen) zu Bifurkationsphänomenen (vgl. [9]). Ergebnis sind unrealistische Knotenverschiebungen, wie hier in Bild 4 dargestellt, und letztlich zu Konvergenzproblemen bei der Berechnung.

Das Verhalten von FE-Modellen zur Temperaturberechnung mit zu geringer Auflösung ist beispielhaft für den Fall der eindimensionalen Wärmeleitung in Bild 5 dargestellt. In diesem Beispiel wurde die Temperaturentwicklung einer Tunnelschale in 6 cm Tiefe (Bewehrungstiefe) bei Ansatz der EBA-Tunnelbrandkurve untersucht. Wie in Bild 5 zu erkennen kommt es bei Ansatz eines zu groben Netzes zu numerischen Problemen, die sich typischerweise in einem Abfall der Temperaturen in den ersten Zeitschritte kleiner der Temperatur der Anfangsrandbedingung zeigen. Dieses Verhalten ist physikalisch falsch und kann lokal zu hohen negativen Temperaturen und resultierend zu numerischen Problemen in der darauf folgenden thermomechanischen Analyse führen.

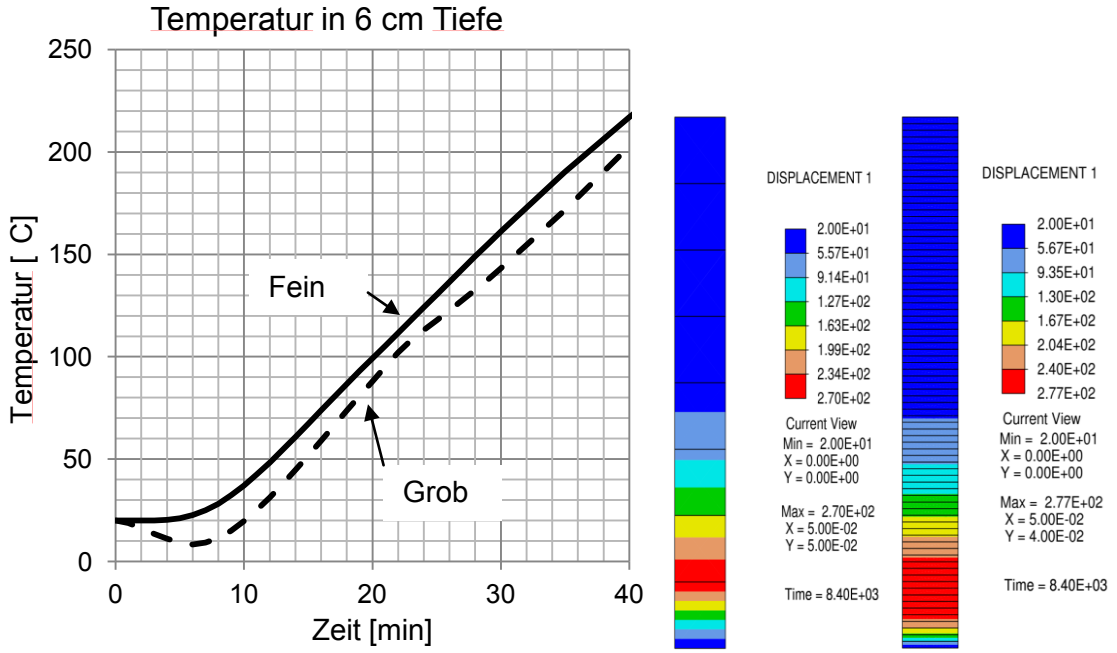


Bild 5 *Temperatur in 5 cm Tiefe nach Ansatz eines grob und eines fein aufgelöstes FE-Modells zur Berechnung der Temperaturen*

Auch hier kann die Kopplung verschiedener Modelle für die thermische und thermomechanische Analyse die Probleme umgehen, die bei gemeinsamer Benutzung eines Netzes entstehen. So ist das in Bild 5 dargestellte Netz zu fein aufgelöst und würde bei Berechnung des thermomechanischen Verhaltens zu nicht vertretbaren Berechnungslaufzeiten führen.

KOPPLUNG VERSCHIEDENER FE-MODELLE

In diesem Beitrag sollen die Vorteile des kommerziellen Softwarepakets DIANA bei der diskreten Modellierung der Bewehrung und der Möglichkeit der Nutzung selbstentwickelter Subroutinen angesetzt werden , um das Verhalten von Stahlbetonbauteilen unter Brandbeanspruchung zu berechnen. Die Temperaturwerte sollen dabei aus den in den vorherigen Abschnitten angesprochenen Gründen im Voraus berechnet und dann für die thermomechanische Berechnung an DIANA übergeben werden. Damit Temperaturwerte übergeben werden können, müssen einige Anforderungen eingehalten werden.

Für die hier untersuchten Stützen als dreidimensionales FE-Modell wird angenommen, dass die beflammten Flächen über die gesamte Höhe mit der gleichen Wärmestromrandbedingung beaufschlagt werden. Diese Anforderung stellt im Regelfall kein Problem dar, da jedes Bauteil so bemessen wird und experimentelle Untersuchungen durch Messung der Brandraumtemperatur diese Randbedingung im Wesentlichen sicherstellen. Die Geometrie des Bauteils darf sich ebenfalls nicht über die Höhe ändern.

Auf Grundlage dieser Annahmen muss nur noch der Querschnitt des Bauteils unter Berücksichtigung der brandbeaufschlagen Flächen untersucht werden. Eine im Raum befindliche Stütze wird so von allen vier Seiten beflammt, während ein Balken unter einer Decke als von drei Seiten beflammt angenommen wird. Beispielhaft sind verschiedene Situationen in Bild 6 dargestellt.

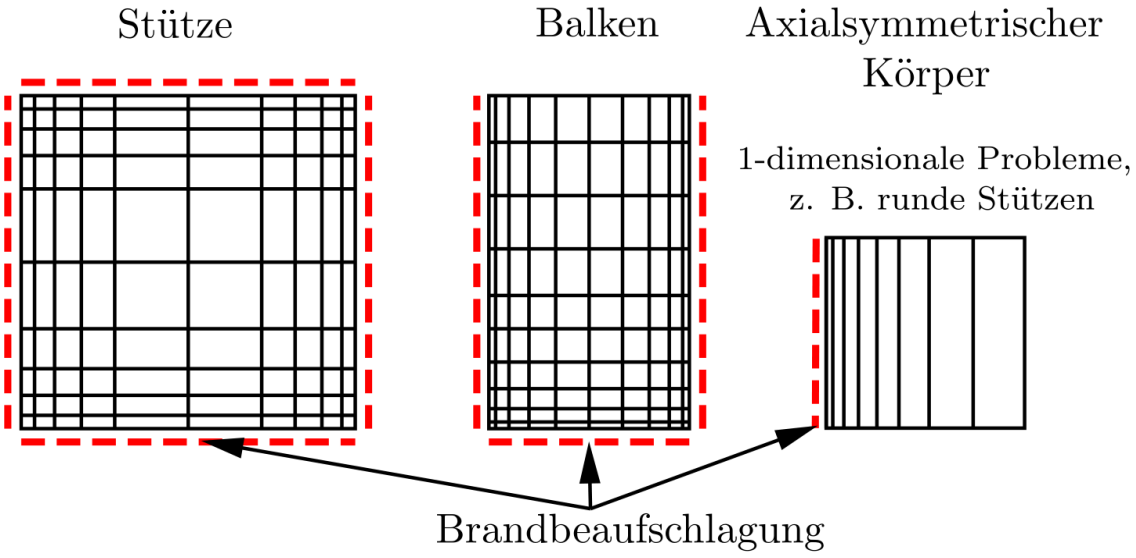


Bild 6 *Beispiele für Querschnitte und abgeleitete FE-Modelle zur Berechnung des Temperaturfeldes*

Das Ergebnis sind Temperaturwerte für den untersuchten Querschnitt, welche nun auf das FE-Modell zur thermomechanischen Untersuchung übertragen werden können. Da die Berechnungen zweidimensionaler Probleme deutlich

weniger Rechenleistung benötigen, kann hier ein fein aufgelöstes Netz verwendet werden.

BEDINGUNGEN FÜR DAS NETZ DER THERMISCHEN ANALYSE

Die Querschnitte von Stahlbetonbauteilen lassen sich wie in Bild 6 dargestellt meist als einfache Rechtecke modellieren, wobei das Netz an den brandbeaufschlagten Rändern hin im Regelfall verfeinert wird. Hierbei gelten für die thermische Analyse als Basis für die thermomechanische Analyse zwei wesentliche Randbedingungen. Die Zeitschrittweise muss so gewählt werden, dass für jeden Zeitschritt der thermomechanischen Analyse die benötigten Temperaturwerte vorliegen. Hier ist darauf zu achten, dass die thermische Analyse bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten eine kleine Zeitschrittweite benötigt.

Daneben muss für jeden Elementknoten des thermomechanischen Modells nach der Übertragung ein Temperaturwert vorliegen, unabhängig davon, woher dieser stammt. Wenn man hier einen zusätzlichen Modellfehler durch Interpolationsrechnungen vermeiden möchte, muss das Netz und der Elementtyp der thermischen Simulation entsprechend gewählt werden. Typischerweise geschieht das durch eine geeignete Netzdiskretisierung, wobei für jeden Knoten des thermomechanischen Netzes ein koinzidenter Knoten des thermischen Netzes vorhanden ist. Zur Veranschaulichung ist die Übertragung der einzelnen Knotenwerte eines zweidimensionalen Netzes auf ein dreidimensionales Netz, beispielhaft in Bild 8 dargestellt.

In den meisten Fällen sind die Anforderungen problemlos zu erfüllen, da das Netz des thermischen Modells in der Regel feiner aufgelöst ist und durch den im Verhältnis zur thermomechanischen Berechnung geringeren Bedarf an Rechenleistung trotzdem deutlich schneller Ergebnisse liefert. Außerdem kann die Zeitschrittweite entsprechend der zu erwartenden Aufheizgeschwindigkeit angepasst werden und muss nicht zwangsläufig auch der gewählten Zeitschrittweite für die thermomechanische Berechnung entsprechen.

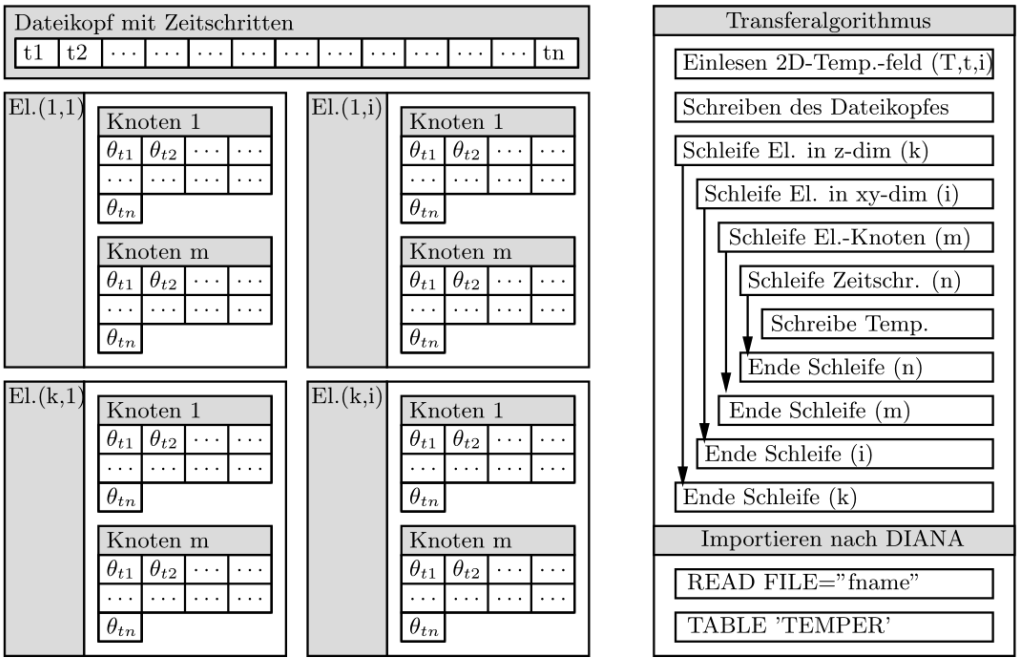
Im Vorgriff auf Bild Bild 8 soll der Mechanismus der Temperaturübertragung kurz für ein äquidistantes Netz aus dreidimensionalen Kontinuumselementen mit 20 Knoten (8 Eck- und 12 Kantenknoten) beschrieben werden. Je nach Lage in z-Richtung wird zusätzlich zwischen Kantenknoten der Haupt- und Kantenknoten der Nebenquerschnittsebene unterschieden. Die Eckknoten liegen immer auf der Hauptquerschnittsebene. Mit der Anzahl der Elemente, den Abmessungen des thermomechanischen FE-Modells und Kenntnis der lokalen Lage der Knoten für jedes Element können so für jeden Zeitschritt und in Abhängigkeit der Haupt- und Nebenquerschnittsebene die Temperaturwerte zugeordnet werden.

Die so zugewiesenen Werte müssen in einem nächsten Schritt in ein für die zur Lösung des thermomechanischen Problems verwendete Software lesbares Format gebracht werden.

VERKNÜPFUNG DER THERMISCHEN UND THERMO-MECHANISCHEN ANALYSE

Der Algorithmus des Übertragungsprogramms wurde an die gewählten dreidimensionale Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion (für Details siehe [10]) des thermomechanischen Modells, hier DIANA, angepasst. Zusätzlich werden die Temperaturwerte in ein von DIANA lesbares Format umgewandelt. Während die dreidimensionalen FE-Elemente anderer Softwarepakete auf ähnlichen oder gleichen mathematischen Grundlagen beruhen (Isoparametrische 3D-Elemente mit 20 Knoten und quadratischer Ansatzfunktion werden als „serendipity-class-elements“ bezeichnet), können die Anforderungen an die Dateistruktur des Temperaturfeldes deutlich abweichen. Soll als thermomechanischer Löser ein anderes Programm als DIANA verwendet werden, müssen hier programmspezifische Anpassungen vorgenommen werden.

Die Wahl der Software zur Lösung des thermischen Problems ist weniger an Randbedingungen geknüpft, so dass letztlich jedes Programm verwendet werden kann, das über die Möglichkeit einer definierten Ausgabe von Temperaturwerten verfügt. Der in diesem Beitrag vorgestellte Stützenquerschnitt wurde mit ANSYS berechnet, da hier die Möglichkeit der Definition skriptgesteuerten Eingabedateien vorliegt. Auf das (hinreichend fein aufgelöste) thermische Modell soll daher nicht näher eingegangen werden. Wichtig ist, dass für jeden Knoten des thermomechanischen Modells und für jeden Zeitschritt der Berechnung ein Temperaturwert vorliegt. Das für DIANA lesbare Dateiformat und das Verfahren zur Erzeugung der Datei ist in Bild 7 gezeigt und wird im Folgenden erläutert.



a) Dateistruktur des Temperaturfeldes für DIANA

b) Schema des Transferalgorithmus

Bild 7 *Übertragungsalgorithmus für ein Temperaturfeld, lesbar von der Software DIANA*

Der erste Teil der in Bild 7 gezeigten Datei ist der Kopf, der die Werte jedes Zeitschrittes in der Einheit Sekunden enthält. Danach folgen die Temperaturwerte, welche direkt hintereinander geschrieben werden. Die Logik folgt dabei der Darstellung in Bild 7, so dass zuerst die Temperaturwerte des ersten Knotens des ersten Elementes für jeden Zeitschritt enthalten sind, danach folgen die Temperaturwerte für alle Zeitschritte des nächsten Knotens. Im Gegensatz zu Bild 7 ist allerdings kein Absatz zwischen den Werten der einzelnen Knoten enthalten. In dem hier vorgestellten Beispiel sind nach dem erläuterten Schema für 20 Knoten und jeden Zeitschritt Temperaturwerte hintereinander weg aufgelistet und enthalten damit die benötigten Daten für ein dreidimensionales Element. Hierbei werden alle Elemente des FE-Modells der Nummerierung nach aufgeführt, ohne zwischen der räumlichen Lage zu unterscheiden. Da die Diskretisierung des FE-Netzes bekannt ist, können die einzelnen Elemente allerdings ohne Probleme ihrer Lage zugeordnet werden, da das Produkt der Elemente in X- und Y-Richtung eine Querschnittsebene definiert. In jeder Ebene wird weiterhin zuerst in X-Richtung aufgefüllt, dann die nächste „Zeile“ (Y+1) begonnen. Diese Organisation kann je nach verwendetem Programm unterschiedlich funktionieren und bezieht sich daher auf das Vorgehen von DIANA.

Mit dieser Kenntnis können die im Vorgriff berechneten Temperaturen nach Bild 7 für eine Querschnittsebene aufgelistet werden. Da für unsere Stütze über die Höhe die gleichen Randbedingungen vorliegen, wird die so beschriebene Querschnittsebene in einem letzten Schritt über die Höhe kopiert. Sollen unterschiedliche Temperaturen über die Höhe übertragen werden, wird die getrennte Berechnung des thermischen und thermomechanischen Verhaltens mit unterschiedlichen Modellen und anschließender Kopplung schnell sehr kompliziert. In der jetzigen Form können daher nur Temperaturen basierend auf zweidimensionalen Modellen übertragen werden.

Bild 8 zeigt eine grafische Übersicht des Verfahrens zum besseren Verständnis.

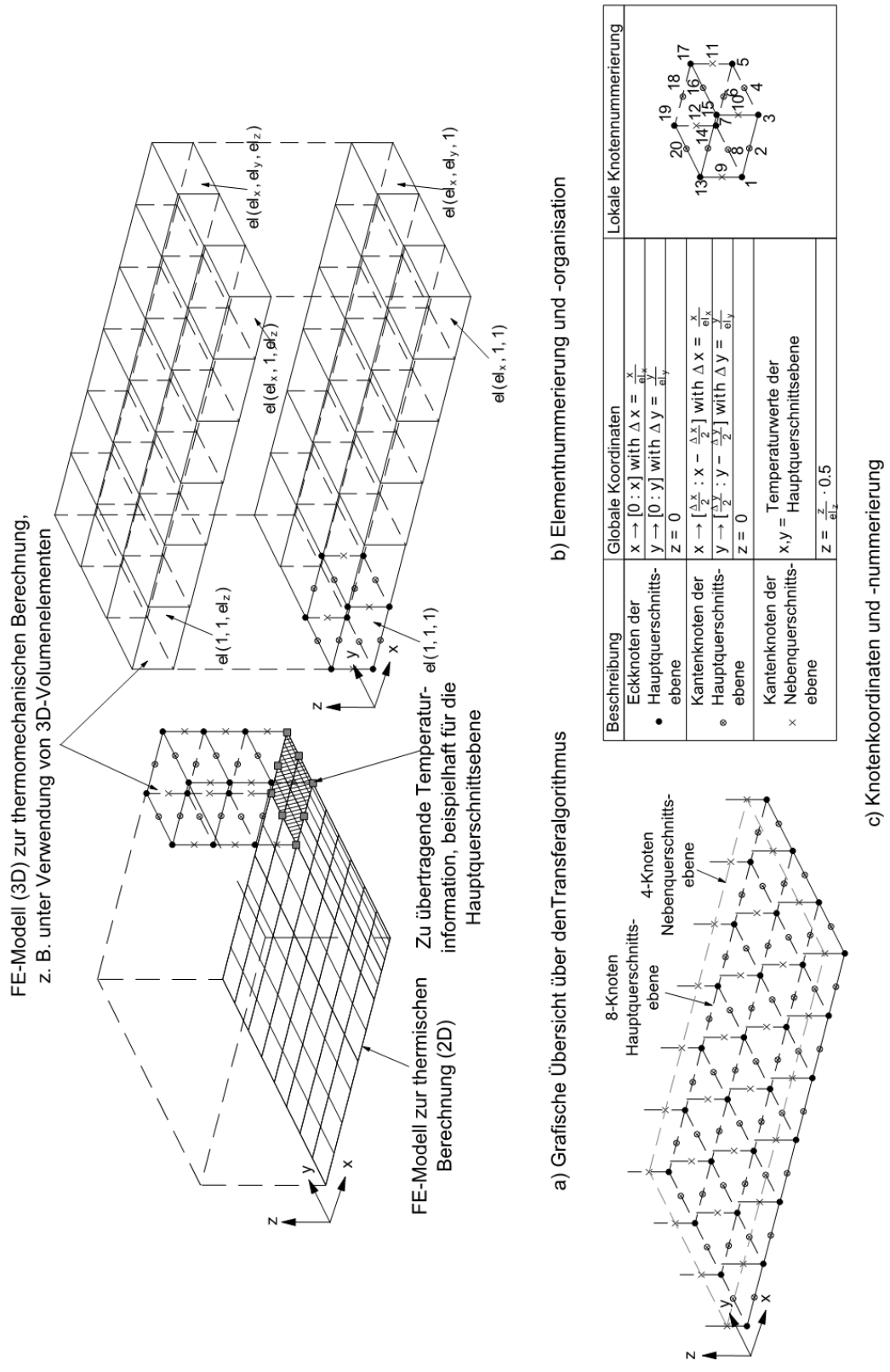


Bild 8 Überblick über die verschiedenen Schritte des Übertragungsverfahren

ANWENDUNG ZUR LÖSUNG EINES KONKRETEN PROBLEMS

Das Übertragungsverfahren wurde zur Berechnung des Verformungsverhaltens von Stützen aus ultrahochfestem Beton eingesetzt, da hier die neu ermittelten, temperaturabhängigen Materialeigenschaften sowohl für die thermische als auch für die thermomechanische Analyse korrekt berücksichtigt werden sollten. Die thermische Berechnung wurde dabei mit einem fein aufgelöstem FE-Modell in ANSYS berechnet, wobei die für den UHPC ermittelten temperaturabhängigen Materialgesetze für die Wärmeleitfähigkeit λ, die Rohdichte ρ und die spezifische Wärmespeicherkapazität c_p angesetzt wurden (siehe [11]). Die thermische Analyse diente dabei zum einen als Validierungsrechnung für die experimentell bestimmten Materialparameter, zum anderen als Basis für die darauf folgende thermomechanische Berechnung des Stützenverhaltens unter Brandbeanspruchung und mechanischer Belastung.

Das thermomechanische Modell besteht aus den bereits beschriebenen dreidimensionalen FE-Elementen, wobei neben der eigentlichen Stütze auch die Lasteinleitungsplatte aus Stahl der Qualität S235 modelliert wurde. Dies dient zum einen der besseren Nachbildung der Versuchsrandbedingungen und nutzt die Möglichkeiten dreidimensionaler FE-Modelle aus, zum anderen war diese Vorgehensweise nötig, da die Last aus numerischen Gründen nicht direkt auf einzelne Knoten des Betonkörpers aufgebracht werden konnte. Die Bewehrung der Stütze wurde mit Hilfe spezieller Bewehrungselemente modelliert, wobei hier ein perfekter Verbund zwischen Bewehrung und Beton angenommen wird. Neben den Möglichkeiten bei der Definition eigener Materialmodelle und der bereits vorhandenen Modelle für Beton ist die diskrete Berücksichtigung von Bewehrung für die thermomechanische Berechnung ein wesentlicher Vorteil bei der Kopplung der verschiedenen FE-Modelle.

Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Daten untersuchten Betonstützen und die angewandten Materialgesetze bzw. Materialeigenschaften.

Nähere Angaben zu dem UHPC und den angesetzten Materialmodellen befinden sich in [11]. Hier soll nur kurz auf das verwendete biaxiale Materialmodell des Betons eingegangen werden, da dieses nicht in [11] erläutert wird. Die entsprechenden temperaturabhängigen Bruchflächen sind in Bild 9 dargestellt.

Die zur Beschreibung der Drucker-Prager-Funktion benötigten Parameter wurden dabei an biaxialen Versuchen der Vorgängermischung des verwendeten UHPC sowie einer weiteren Mischung ermittelt, wobei hier lediglich Daten bei Raumtemperatur (20 °C) vorlagen. Das temperaturabhängige Ver- und Entfestigungsverhalten wurde dann anhand einaxialer Zylinderdruckversuche abgeleitet.

Tabelle 1 Zusammenstellung der wesentlichen Daten und Eingangsgrößen der untersuchten UHPC-Stützen

Parameter	Wert oder Beschreibung
Querschnittsfläche	300 x 300 mm²
Höhe der Stütze	3,7 m
Bewehrung	8 Ø 20 mm, BST 500
Druckfestigkeit UHPC bei 20 °C	um 155 N/mm²
Zugfestigkeit UHPC bei 20 °C	um 15 N/mm²
Vertikallast	1800 kN
Exzentrizität	7,5 und 15 mm
Brandbeaufschlagung	Einheits-Temperaturzeitkurve mit Wärmeübergangsparametern nach Eurocode 2 Teil 1-2
Materialmodell Beton des thermomechanische Berechnung	Kombinierte Drucker-Prager & Rankine Fließfläche mit Ver- und Entfestigung in Abhängigkeit des Dehnungszustandes und der Temperatur
Materialmodell Beton thermische Berechnung	Isotrope, nichtlineare Wärmeleitung nach Fourier

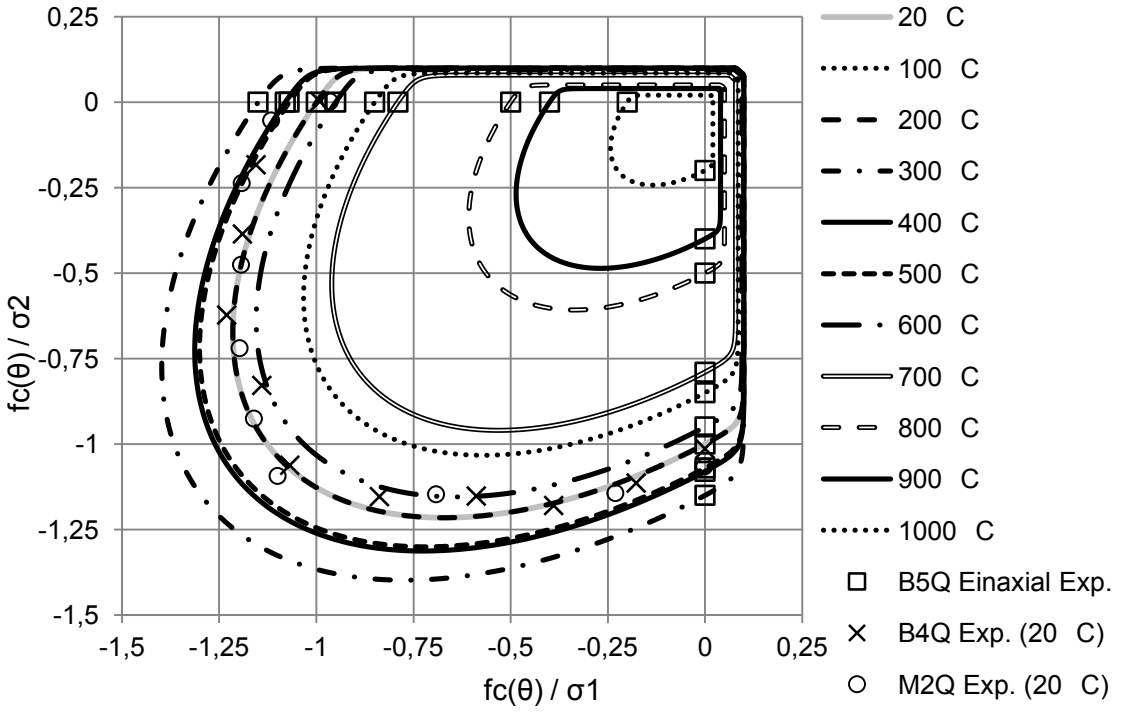


Bild 9 Bruchflächen des untersuchten UHPC in Abhängigkeit der Temperatur

Abschließend sind das statische System der untersuchten Stütze sowie ein Bild im Einbauzustand vor dem Brandversuch dargestellt (siehe Bild 10).

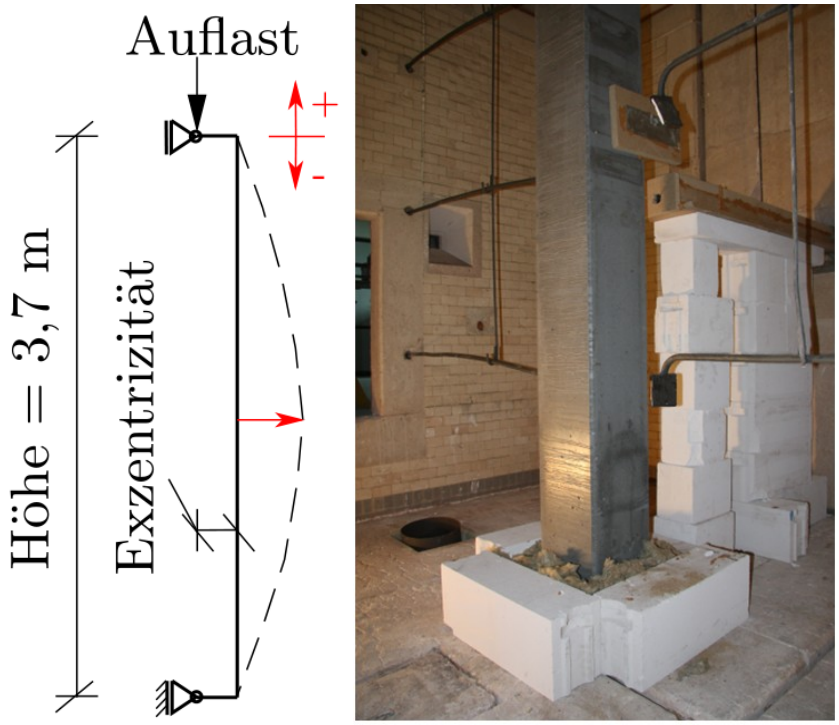


Bild 10 Statisches System der untersuchten Stütze und Bild vor dem Versuch

ERGEBNISSE

Abschließend werden die Ergebnisse sowohl für die thermische und die thermomechanische Berechnung aufgeführt. Bild 11 zeigt, dass die berechneten Temperaturen gut mit den gemessenen Temperaturen übereinstimmen. Hierbei wurde in verschiedenen Querschnittstiefen von 10 bis 80 mm auf vier verschiedenen Höhen der Stütze gemessen, um lokale Effekte durch die Beflammung im Ofen abzudecken. Daher sind mehrere Versuchskurven für jede Querschnittstiefe in Bild 11 als gepunktete Linien eingetragen. Die Ergebnisse der thermischen Berechnung zeigen, dass die experimentell ermittelten Daten der Wärmeleitfähigkeit λ, der Rohdichte ρ und der spezifische Wärmespeicherkapazität c_p gut geeignet sind, Temperaturen in brandbeaufschlagten UHPC-Querschnitten zu berechnen.

Wie vorgesehen können die Temperaturwerte in einem nächsten Schritt als Basis der thermomechanischen Berechnung verwendet werden. Da sich die Temperaturrandbedingungen für die weitere Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens nicht ändern und die Abweichungen der gemessenen Temperaturen in den einzelnen Versuchen gering sind, wird das berechnete Temperaturfeld daher für beide hier vorgestellten Versuche verwendet.

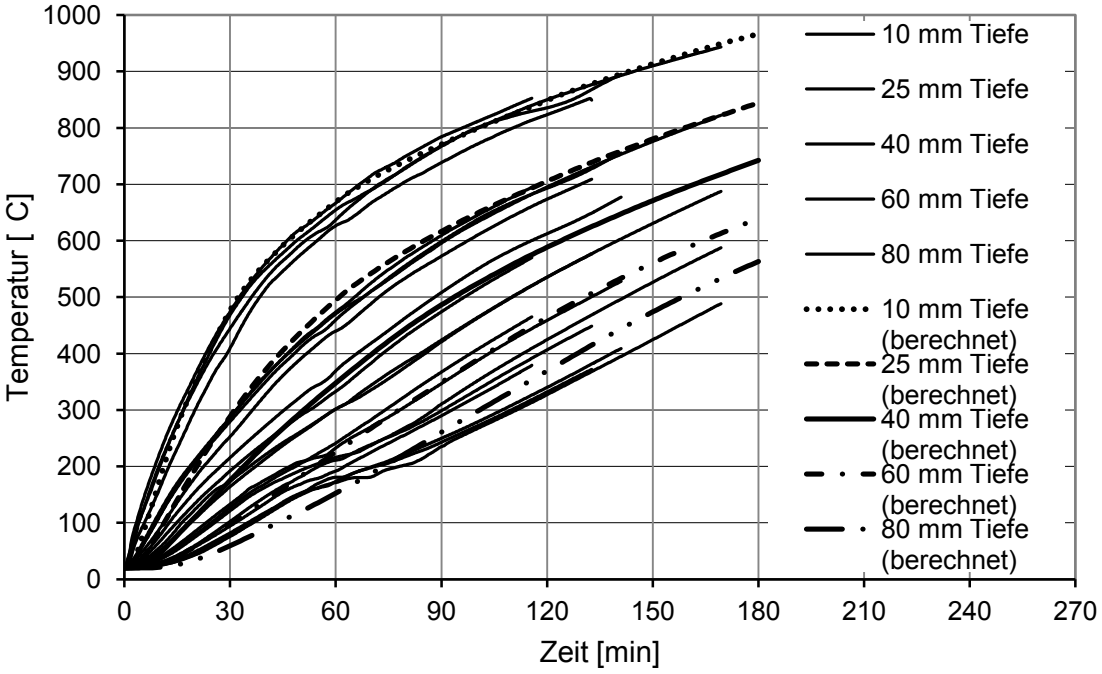


Bild 11 Temperaturen im Stützenquerschnitt über die Zeit

Die Ergebnisse der thermomechanischen Berechnung mit DIANA sind in Bild 12 dargestellt. Die Grafik enthält dabei nur die Verformungen aufgrund der Brandbeaufschlagung, die durch die mechanischen Belastungen enthaltenen Anfangsverformungen sind nicht dargestellt.

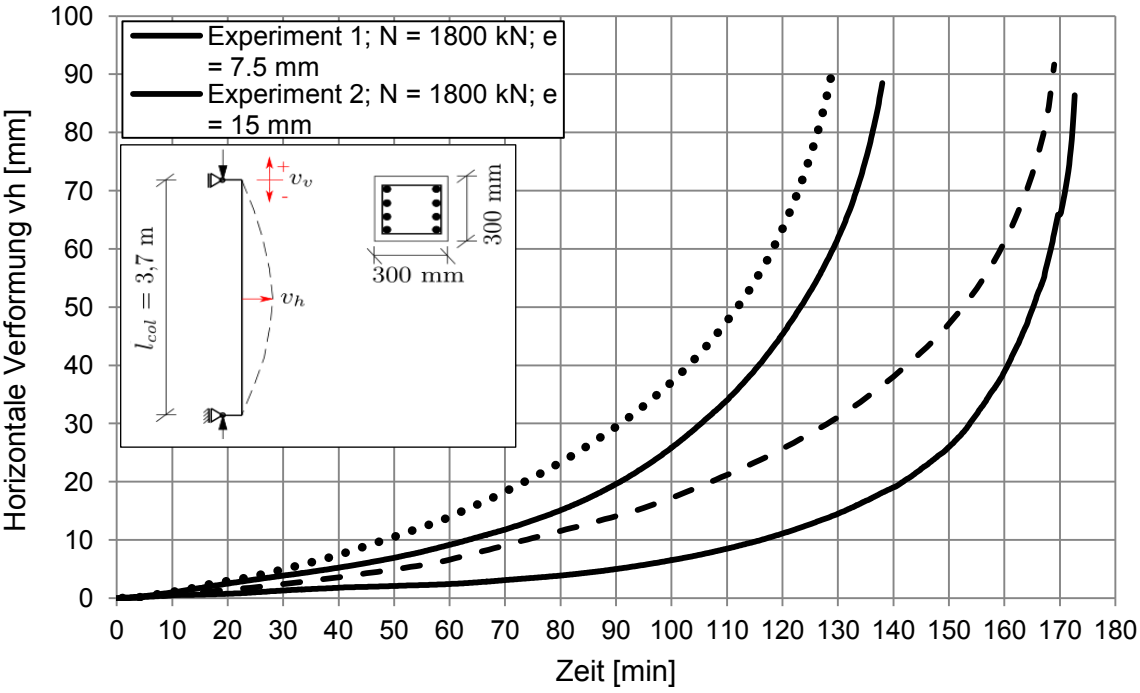


Bild 12 Horizontale Verformung in Stützenmitte über die Zeit

Das im Brandschutzingenieurwesen wesentliche Kriterium für Bauteile, die Feuerwiderstandsdauer, wird durch die Berechnung gut wiedergegeben. Für den Versuch 2 ergibt sich eine Differenz zwischen Berechnung und Versuch von etwa 8 min, während die Differenz bei Versuch 1 bei etwa 5 min liegt. Das Versagen der Stütze ist dabei durch den Zeitschritt definiert, in dem große Verformungen auftreten und die Verträglichkeitsbedingungen verletzt werden. Wie in Bild 12 dargestellt wurden für die UHPC-Stützen Feuerwiderstandsdauern von 140 min bei einer Lasteinleitung mit einem Hebelarm von 15 mm und 170 min bei einem Hebelarm von 7,5 mm ermittelt. Setzt man die oben erwähnten Abweichungen mit den Feuerwiderstandsdauern ins Verhältnis, liegt die Abweichung zwischen Versuch und Berechnung bei etwa 6 bzw. 2 %. Rein auf die Feuerwiderstandsdauer bezogen, sind diese Werte sehr gut.

Zu beachten ist jedoch, dass die Verformungen in der Berechnung überschätzt werden. Aufgrund der geringen Erfahrung bei Einsatz des neuen Materials UHPC im Zusammenspiel mit den Einflüssen aus Theorie II. Ordnung unter Brandbeanspruchung ist für die genaue Berechnung der brandinduzierten Verformungen daher weiterer Forschungsbedarf vorhanden. Grundsätzlich führt die gesonderte Berechnung der Querschnittstemperaturen und anschließende Kopplung mit einem thermomechanischen Modell aber zu guten Ergebnissen und ist in der Lage, das Bauteilverhalten unter Hochtemperatureinfluss vorherzusagen.

ZUSAMMENFASSUNG

Um die Eingangs vorgestellten Probleme und Einschränkungen bei der Verwendung kommerzieller FE-Software zu umgehen, bietet die Kopplung verschiedener Programme und verschiedener FE-Modelle eine einfache und effektive Lösung. Typische Probleme im Brandschutzingenieurwesen sind dabei sich widersprechende Anforderungen an die Netzdiskretisierung als auch Anforderungen aus dem Forschungsbetrieb an die möglichst freie Formulierung eigener konstitutiver Materialbeziehungen, wie sie bei der Untersuchung von neuen Materialien oft nötig sind. Daneben kann auf für die einzelnen Problemfelder spezialisierte FE-Software oder auch selbstentwickelte Forschungssoftware zurückgegriffen werden.

Damit die Kopplung der thermischen und der thermomechanischen Berechnung anwendbar ist, muss die für die thermomechanische Berechnung verwendete Software eine Funktion zum Einlesen der Temperaturwerte anbieten. In diesem Beitrag wurde an dieser Stelle die FE-Software DIANA verwendet du auf die hier spezifischen Anforderungen eingegangen. Daneben spielt der für die thermomechanische Berechnung verwendete Elementtyp eine Rolle, der aber in vielen Fällen auf etablierten und daher oft angewandten mathematischen Grundlagen basiert.

Als wesentlicher Nachteil der Methode muss die Beschränkung auf einfache Querschnitte genannt werden. Komplexere Bauteile mit über der Höhe verän-

derlichen Querschnitten oder über der Höhe veränderlicher Brandbeaufschlagung können nur mit deutlichem Mehraufwand nach der vorgestellten Methode gekoppelt werden. Ein bisher eher theoretischer Nachteil ist der Verlust der Möglichkeit, den Einfluss der durch wachsende Verformung entstehenden Gefügeveränderung und Rissbildung auf die thermische Berechnung zu berücksichtigen. So ist am Beispiel der Wärmeleitung denkbar, dass Risse und die generelle Veränderung des Gefüges zu einer Reduktion der Wärmeleitung an der lokalen Position des Risses führen. Aufgrund der großen Unsicherheiten bei der Bestimmung des Brandszenarios oder dem Bemessungscharakter der ETK als Brandbelastung ist der Gewinn eines solchen Ansatzes allerdings fraglich.

LITERATUR

[1] DIN EN 1992-1-2:2004 + AC:2008, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeiner Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008.

[2] DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstrkution von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.

[3] McGrattan, K., et al: Fire Dynamics Simulator (Version 5) - User's Guide, NIST Special Publication 1019-5, 2010.

[4] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer, 2002

[5] Zienkiewicz, O., Taylor, R. L.: The Finite Element Method - Volume 2: Solid Mechanics, 5. Auflage, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2000.

[6] DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1.2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkung auf Tragwerke.

[7] deWitte, F. C., Wijtze, P. K.: DIANA – Finite Element Analysis - User's Manual – Getting Started (Release 9.4.3), Delft: TNO DIANA BV, 2010

[8] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 2. Auflage Mai 2009. Altenberge, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) e. V., 2009.

[9] Pravida, J. M.: Zur nichtlinearen adaptiven Finite-Element-Analyse von Stahlbetonscheiben. Dissertation TU München, Lehrstuhl für Statik der Technischen Universität München, 1999.

[10] deWitte, F. C., Wijtze, P. K.: DIANA – Finite Element Analysis - User's Manual – Element Library (Release 9.4.3), Delft: TNO DIANA BV, 2010

[11] Hosser, D., Kampmeier, B, Hollmann, D.: Behavior of ultra high performance concrete (uhpc) in case of fire. In: Schmidt, M. (Hrsg.): Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, Proceedings of Hiperma 2012, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, 2012

KONZEPT ZUR ABSICHERUNG VON CFD-SIMULATIONEN IM BRANDSCHUTZ UND IN DER GEFAHRENABWEHR

Matthias Münch
INURI GmbH, Berlin

EINLEITUNG

Die schnelle Ausbreitung und die gewaltigen Auswirkungen von Bränden überraschen Menschen immer wieder. Auch mit den heute verfügbaren technischen Möglichkeiten und dem dadurch gestiegenen Sicherheitsgefühl darf nicht vergessen werden, dass ein verheerender Brand bei entsprechenden Voraussetzungen jederzeit entstehen kann.

CFD-Simulationen (CFD – Computational Fluid Dynamics) können ein wirksames Werkzeug sein, um durch geschickte Maßnahmen Brandauswirkungen zu begrenzen. Anstatt erfahrungsbasiert zu lernen, können mit dieser schutzzielorientierten Vorgehensweise Sicherheitskonzepte auf Basis von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen erstellt werden. Da das Wissen über die physikalischen und chemischen Detailprozesse bei Bränden jedoch begrenzt und die computergestützten Simulationsmethoden nicht ohne vereinfachende Annahmen auskommen, erfordert dies nicht nur ein sehr akribisches und selbstkritisches Vorgehen, sondern auch sehr spezielle Fachkenntnisse.

Die Anwendung von Simulationsprogrammen lässt sich vereinfacht in drei Arbeitsschritte unterteilen:

1. Zuerst sind die mit Hilfe der Simulation zu untersuchenden brandschutzspezifischen Fragestellungen zu definieren.
2. Auf Basis dieser Zielstellung muss eine geeignete Software gefunden und die Simulation durchgeführt werden.
3. Im Hinblick auf die Fragestellung und der Berücksichtigung der qualitativen und quantitativen Aussagefähigkeit der verwendeten Software, müssen die berechneten Daten bewertet und in brandschutzspezifische Anforderungen uminterpretiert werden.

Sowohl die Definition der Fragestellung [1], als auch die Ergebnisbewertung [3] lassen sich allerdings nur unter Berücksichtigung der Simulationsdetails [2] korrekt durchführen. Dieser Artikel gibt eine Einführung in diese Problematik. Er zeigt, dass Simulationsprogramme keinesfalls als „Black-Box“ eingesetzt werden können und das eine Eignungsüberprüfung von Simulationsprogrammen durch den überwiegenden Vergleich mit Brandexperimenten unzureichend ist. Vielmehr müssen die in den Programmen verwendeten numerisch-mathematischen Methoden und Technologien berücksichtigt werden. Der Artikel stellt ein solches Konzept vor und zeigt anhand von Beispielen die Notwendigkeit dieser

Vorgehensweise. Die ungekürzte Beschreibung des Konzeptes und weitere Beispiele finden sich in [1].

WARUM VERGLEICHE MIT BRANDEXPERIMENTEN NICHT GENÜGEN

Brandexperimente repräsentieren in der Regel immer eine reale Brandsituation, dennoch sind Vergleiche von experimentellen Daten mit Simulationsdaten zum Zweck der Softwareüberprüfung nicht unproblematisch. Neben messtechnischen Unsicherheiten stellt sich die zentrale Frage der Reproduzierbarkeit des Experimentes, sowie die Problematik, welche realistischen Varianten sich im Brandversuch hinsichtlich Brandszenarien, Raumkonfiguration und -skalen überhaupt darstellen lassen.

- Eine vollständige Kontrolle der experimentellen Bedingungen ist nur bei Versuchsdaten zu erwarten, die (i) durch mehrfach wiederholte identische Versuche abgesichert und (ii) sehr detailliert und ausführlich dokumentiert sind. Derartige Anforderungen führen nicht nur zu einem erheblichen finanziellen Aufwand, sondern sind überdies meist auch nur schwierig umzusetzen.
- Die Vielfalt der auftretenden Szenarien potenziert diesen Aufwand weiter. Im Rahmen des CIB W 14 Projektes wurden 10 als wesentlich erachtete und in Bauwerken wiederkehrende Szenarien definiert [2]. Die Auflistung ist nicht abschließend und innerhalb der Szenarien kommen Variationen, wie verschiedene Brandlasten, brennbare Umfassungsbauteile, der Einfluss von aktiven Löschsystemen usw. hinzu.
- Überdies lassen sich die in der Praxis auftretenden Raumabmessungen nicht alle im Originalmaßstab experimentell darstellen. Die Verwendung von maßstäblichen Modellen führt wiederum zur Diskussion der vollständigen Ähnlichkeit der abzubildenden Prozesse (vgl. [3] und folgende Leserbriefe).

Soll ein Simulationsprogramm universell für die vielfältigen brandschutzspezifischen Fragestellungen einsetzbar sein, stellt sich weiter die Frage nach der Art der zu verwendenden Vergleichsdaten. In einer Literaturstudie wurden die Veröffentlichungen der Fachzeitschrift *Fire Safety Journal* der Jahre 1997 bis 2007 und dort genannter Referenzen ausgewertet [4]. In 130 Veröffentlichungen wurden Vergleiche von insgesamt 19 Simulationsprogrammen mit experimentellen Daten beschrieben, überwiegend aus Temperaturmessungen. Detaillierte Vermessungen der für die Beurteilung von Ausbreitungsrechnungen relevanten Strömungsgeschwindigkeiten waren eher selten.

Ein weiterer interessanter Aspekt betrifft die in den Versuchen berücksichtigten Raumgeometrien. Nur 39 von 130 Vergleichen basierten auf Konfigurationen, bei denen die Ausbreitung der Rauchgase aus dem Brandraum heraus betrachtet werden konnten. Werden die Aspekte Geschwindigkeitsmessung und Mehrraumkonfiguration zusammengefasst, bleiben von 130 Vergleichen nur 10 Vergleiche übrig, in denen in einer Mehrraumkonfiguration mindestens an einer Stelle die Strömungsgeschwindigkeit als Vergleichskriterium herangezogen

wurde. Dieses Ergebnis verwundert, da mit den derart „abgesicherten“ Simulationsprogrammen die Verrauchung in komplexen Geometrien berechnet werden soll, z.B. um die Entfluchtung in Versammlungsstätten zu gewährleisten.

Es stellt sich ferner die Frage, welche Art von Bauwerken oder Raumgeometrien durch die Vergleiche repräsentiert werden. Bis auf zwei Ausnahmen betrug das Gesamt-Raumvolumen maximal 4.000 m³. In der Brandschutzpraxis werden die aufwendigen Simulationsrechnungen jedoch eher nicht zur Untersuchung von Einraumbauwerken mit einem Gesamt-Raumvolumen von 4.000 m³ eingesetzt. Typische Anwendungsszenarien liegen vielmehr bei Raumvolumina im Bereich von 50.000 m³ und mehr (weitere Details in [1]).

Kritische Betrachtung

Die vorangegangene Darstellung gibt einen Einblick in die erheblichen Schwierigkeiten einer rein experimentell basierten Eignungsüberprüfung. Sollten die vorgestellten Ergebnisse der Literaturstudie tatsächlich repräsentativ sein, ist der in der Praxis häufig zu findende Verweis auf eine Vielzahl in der Fachliteratur veröffentlichter erfolgreicher Vergleiche von Simulationen und Brandexperimenten für die Einschätzung der Fähigkeiten eines numerischen Simulationsverfahrens nur von sehr begrenztem Wert.

Hinzu kommt noch ein weiteres strukturelles Problem. Simulationsprogramme beruhen auf mehr oder weniger starken Vereinfachungen der Modellkomponenten zur Darstellung unterschiedlicher physikalischer Prozesse. Bei einem Brandexperiment erfassen die Messdaten immer den Gesamteffekt aller dort ablaufenden physikalischen Prozesse. Bei einem Vergleich mit Simulationsdaten besteht daher stets die Gefahr, dass Fehlerauslöschungen im numerischen Verfahren nicht entdeckt werden. Dies führt zur prinzipiellen Frage, ob die in den Vergleichen untersuchten Simulationsprogramme auch außerhalb des experimentell abgedeckten Bereichs belastbare Ergebnisse liefern. Allein auf der Grundlage von Vergleichen mit experimentellen Daten aus Brandversuchen ist das nicht abgesichert.

VORSTELLUNG EINES UMFASSENDEREN KONZEPTANSATZES

Der alleinige Vergleich mit Ergebnissen aus Brandversuchen hat den strukturellen Nachteil, dass Einflussfaktoren aufgrund von Aufbau und Funktionsweise eines Simulationsprogramms nicht berücksichtigt werden. Ein umfassenderer Konzeptansatz sollte daher auch die mathematisch-numerischen sowie programmtechnischen Einflüsse berücksichtigen.

Die Grundzüge eines derartigen Konzeptansatzes wurden in [5] erstmals vorgestellt und sind in [6, 7] weiter ausformuliert worden. Das vollständige Konzept ist nunmehr in [1] umfangreich beschrieben. Hierbei wurde neben konzeptionellen Erweiterungen eine großes Kapitel mit Beispielen zur Begründung der einzelnen Forderungen und Vorgehensweisen hinzugefügt.

Das Bild 1 zeigt die grundsätzlichen Entwicklungsphasen eines CFD-Programms und die dazugehörigen Einflussfaktoren.

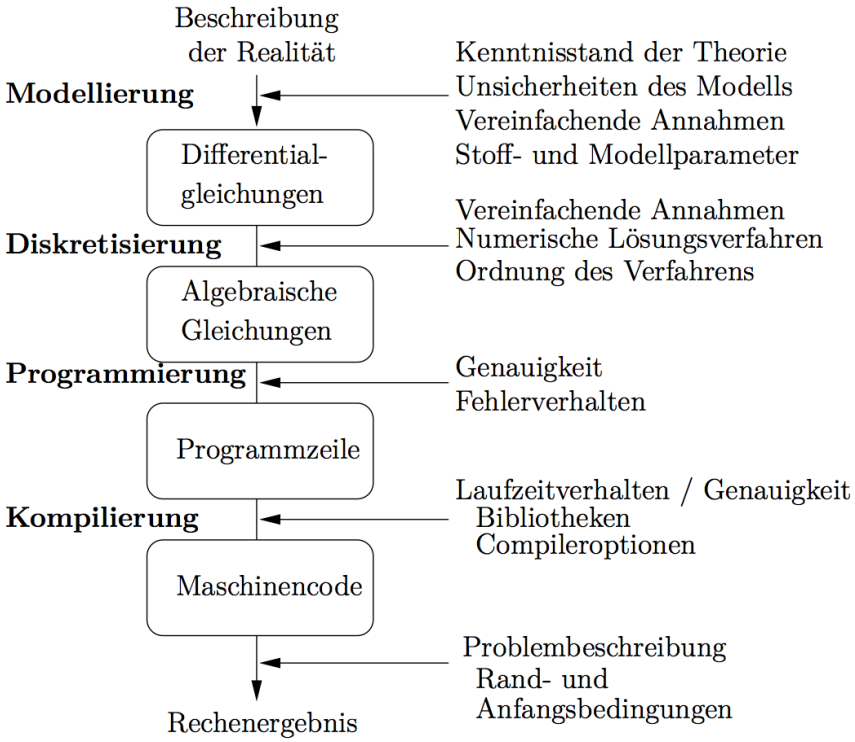


Bild 1 Einflussfaktoren der Entwicklungsphasen eines CFD-Programms [7].

Von der Modellbildung mit Hilfe der Prozessbeschreibenden Differential- oder Integralgleichungen, der Umwandlung in computertaugliche algebraische Gleichungen und numerische Lösungsalgorithmen mit Hilfe der Diskretisierung, der Umsetzung in Programmzeilen mit Hilfe einer Programmiersprache bis hin zur Umwandlung dieser Programmzeilen in ausführbaren Computercode, ist an allen Stellen eine Einflussnahme auf die quantitative und qualitative Güte des Programms möglich und teilweise auch unvermeidbar.

Ein Konzept muss prinzipiell die Einflussfaktoren der in Bild 2 gezeigten einzelnen Entwicklungsstufen eines Programms berücksichtigen.

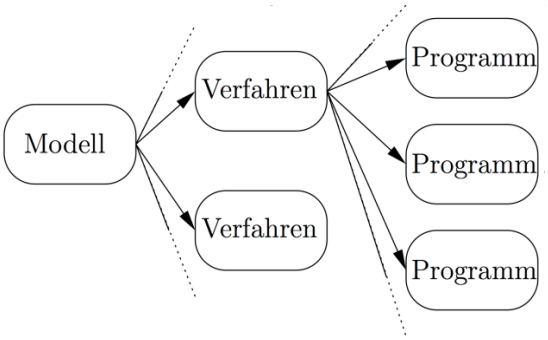


Bild 2 Entwicklungsstufen eines CFD-Programms [7].

Abstrahiert sind dies die für die Simulation notwendigen physikalischen und chemischen Prozessabbildungen (Modell), die Eigenschaften numerischer Lösungstechniken und -verfahren (Verfahren), sowie die Programmtechnische Umsetzung (Programm), die unter den individuellen Qualitätsanforderungen der jeweiligen Aufgabenstellung betrachtet werden müssen.

Für diese Betrachtung ist die im Bild 3 von Schlesinger in [8] schon 1979(!) vorgestellte prinzipielle Vorgehensweise der Programmüberprüfung nicht nur auf das Programm als Ganzes, sondern eben auch auf seine Einzelteile bzw. Komponentengruppen anzuwenden.

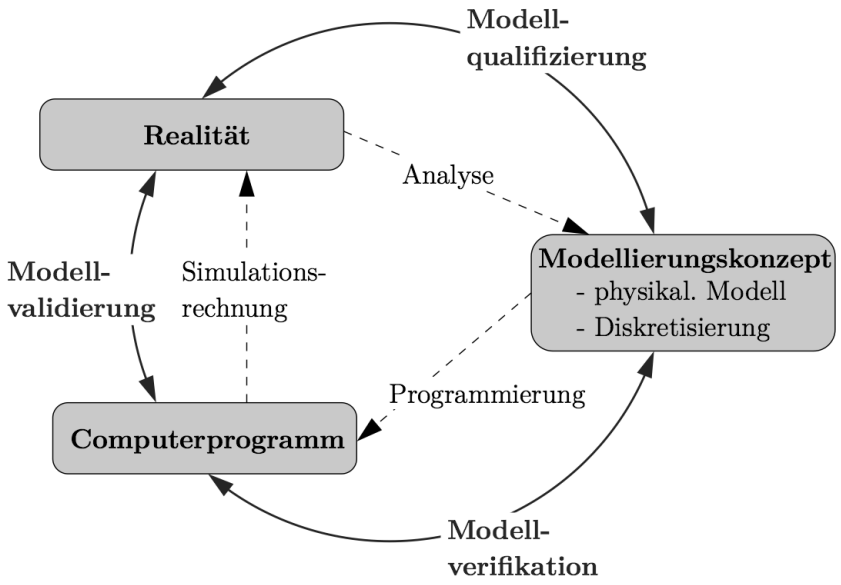


Bild 3 Programmüberprüfung nach Schlesinger [8].

Nur auf diese Weise lassen sich Abweichungen einer einzelnen Programmkomponente zuordnen, Fehlerauslöschungen zwischen Programmkomponenten entdecken und Tests gezielt ohne Beeinflussung durch andere Komponenten durchführen.

Klassifizierung der Test- und Vergleichsdaten

Statt wie bisher hauptsächlich Daten aus Brandversuchen für eine Bewertung heranzuziehen, erfordert die Umsetzung des Konzeptes eine breiter aufgestellte Datenbasis. Dem Vorschlag in [1] folgend, werden die Datenquellen und Referenzlösungen hierzu in vier Kategorien eingeteilt. Jede dieser Kategorien hat im Hinblick auf die vorgesehene Eignungsüberprüfung spezifische Eigenschaften.

1. Analytische Tests
   Der Begriff bezeichnet Testfälle, für die eine mathematisch exakte Lösung hergeleitet werden kann. Dies ist nur in sehr speziellen Konfigurationen möglich, die in der Regel wenig Ähnlichkeiten mit praktischen Problemstellungen haben. Allerdings lässt sich mit analytischen Testfällen der Einfluss

aller Entwicklungsphasen des CFD-Programms sehr genau untersuchen. Nicht zu den analytischen Testfällen gehören die im Bereich des Brandschutzes gelegentlich so bezeichneten empirisch ermittelten Gleichungen, wie bspw. die Plumeformeln.

2. Numerische Tests
   Hierunter sind numerisch ermittelte Vergleichsdaten zu verstehen. Diese können bspw. durch Parametervariationen oder durch einen Ergebnisvergleich mit speziell für den untersuchten Testfall entwickelten Programmen entstehen. Sie ermöglichen z.B. die Abschätzung des Einflusses von Modellapproximationen.
3. Semi-experimentelle Tests
   Hierunter sind Experimente und Datenvergleiche zu verstehen, bei denen aus der Vielfalt der im Brandfall beteiligten Prozesse nur einzelne physikalische Prozesse oder Prozessgruppen betrachtet werden. Die Untersuchung der Couette- oder Taylor-Couette-Strömung oder eben auch die im Brandschutz gern verwendeten Plumeformeln sind Beispiele hierfür.
4. Experimentelle Tests
   Die letzte Gruppe fast alle weiteren Experimente zusammen, die sich nicht mehr auf einzelne Phänomene oder Detailkonfigurationen konzentrieren. Aufgrund des damit verbundenen Aufwandes sind dies meist Repräsentationen einzelner Stichproben. Beispielhaft seien Brandversuche mit realen Bränden in Hallen inklusive der Zu- und Abluftöffnungen oder auch mit Löschsystemen genannt. Derartige experimentelle Untersuchungen repräsentieren im günstigsten Fall ein reales Brandereignis und damit den Anwendungsfall von Brandsimulationsprogrammen.

Vergleichs- und Bewertungsmethodiken

Eine im Brandingenieurwesen weitverbreitete Bewertungsmethodik ist der visuelle Vergleich von zeitabhängigen Kurvenplots, wie sie beispielhaft in Bild 4 dargestellt ist.

Programmbewertungen sollten jedoch möglichst allgemein gültig und nicht auf einzelne spezielle Anwendungsfälle beschränkt sein. Aus diesem Grund müssen für eine Bewertung allgemeinere, mathematisch-numerisch motivierte Kriterien herangezogen werden. Diese Kriterien liefern bei geeigneten Testfällen den angestrebten Nachweis, dass die visuelle festgestellte Übereinstimmung nicht nur zufälliger Natur ist und damit belastbarere Qualitätsaussagen. Dies soll beispielhaft am Begriff der mathematischen Verfahrensordnung gezeigt werden.

Die von Brandschutz-Praktikern gern angeführte Argumentation, dass solange wichtige Eingangsparameter der Simulation nur sehr grob abgeschätzt werden können, die aufwendige Betrachtung von Nachkommastellen in numerischen Verfahren vernachlässigbar ist, ist falsch. Auch kleine Terme können die physikalischen Eigenschaften einer der Lösung stark beeinflussen.

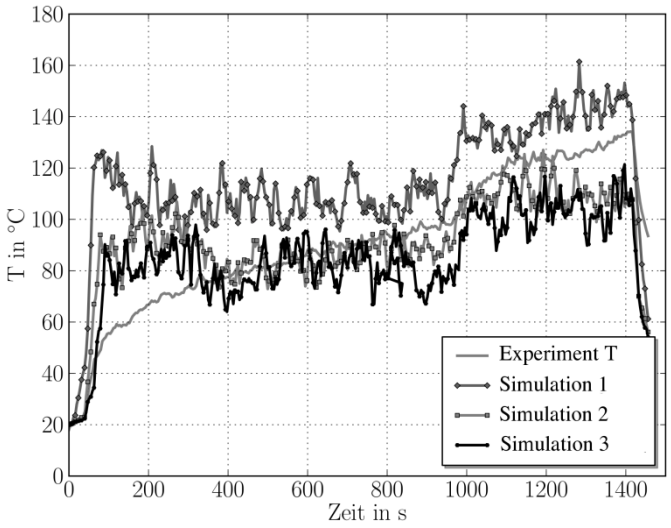


Bild 4 Visueller Vergleich von Zeit-Temperatur-Kurven.

Gleichung (1) zeigt eine in der Numerik weitverbreitete Approximation eines Gradienten durch eine Taylorreihenentwicklung in x-Richtung.

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_i \approx \underbrace{\frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\Delta x}}_{\text{1. Ordnungsapproximation}} \underbrace{- \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}\right)_i \cdot \frac{\Delta x}{2!} - \left(\frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3}\right)_i \cdot \frac{\Delta x^2}{3!} - \cdots}_{\text{Abbruchfehler}} \qquad (1)$$

Diese Reihenentwicklung muss aus praktischen Gründen begrenzt werden. Im ersten Fall – hier 1. Ordnungsapproximation genannt – erfolgt der Abbruch gleich nach dem ersten Term auf der rechten Seite. Der verbleibende – im numerischen Verfahren vernachlässigte Rest – ist der diskrete Abbruchfehler. Der Betrag dieser Fehlerterme wird von links nach rechts immer geringer. Im zweiten Fall – hier 2. Ordnungsapproximation genannt – erfolgt der Abbruch erst nach dem zweiten Term auf der rechten Seite. Der betragsmässig geringe Anteil des zweiten Terms der Gleichung (1) wird in dieser Approximation also noch berücksichtigt. Ohne auf Details einzugehen wird unmittelbar klar, dass sich die beiden Approximationen nur durch einen zahlenmässig kleinen Betrag unterscheiden.

Die Folgen dieses Unterschiedes sollen an einem einfachen Beispiel eines in eine Fluidoberfläche „fallenden Tropfens“ in Bild 5 und 6 gezeigt werden.

Die linke Abbildung in Bild 5 zeigt einen „Tropfen“ über einer Flüssigkeitsoberfläche gleicher Dichte in der Ausgangslage zur Zeit t = 0. Das Dichteverhältnis zwischen Tropfen bzw. Flüssigkeit und der umgebenden „Luft“ beträgt 1:1000. Für t > 0 fällt der „Tropfen“ aufgrund der wirkenden Gravitationskraft in einer beschleunigten Bewegung nach Unten und schlägt in die Flüssigkeitsoberfläche ein (rechte Abbildung von Bild 5). Hierbei bildet sich aufgrund des Aufschlages an der Flüssigkeitsoberfläche eine Strömung aus.

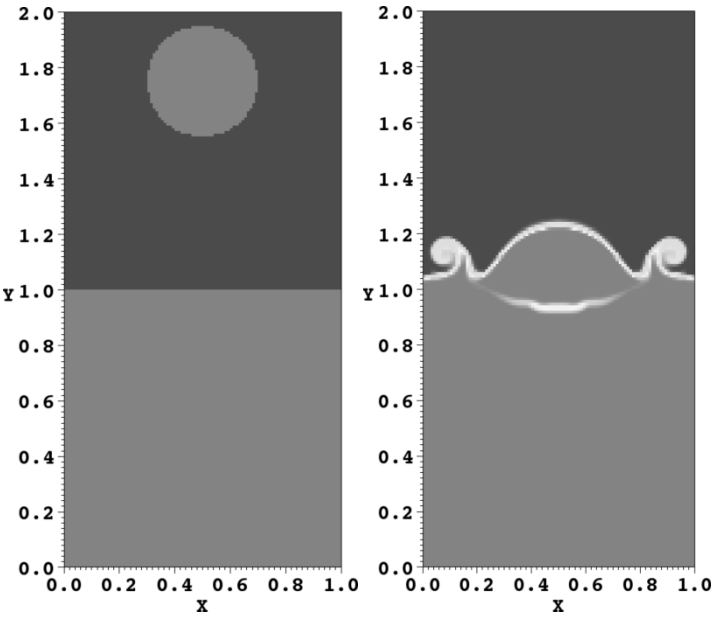


Bild 5 *Testfall „Fallender Tropfen“. Darstellung der Dichte zur Zeit t=0 (links) und zur Vergleichssituation t=0,389 (rechts) [6].*

Der Testfall wird mit dem CFD-Simulationsprogramm *MOLOCH* [9] berechnet, welches sowohl in erster als auch zweiter Ordnungsapproximation betrieben werden kann. Die dimensionslosen Ergebnisse zur Zeit t = 0,389, der bis auf dieses Detail ansonsten identischen Simulationsrechnungen, werden in den beiden Abbildungen in Bild 6 verglichen.

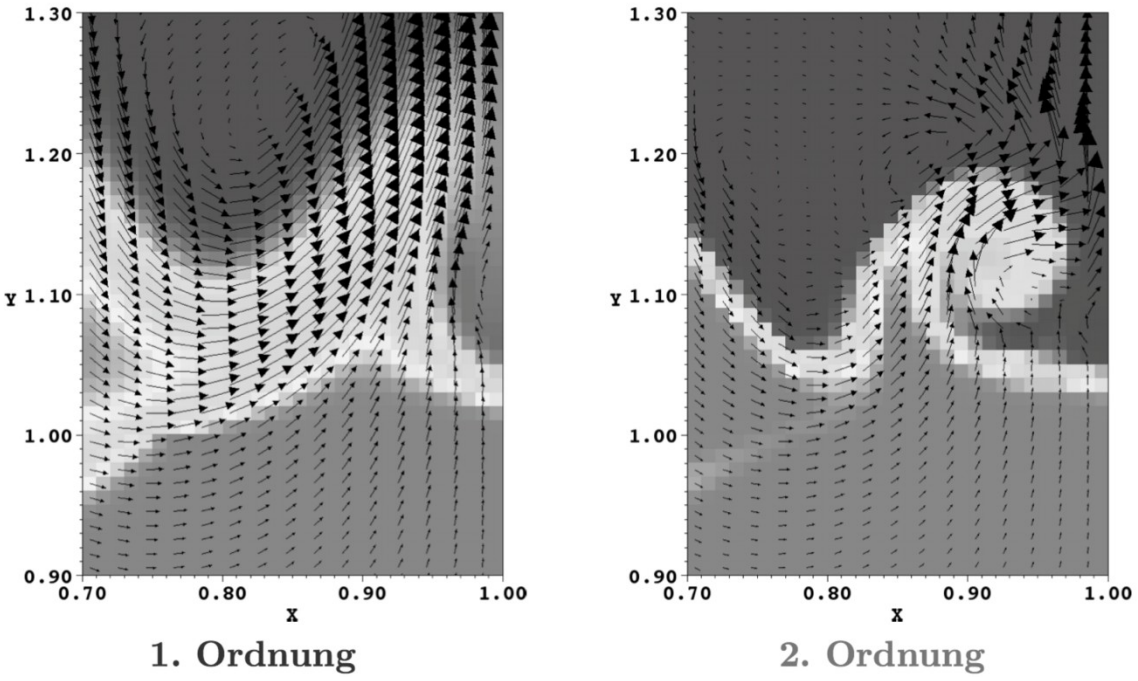


Bild 6 *Vergleich von Dichte- und Geschwindigkeit der Simulationsrechnungen erster (links) und zweiter (rechts) Genauigkeitsordnung [6].*

Die Werte für Dichte und Geschwindigkeit in Bild 6 sind gleichskaliert. Wie der Vergleich zeigt, führen die geringen Approximationsunterschiede bei der Gradientenberechnung zu deutlichen Abweichungen im Simulationsergebnis. Während sich bei der Rechnung zweiter Ordnung (rechte Abbildung) eine kompakte sich nach rechts bewegende Welle ausbildet, zeigt sich bei der Rechnung erster Ordnung (linke Abbildung) eine nahezu gradlinige Strömung in die rechte obere Ecke. Auch die Dichte des noch verbleibenden Tropfenkörpers verschmiert in der linken Abbildung deutlich. Das bis auf diese kleine Abweichung identische Simulationsprogramm berechnet sichtbar unterschiedliche physikalische Ergebnisse.

Die Ursache liegt in der Approximationsgüte des jeweiligen numerischen Verfahrens. Während Ableitungen erster Ordnung Steigungen gut repräsentieren (linke Abbildung), benötigt die Darstellung von Kurven mindestens die Ableitung zweiter Ordnung. Diese wurden in der Rechnung erster Ordnungsapproximation aber gerade in der Modelldiskretisierung des Gradienten vernachlässigt (vgl. Gleichung (1)). In der Folge können bei gleicher Gitterweite in dieser Programmvariante wesentliche Strömungseigenschaften nicht dargestellt werden.

Das Beispiel zeigt, dass bei der Bewertung numerischer Rechenverfahren bzw. ihrer Ergebnisse auch die entsprechenden numerischen Kriterien berücksichtigt werden müssen. Eine ausführlichere Erläuterung, weitere Einflussfaktoren, Unsicherheiten, Bewertungskriterien und Beispiele finden sich in [1].

Aufbau einer Testmatrix als Leistungsnachweis

Unter Verwendung von numerisch-mathematischen Kenntnissen lassen sich – wie gezeigt – Einflüsse auf eine numerische Simulationsrechnung erfassen und bewerten.

In Kombination mit den anderen Techniken und Methoden lässt sich ein Verifikations- und Validierungsleistungsnachweis für ein CFD-Programm erstellen. Dieser bildet die Basis für die vom Anwender durchzuführende Eignungsüberprüfung. Hierfür wird eine Testmatrix definiert, die in einer übersichtlichen Form quasi das Inhaltsverzeichnis dieses V&V-Leistungsnachweises darstellt. Sie muss die im betreffenden Programm verwendeten Modelle und numerischen Verfahrensansätze sowie ihre Wechselwirkungen berücksichtigen. Aus diesem Grund erfolgt eine Unterscheidung hinsichtlich der:

- Test- und Vergleichsdaten
  Die aufgeführten Vergleichsdaten werden durch folgende Abkürzungen repräsentiert: Analytische Tests [A], Numerische Tests [N], Semi-experimentelle Tests [SE] und Experimentelle Tests [E].
- Physikalischen Submodelle
  Art und Anzahl der Submodelle bestimmen sich aus dem betreffenden Programm.

- Numerischen Testkriterien
  Hierzu gehören die Überprüfung von Ordnung und Konvergenz [OK], die Parametersensitivität [PS], Randbedingungen [RB], spezifische numerische Modellparameter [MP] u.v.a.m.

Mit diesen Definitionen ergibt sich dann für jeden Testnachweis ein Eintrag in der Testmatrix, wie beispielhaft in Tabelle 1 dargestellt.

Zu jedem Testfall gehört eine ausführliche Dokumentation, die u.a. die Zielsetzung des Tests, die verwendete Programmversion, die verwendeten Eingabeparameter – im Idealfall die tatsächlichen Eingabedateien – sowie die Herkunft der Vergleichsdaten inklusive von Literaturhinweisen angibt. Aus bereits vorhandenen Richtlinien lassen sich hierfür erste Muster ableiten (vgl. [10,11,12,13 und 14]).

Tabelle 1 Beispiel einer Testmatrix [1]

Test	Typ	Physikalische Komponenten						Struktur-test
		Gasdynamik	Gravitation	Viskosität	Turbulenz	Strahlung	Weitere ...	
Test A	A	✓	✓					RB
Test B	N	✓		✓				GZ,OK
Test C	E	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MP

Durchführung einer Eignungsüberprüfung

Ist für ein Simulationsprogramm ein V&V-Leistungsnachweis mit einer entsprechenden Testmatrix verfügbar, kann der Programmanwender eine belastbare Eignungsüberprüfung für eine vorgesehene Simulationsrechnung durchführen. Hierzu sind folgende drei Schritte notwendig:

1. Programmqualifizierung
2. Programmverifizierung
3. Programmvalidierung

Der Anwender ermittelt zunächst die spezifischen Eigenschaften des zu simulierenden Anwendungsfalls. Welche konkreten Fragestellungen sollen mit der Simulationsrechnung untersucht werden? Welche physikalischen Prozesse bestimmen maßgeblich das Ergebnis? In der Programmqualifizierung führt der Anwender dann den Nachweis anhand der Programmdokumentation, dass das Programm Modelle bereitstellt, die für das zu untersuchende Problem notwendig und von ihren Modellansätzen prinzipiell geeignet sind.

Sind auf diese Weise die notwendigen *physikalischen Programmkomponenten* (vgl. Tabelle 1) identifiziert, muss der Anwender nun die korrekte Implementierung und prinzipielle Funktionsfähigkeit dieser Programmbestandteile nachweisen. Dies geschieht im Schritt der Programmverifizierung mit Hilfe der analytischen, numerischen oder semi-experimentellen Tests (vgl. Zeilen der Testmatrix in Tabelle 1).

Je nach Aufgabenstellung sind zur Erfüllung der ermittelten Anforderungen bereits bestimmte Definitionen von Modellparametern oder Diskretisierungen erforderlich, damit die betrachteten Programmkomponenten / -modelle die gewünschten Ergebnisse liefern. Derartige Beschränkungen reduzieren die Möglichkeiten des Anwenders Modellparameter frei zu wählen.

Während die Programmverifizierung quasi untersucht, ob die Gleichungen richtig gelöst werden, beantwortet die Programmvalidierung die Frage, ob die berechneten Ergebnisse auch eine ausreichend akkurate Repräsentation der Realität darstellen. Hierzu werden unter Berücksichtigung der bereits ermittelten Beschränkungen Simulationsbeispiele von mit der Aufgabenstellung vergleichbaren Anwendungstests herangezogen. Diese Untersuchung liefert weitere Antworten auf offene Fragen hinsichtlich der noch wählbaren Modellparameter, Modellannahmen und der Diskretisierung. Es ist allerdings auch das Ergebnis möglich, dass der Anwendungsfall mit dem Programm nicht in einer für den Anwender praktikablen Weise zu untersuchen ist.

Die Kombination der drei Schritte, in Verbindung mit der in der Testmatrix enthaltenen Berücksichtigung numerischer Verfahrensqualitäten, liefert einen belastbaren Nachweis über die Aussagefähigkeit des Simulationsprogramms für den vorgesehenen Anwendungsfall. Das Bild 7 zeigt das Ablaufschema einer derartigen Eignungsüberprüfung.

Die Vorgehensweise erlaubt Dritten eine relativ rasche Überprüfung vorgelegter Simulationsrechnungen, wenn alle wesentlichen Fragestellungen abgearbeitet und dokumentiert wurden.

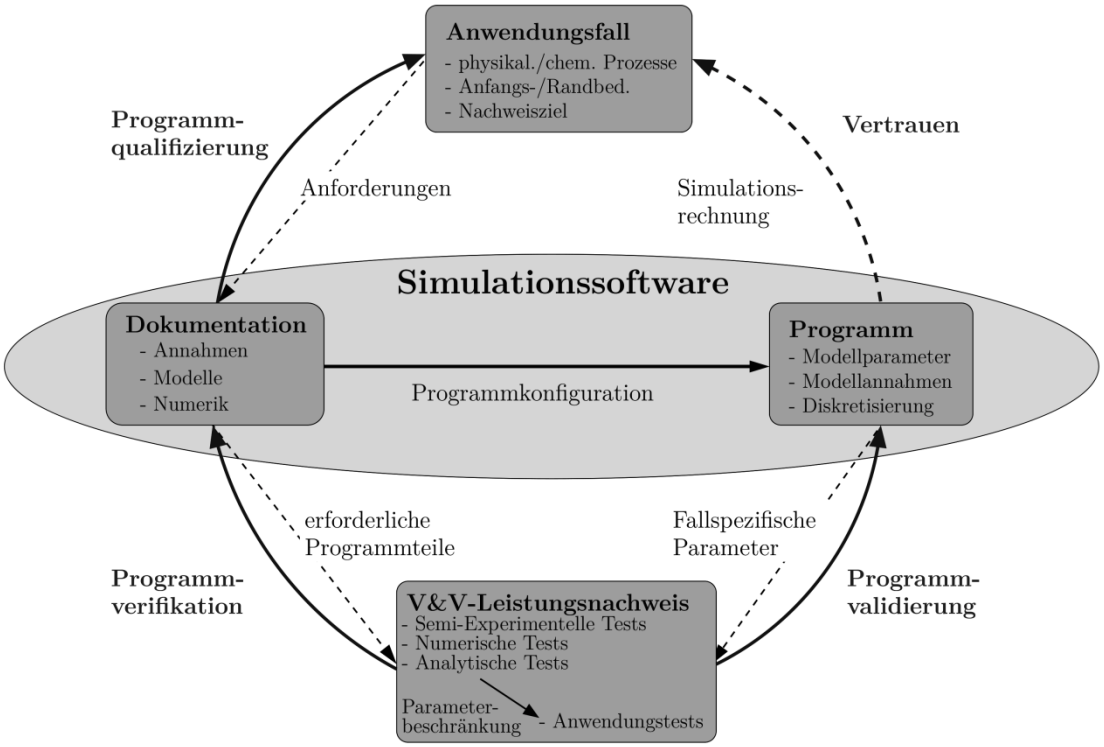


Bild 7 Ablaufschema der Eignungsüberprüfung [1]

PRAKTISCHES ANWENDUNGSBEISPIEL

Grundsätzlich lässt sich der vorgestellte Konzeptaufbau auf alle Arten und Ausführungen von Simulationsprogrammen anwenden. Um die Vorgehensweise des Ansatzes zu demonstrieren, zeigt dieser Abschnitt ein sehr einfaches Anwendungsbeispiel unter Verwendung des frei erhältlichen und quelloffenen Fire Dynamics Simulators (FDS). Das FDS-Programm wird im Brandingenieurwesen seit vielen Jahren weltweit für den bauaufsichtlichen Nachweis der Schutzzielerfüllung in Brandschutzkonzepten verwendet.

Um das Demonstrationsbeispiel überschaubar zu halten, soll die etwas künstlich erdachte Aufgabenstellung lauten, das Ausbreitungsverhalten von „kaltem Rauch“ in einer z.B. durch Ventilatoren erzwungenen Strömung mit Hilfe des Fire Dynamics Simulators in einem Gebäude zu berechnen. Als Referenzprogramm dient die FDS-Version 5.5.3 Revision 7031. Zur weiteren Vertiefung finden sich in [1] wesentlich umfangreichere und detailliertere Beschreibungen.

Zusammenfassung einer Programmqualifizierung

Entsprechend des in Abschnitt 3 vorgestellten Konzeptes muss zunächst eine Programmqualifizierung durchgeführt werden. Hierbei wird die prinzipielle Eignung des Fire Dynamics Simulators für die Aufgabenstellung anhand der Angaben in der Programmdokumentation belegt. In diesem Schritt müssen insbe-

sondere die notwendigen physikalischen Komponenten im Tabellenkopf der Testmatrix festgelegt werden (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2 Testmatrix für das Anwendungsbeispiel (unvollständig)

Test	Typ	Physikalische Komponenten				Strukturtest
		Gasdynamik	Gravitation	Viskosität	Turbulenz	
Wirbeladvektion	A	x				OK, MP
Kanaltest	A	x				OK, GZ
Restivo Experiment	SE	x	x	x	x	MP

Ziel der Aufgabenstellung ist die Darstellung der zeitlich variablen Strömungsgeschwindigkeiten und der sich hieraus ergebenden Spezieskonzentrationen (Ruß, Gas usw.) im betrachteten Strömungsgebiet. Die Ausbreitung von Brandrauch bzw. die Konzentration von toxischen Gasen wird sehr wesentlich durch die numerische Berechnung der Strömungsverhältnisse, insbesondere der Verwirbelungen bestimmt. In der Programmdokumentation [15,16] findet sich der Hinweis, dass der Fire Dynamics Simulator in der Lage ist, Strömungen mit Dichteunterschieden und Spezieskonzentrationen abzubilden. Hierzu werden in dem hydrodynamischen Modellansatz die sogenannten „Zero-Mach“-Gleichungen mit Hilfe eines expliziten zeitschrittweitengesteuerten Algorithmuses auf einem kartesischen Rechengitter gelöst. Gleichfalls stellt das Programm Modellansätze zur Darstellung von Wänden, Einström- und Ausströmöffnungen zur Verfügung. Zur Steigerung der Recheneffizienz kann das Rechengebiet in Teilgebiete unterteilt werden, die auf verschiedenen Prozessorkernen parallel gerechnet werden können. Als Ausgabegrößen stellt das Programm sowohl die Dichte, den Druck, die Strömungsgeschwindigkeiten bzw. die daraus resultierenden Wirbelstärken zur Verfügung.

Zusammengefasst bietet das Programm laut Dokumentation damit alle notwendigen Voraussetzungen die gestellte Aufgabe zu bewältigen. In der Programmverifizierung und -validierung muss jetzt geprüft werden, ob bzw. mit welcher Qualität die in der Programmdokumentation beschriebenen Modellansätze im Programm umgesetzt wurden. Die abzuprüfenden physikalischen Komponenten sind die numerischen Lösungsverfahren zur Strömungsberechnung „Gasdyna-

mik“, zur Berücksichtigung der Schwerkraftwirkung „Gravitation“, dem Reibungseinfluss „Viskosität“ und der Modellierung der turbulenten Strömung „Turbulenz“. Hinzu kommen Strukturtests zur Darstellung der Randbedingungen [RB], der Gebietszerlegung [GZ], der Modellparameter [MP] sowie der Ordnung und Konvergenz [OK].

Nachfolgend beschränkt sich die Betrachtung auf die physikalische Komponente „Gasdynamik“. Aus der INURI Testmatrix für den Fire Dynamics Simulator werden hierfür exemplarisch zwei analytische Testszenarien für die Programmverifikation und ein Testfall für die Programmvalidierung ausgewählt, sodass sich die in Tabelle 2 dargestellte Testmatrix ergibt.

Ausgewählte Beispiele der Programmverifizierung

Beide analytische Tests untersuchen die Fähigkeit der Programmkomponenten zur Darstellung der „Gasdynamik“. Im ersten Fall wird der Transport von Wirbeln in einer Strömung, im zweiten Test der Algorithmus zur Zerlegung des Rechengebietes in Teilgebiete überprüft. Zur beispielhaften Darstellung der Konzeptanwendung genügen die beiden Testfälle. Die Tabelle 2 zeigt jedoch sofort, dass für eine vollständige Programmverifikation noch weitere Testfälle erforderlich sind, die die anderen Programmkomponenten abprüfen.

1. Test Wirbeladvektion

Die korrekte Advektion (der Transport) von Wirbeln im Strömungsgebiet ist eine wichtige Fähigkeit eines CFD-Programms. Hierbei ist die Wirbelstärke ein gutes Maß für die Stärke und Ausprägung von Wirbeln. Sie berechnet sich aus der Rotation der Geschwindigkeitsvektoren. Da Reibungseffekte stabilisierend auf derartige numerische Lösungsverfahren wirken, betrachtet der Testfall den reibungsfreien Transport von Wirbeln in einem zweidimensionalen Strömungsgebiet der Kantenlänge 2 π mit periodischen Rändern (vgl. Bild 8).

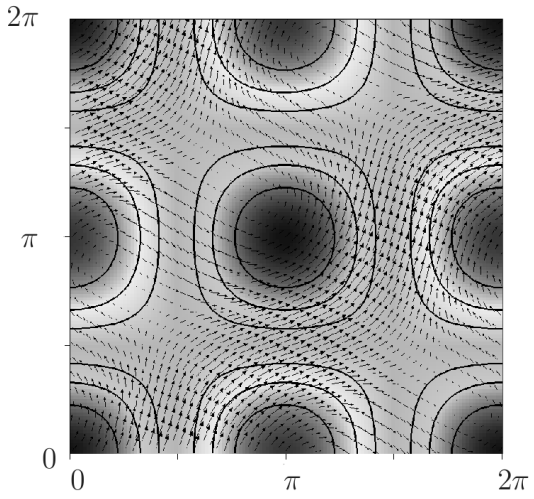


Bild 8 *Initiale Geschwindigkeitsvektoren und Darstellung der Wirbelstärke mit Konturlinien bei {-3,-2,-1,1,2,3} [1].*

Der analytische Testfall ist so konstruiert, dass sich das zum Zeitpunkt t = 0 initialisierte Wirbelfeld diagonal von unten links nach oben rechts durch das Strömungsgebiet bewegt und zum Zeitpunkt t = 2 π wieder in der Ausgangslage ankommt. Die exakte mathematische Lösung ist also bekannt und muss vom numerischen Lösungsverfahren im Rahmen der in der Programmdokumentation angegebenen Verfahrensgenauigkeit erhalten werden. Die exakte Testfallbeschreibung findet sich in [1].

Das Bild 9 zeigt, dass dies mit den Default Modellparametern des Fire Dynamics Simulators nicht der Fall ist. Es treten vielmehr nicht akzeptable Oszillationen im Strömungsfeld auf.

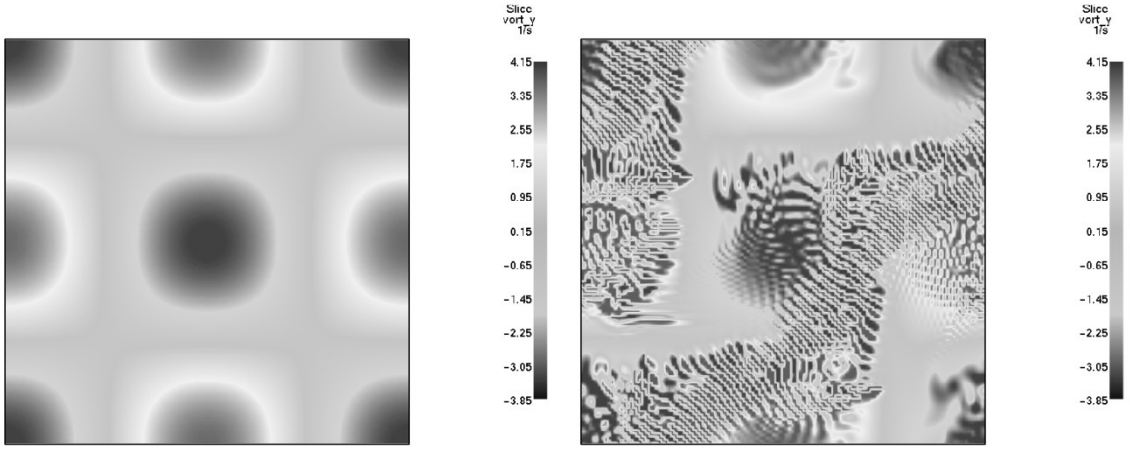


Bild 9 Vergleich der Wirbelstärke der korrekten Lösung (links) mit der mit den Defaulteinstellungen berechneten Lösung (rechts) zur Zeit t = 2 π [1].

Der mit numerischen Sachverhalten vertraute Anwender erkennt, dass die Ursache hierfür in einer fehlerhaften Beschränkung der Zeitschrittweite des eingesetzten numerischen Lösungsverfahrens durch einen Defaultparameter liegt. Wird der gleiche Testfall mit Hilfe eines vom Anwender entsprechend angepassten Modellparameters gerechnet, erfüllt die berechnete Lösung die Anforderungen.

Laut Programmdokumentation soll der numerische Fehler des eingesetzten Verfahrens einer zweiten Ordnungsapproximation entsprechen (vgl. Abschnitt Vergleichs- und Bewertungsmethodiken). Ob dies der Fall ist, lässt sich mit einem optischen Vergleich der Wirbelstärke, wie in Bild 9, allerdings nicht feststellen. Die Fehlerkontrolle muss vielmehr mit Hilfsmitteln der numerischen Mathematik im Rahmen einer Konvergenzbetrachtung erfolgen. Hierzu wird der gleiche Testfall mit verschiedenen Gitterweiten (2π/128 bis 2π/8) gerechnet, um auch mögliche Diskretisierungseinflüsse durch die Gitterweite zu berücksichtigen. Die vom Programm berechneten Fehler für die Strömungsgeschwindigkeiten werden dann mit dem unvermeidbaren Fehler des numerischen Verfahrens verglichen. Verlaufen die Fehlergraphen parallel, entspricht die berechnete Lösung der im Programm zugesicherten Verfahrensqualität. Ein derartiger Vergleich ist in Bild 10 dargestellt.

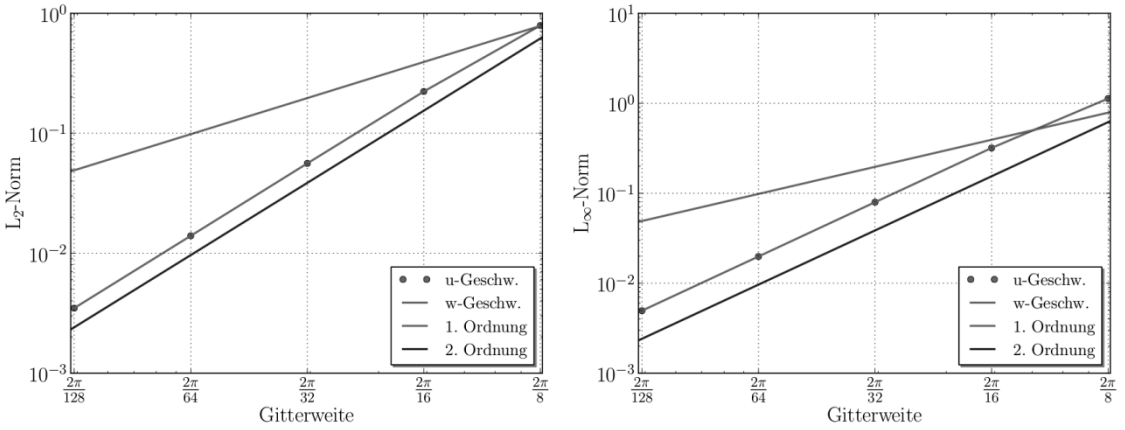


Bild 10 Vergleich der Fehler der u- und w-Geschwindigkeiten in der L2- (links) und der L∞ -Norm (rechts) zur Zeit t = 2 π [1].

Die Gerade durch die mit einer mathematischen Norm berechneten Fehlerpunkte der u- und v-Geschwindigkeiten für alle betrachteten Gitterweiten liegt parallel zur erwarteten Fehlergeraden „2. Ordnung“ des numerischen Verfahrens. Ein besseres Ergebnis kann von dem numerischen Verfahren nicht erwartet werden.

Der Testfall zeigt, dass das numerische Verfahren die in der Programmdokumentation beschriebenen Qualitätseigenschaften nur mit Hilfe eines von den Defaulteinstellungen abweichenden Modellparameters erfüllt. Wie in Bild 7 dargestellt, ergibt sich somit aus der Programmverifikation bereits eine den Anwender beschränkende Programmkonfiguration. Seine Freiheit Modellparameter beliebig zu wählen wird hierdurch eingeschränkt.

2. Kanaltest

Soll die Simulation parallel auf mehreren Prozessorkernen ablaufen ist nachzuweisen, dass die Parallelisierung nicht zu einer unzulässigen Verfälschung des Rechenergebnisses führt. Mit dem Kanaltest steht ein analytischer Testfall zur Verfügung, der diese Eigenschaft für die zu untersuchende Komponente „Gasdynamik“ zuverlässig abprüfen kann. Die exakte Testfallbeschreibung findet sich in [1].

Eine zeitabhängige Einströmung u = u(t) wird von links in einen Kanal konstanten Querschnitts gegeben (vgl. Bild 11). Mit Veränderung der Einströmung entsteht eine Druckdifferenz zwischen Ein- und Ausströmöffnung. Durch Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Lösungsverfahrens, kann die analytische Lösung „$\Delta p_{numeric}$“ exakt berechnet werden.

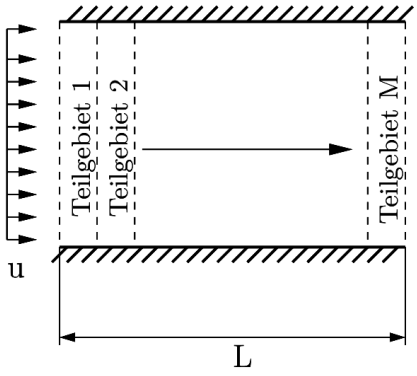


Bild 11 Kanaltest: Zerlegung des Rechengebietes in Teilgebiete [1].

Wie Bild 12 zeigt, entspricht die Lösung ohne Gebietszerlegung „1 mesh“ der exakten Lösung „$\Delta p_{numeric}$“ bei $\Delta p \approx -1$. Mit Unterteilung des Rechengebietes „2 mesh, 4 mesh und 8 mesh“ kommt es zu starken Fehlern in der berechneten Lösung. Ursache hierfür ist ein Fehler im Konzept der Gebietszerlegung im Fire Dynamics Simulator [17].

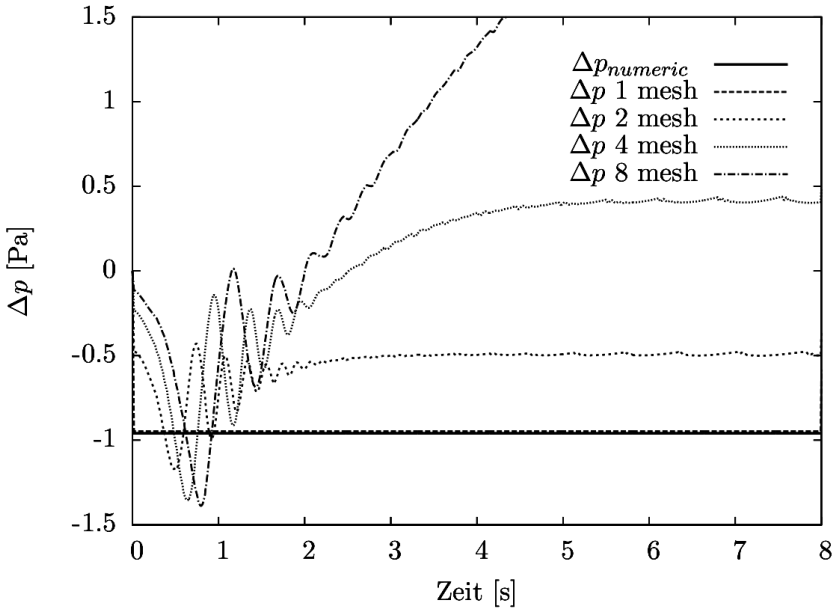


Bild 12 Ergebnis des Kanaltests in Abhängigkeit der Zerlegung in 1, 2, 4 und 8 Teilgebiete für u=u0 t [18].

In der Folge kann die Gebietszerlegung nicht für die Simulation genutzt werden, da die auftretenden Fehler Größenordnungen erreichen können, die weit jenseits des noch akzeptablen Verfahrensfehlers zweiter Ordnungsapproximation liegen.

Die beiden Testbeispiele zeigen, dass das im Fire Dynamics Simulator implementierte numerische Verfahren nur unter bestimmten Umständen die in der

Programmdokumentation zugesicherten Eigenschaften einhält. Hierzu muss einerseits vom Anwender ein Modellparameter verändert und andererseits auf die für die Parallelrechnung notwendige Gebietszerlegung verzichtet werden.

Programmvalidierung anhand des Restivo-Experimentes

Mit den in der Programmverifikation betrachteten Testfällen konnte unter einschränkenden Bedingungen die grundsätzliche Fähigkeit des Programms zur Simulation des vorgesehenen Anwendungsbeispiels gezeigt werden. Allerdings lieferte die Programmverifikation keine Aussage über die zu erwartende Qualität der Simulation.

Die Programmvalidierung betrachtet nunmehr genau diesen Aspekt und prüft, inwiefern die Simulationsqualität den Anforderungen des Anwendungsbeispiels genügt. Als Vergleich dienen experimentelle Versuchsdaten eines Strömungsexperimentes, das wesentliche Einflussfaktoren des Anwendungsbeispiels berücksichtigt.

In dem isothermen Strömungsexperiment wird in einem quaderförmigen Raum durch einen schmalen Spalt links unterhalb der Decke Luft mit konstanter Geschwindigkeit uin eingeblasen. Der Auslassspalt befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite über dem Erdboden. Er ist so bemessen, dass es während des Versuchs zu keinem Druckanstieg im Messraum kommt. Während des Versuchs wird die u-Strömungsgeschwindigkeit in Längsrichtung in zwei vertikalen Ebenen bei x_1 und x_2 sowie in zwei horizontalen Ebenen bei z_1 und z_2 gemessen (vgl. Bild 13). Eine genauere Beschreibung findet sich in [1].

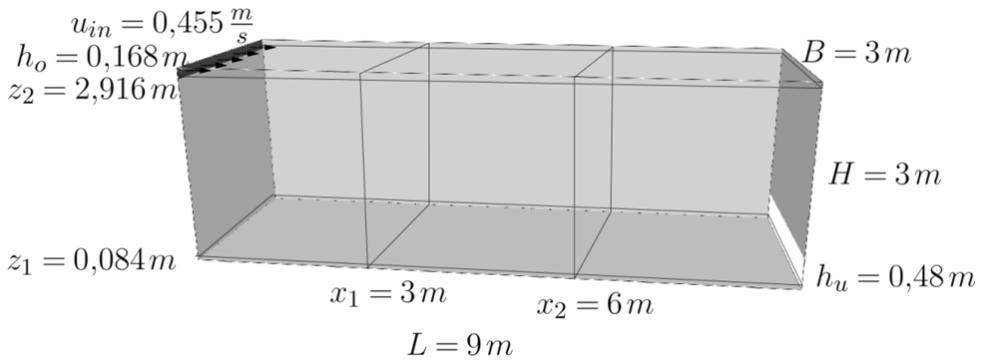


Bild 13 Restivo-Experiment mit Ein- und Auslassspalt sowie den horizontalen und vertikalen Messebenen für die Geschwindigkeiten [1].

Da dieser Restivo-Testfall auch von den FDS-Entwicklern zum Nachweis der Programmvalidierung verwendet wird, soll an diesem Beispiel gezeigt werden, dass ein Verweis auf die von den Programmentwicklern zahlreich publizierten erfolgreichen Testbeispiele für einen Eignungsüberprüfung nicht genügt.

Zu diesem Zweck werden drei verschiedene Simulationskonfigurationen verglichen, deren Variation in Tabelle 3 dargestellt sind.

Tabelle 3 Variation der drei Simulationskonfigurationen

Simulation	Gitter	Modellparameter
Sim. orig.	Verzerrung wie bei FDS-Testfall (144 x 48 x 48 Zellen)	Modifiziert wie bei FDS-Testfall
Sim. 3	Verzerrung wie bei FDS-Testfall (144 x 48 x 48 Zellen)	Defaulteinstellungen
Sim. 4	Gröbere Verzerrung (90 x 36 x 36 Zellen)	Defaulteinstellungen

1. Konfiguration des FDS-Validierungstestfalls (Sim. orig)

Im Restivo-Experiment wird die Turbulenz der Strömung sehr wesentlich durch die Scherspannungen in den wandnahen Schichten beeinflusst. Um eine bessere Auflösung in diesen wandnahen Bereichen zu erreichen, nutzen die FDS-Entwickler die Fähigkeit des Fire Dynamics Simulators, das zunächst gleichförmige kartesische Gitter in zwei von drei Raumrichtungen mit einer Gitterverzerrung zu verändern. Das bedeutet, dass in diesen beiden Raumrichtungen an den Gebietsrändern eine feinere räumliche Auflösung vorhanden ist, als zur Raummitte hin. In der Folge werden auch die Ein- und Ausströmöffnungen besser aufgelöst. Desweiteren verwenden die FDS-Entwickler von den Defaulteinstellungen abweichende Modellparameter.

2. FDS-Validierungstestfall mit Defaulteinstellungen (Sim. 3)

Um den Einfluss der von den FDS-Entwicklern verwendeten Modellparameter darzustellen, werden bei Beibehaltung der räumlichen Diskretisierung in dieser Simulation die Defaulteinstellungen verwendet.

3. Modifizierter FDS-Validierungstestfall mit Defaulteinstellungen (Sim. 4)

Um den Einfluss einer geringfügig gröberen räumlichen Auflösung darzustellen, wird die Gitterverzerrung so verändert, dass die Höhe der Einströmöffnung nur noch mit zwei statt sechs und die Höhe der Ausströmöffnung nur noch mit sechs statt 12 Zellen aufgelöst werden. Die resultierenden Gitterweiten liegen für die y- und z-Richtung im Bereich von 0,08 m und für die x-Richtung im Bereich von 0,1 m. Wie in der Simulation 3 werden die Defaulteinstellungen des FDS-Programms verwendet.

Verglichen werden die über ein Zeitintervall gemittelten u-Geschwindigkeitsprofile mit den Messdaten in den verschiedenen Messebenen in der Raummitte bei y = 1,5 m (vgl. Bild 14 und 15).

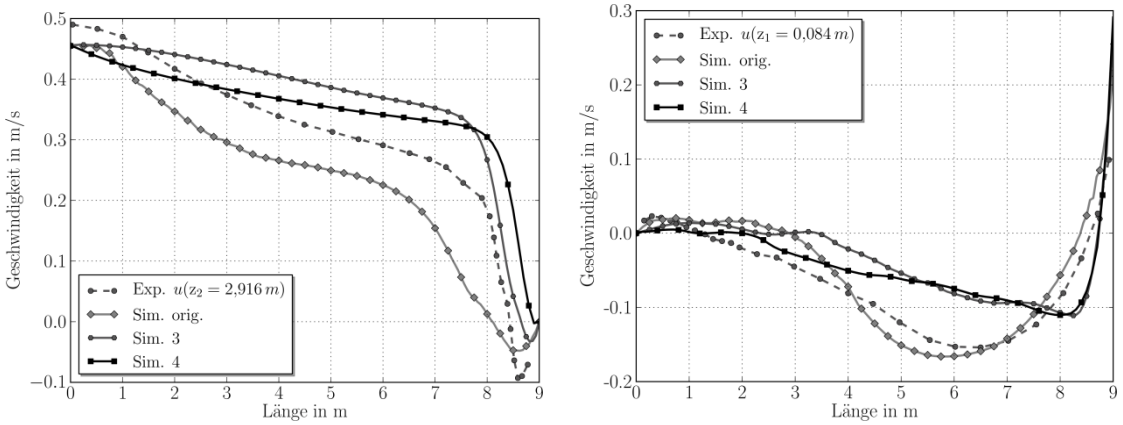


Bild 14 Vergleich der horizontalen u-Geschwindigkeitsprofile für z_1 (links) und z_2 (rechts) bei y = 1,5 m [1].

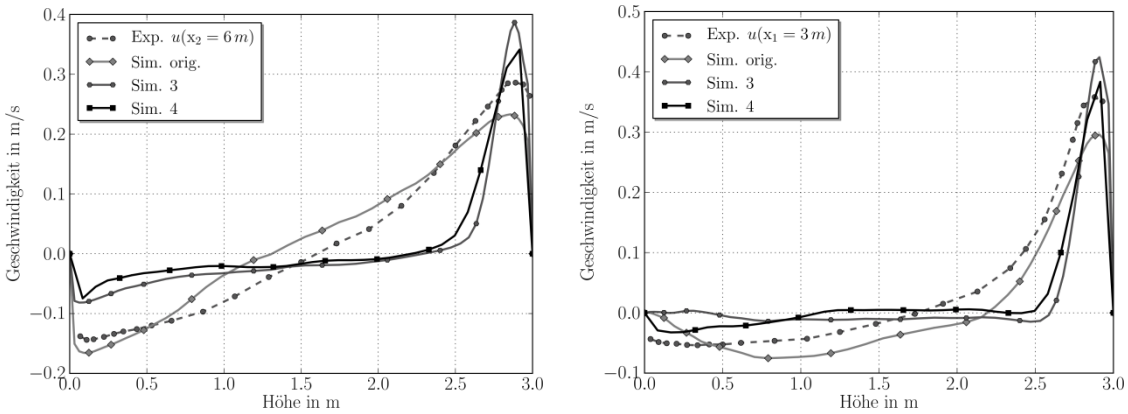


Bild 15 Vergleich der vertikalen u-Geschwindigkeitsprofile für x_1 (links) und x_2 (rechts) bei y = 1,5 m [1].

Der Vergleich zeigt, dass mit den FDS-Defaulteinstellungen bei gleicher Diskretisierung (Sim. 3) die im Validierungsguide des FDS-Programms erzielten Ergebnisse (Sim. orig.) nicht erreicht werden. Die Modellparameter beeinflussen sichtbar die Ergebnisgüte. Die gröbere Diskretisierung (Sim. 4) führt im Bereich der Wandungen zu einer weiteren Verschlechterung.

Tatsächlich erfordert die Simulation des Restivo-Validierungstestfalls einen speziellen Parametersatz, damit die Strömungsverhältnisse in dem betrachten Raum richtig wiedergeben werden.

Bewertung

Die untersuchte FDS-Version ist prinzipiell in der Lage, mit geeigneten Modellparametern und Diskretisierungen die gewählten Testfälle wiederzugeben. Die Verwendung der FDS-Defaulteinstellungen genügt hierfür nachweisbar nicht. Da recheneffiziente Parallelrechnungen auf der Verwendung der fehlerhaften Gebietszerlegung aufbauen, muss auf die Parallelisierung verzichtet werden.

Die Konzeptanwendung am stark vereinfachten Anwendungsbeispiel zeigt bereits, dass allein die Betrachtung der physikalischen Komponente „Gasdynamik“ die Freiheit des Anwenders in der Modellparameterwahl beschränkt. Die FDS-Entwickler berücksichtigen diese Zusammenhänge bei der Definition ihrer Testbeispiele nicht. Dies wäre aber von Vorteil, da bspw. mit dem im Verifikationstestfall Wirbeladvektion ermittelten Modellparameter für die Beschränkung der Zeitschrittweite das Ergebnis des Restivo-Testfalls (Sim. orig.) nochmals verbessert wird. Bild 16 und 17 zeigen den Vergleich der von den FDS-Entwicklern konfigurierten Simulation (Sim. orig) mit einer Simulation, bei der zusätzlich der Zeitschrittparameter aus dem Verifikationstestfall Wirbeladvektion verwendet wird (Sim. Zeitschrittparameter).

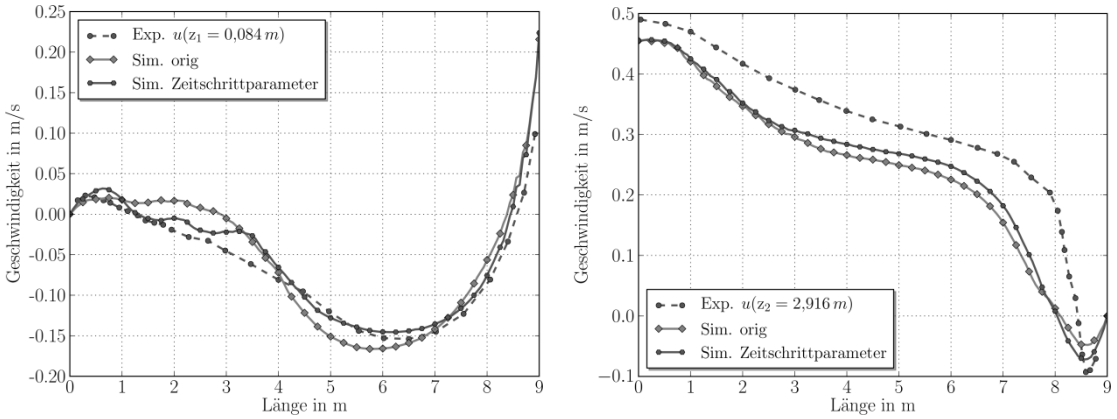


Bild 16 Vergleich der horizontalen u-Geschwindigkeitsprofile für z_1 (links) und z_2 (rechts) bei y = 1,5 m [1].

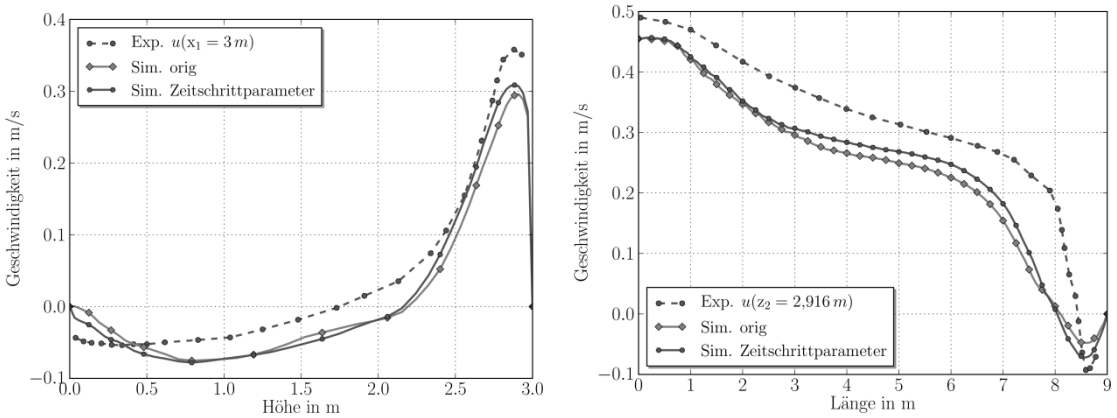


Bild 17 Vergleich der vertikalen u-Geschwindigkeitsprofile für x_1 (links) und x_2 (rechts) bei y = 1,5 m [1].

Der Validierungstestfall zeigt ferner, dass eine Wiedergabe der wandnahen Strömungsverhältnisse eine im Vergleich zu den im Brandschutz üblichen Raumdiskretisierungen sehr feine Raumauflösung erfordert. Diese wird im Validierungstestfall mit Hilfe einer Gitterverzerrung erreicht. In der Praxis wird diese Vorgehensweise jedoch selten möglich sein. Gitterverzerrungen sind in der FDS Version 5.5.3 nur in zwei von drei Raumrichtungen möglich. Da das

Validierungsbeispiel einen quasi zweidimensionalen Aufbau hatte, fiel dieser Nachteil hier nicht auf.

Das vorgestellte konzeptionelle Vorgehen gibt somit nicht nur Hinweise auf die Vertrauenswürdigkeit der vom Anwender geplanten Simulation, sondern leitet diesen auch durch den Konfigurationsprozess der Simulationssoftware.

ZUSAMMENFASSUNG

Die bisher im Brandschutz übliche, überwiegend auf Vergleichen mit experimentellen Brandversuchen gestützte Nachweisführung der Programmeignung führt nicht nur zu vielfältigen Problemen, sondern lässt die Überprüfung der numerisch-mathematischen Funktionsprinzipien der Simulationstechnik gänzlich ausser Acht. Derartige Vergleiche sind daher kein belastbarer Nachweis im Sinne einer Eignungsüberprüfung eines numerischen Rechenverfahrens für einen von der experimentellen Konfiguration abweichenden Anwendungsfall.

Das vorgestellte Konzept beschreibt einen systematischen, die unterschiedlichen Einflussfaktoren berücksichtigenden Prüfprozess. Hierbei werden neben den in der Vergangenheit bereits genutzten Vergleichen mit Brandversuchen auch die mathematischen, numerischen und computertechnik-spezifischen Faktoren berücksichtigt. Durch die übersichtliche Darstellungsform der Testmatrix wird schnell deutlich, wie und ob alle wesentlichen Aspekte bei der Eignungsüberprüfung durch den Anwender berücksichtigt wurden. Bei entsprechender Dokumentation ist ein derart geführter Nachweis von Dritten gut zu überprüfen.

Das Anwendungsbeispiel zeigt, dass die bisherige Verifikations- und Validierungsdokumentation des Fire Dynamics Simulators zwar in die richtige Richtung zielt, jedoch wesentliche Aspekte und Abhängigkeiten nicht berücksichtigt werden. Ein Verweis auf dort erfolgreich gerechnete Beispiele ist ohne weitere Angaben kein belastbarer Nachweis der Programmeignung für einen anderen Anwendungsfall. Das Beispiel zeigt ferner, dass eine Eignungsüberprüfung für einen Anwendungsfall zwingend die Kenntnisse der spezifischen Bedingungen des Anwendungsfalls erfordert. Da dieses Wissen nur der mit der Durchführung befasste Anwender hat, obliegt auch allein diesem Anwender die Durchführung der Eignungsüberprüfung. Programmentwickler können die Anwender hierbei mit einer guten Programmdokumentation und entsprechenden Verifikations- und Validierungstest unterstützen, die Verantwortung für die Eignung ihrer Software für den speziellen Anwendungsfall können sie nicht übernehmen.

Die nicht vertieften Ausführungen und Beispiele in diesem Artikel machen bereits deutlich, das Anwender und Prüfer profunde Kenntnisse der numerisch-mathematischen Zusammenhänge, sowie Erfahrung mit dem Einsatz von numerischen Simulationsprogrammen bzw. deren spezifischen Problemen haben müssen. Allein die Kenntnis brandschutzspezifischer Zusammenhänge oder von Normvorgaben genügt nicht. Wie am Beispiel des Programms Fire Dynamics Simulator gezeigt, ist sowohl eine gute Dokumentation, als auch der Zu-

griff auf den Quelltext des Programms für die Eignungsüberprüfung notwendig bzw. sehr hilfreich. Die hier am Beispiel des Fire Dynamics Simulator demonstrierten Zusammenhänge gelten in gleicher Weise auch für andere Programme. Enthalten diese, wie bspw. bei den Zonenmodellen der Fall, sehr weitreichende empirische Vereinfachungen von komplexen physikalischen Zusammenhängen, erhöht dies den Aufwand in der Eignungsüberprüfung weiter.

Die Durchführung einer CFD-Simulation im Brandschutz ist somit keinesfalls eine Fingerübung nach dem Stand der Technik, sondern noch immer eine wissenschaftlich-orientierte Aufgabe. Wird dies berücksichtigt, lassen sich mit Simulationsprogrammen belastbare Ergebnisse im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr erzielen.

LITERATUR

[1] Münch, M.: Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr. INURI Verlag Berlin, Juli 2013, ISBN 978-3-944809-00-7

[2] Jones, W.: Progress Report on Fire Modeling and Validation. In K. Beall (Hg.), U.S./Japan Government Cooperative Program on Natural Resources (UJNR). Fire Research and Safety. 13th Joint Panel Meeting, NISTIR 6030, Bd. 2, S. 7–14. March 13-20 1997.

[3] Schneider, U.; Seifert, U.: Aspekte der experimentellen Brand-modellierung. vfdb-Zeitschrift, Bd. 2: S.43-58, 2003

[4] Munch, M.; Gebauer, J.; Klein, R.: Verification and Validation of CFD Models for Smoke Spreading Predictions. Poster session at 9th Inter-national Symposium on Fire Safety Science, Karlsruhe, September 2008.

[5] Munch, M.: Kritische Numerische Aspekte bei der Anwendung von Feldmodellen. In 55. Jahresfachtagung der Vereinigung zur Forderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Tagungsband, Salzburg, S. 255–289. vfdb, Vereinigung zur Forderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Postfach 1231, 48338 Altenberge, 21. - 25. Mai 2006.

[6] Munch, M.: Fast and correct computation. A comprehensive test concept to proof the new FDS-ScaRC technique. In 11th International Symposium on Fire Protection, Leipzig. Vereinigung zur Forderung des Deutschen Brandschutzes, vfdb, June 2010.

[7] Münch, M.; Klein, R.: Anforderungen an numerische Berechnungen der Brand- und Rauchausbreitung im Vorbeugenden Brandschutz. vfdb-Zeitschrift, Bd. 3: S. 145-151, August 2008

[8] Schlesinger, S.: Terminology for Model Credibility. Simulation, Bd. 32(3): S. 103-104, 1979

[9] Münch, M.: Moloch – Ein Strömungsverfahren für inkompressible Strömungen – Technische Referenz 1.0. Technischer Bericht PIK-Report Nr. 109, Potsdamer Institut für Klimafolgeforschung e.V., Januar 2008

[10] Hosser, D. (Hg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht TB 04-01. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V., Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Postfach 1231, 48338 Altenberge, 2. Auflage, Mai 2009

[11] ISO/FDIS 16730-2008(E): Fire safety engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods. International Organization for Standardization, Technical Committee ISO/TC 92, Fire Safety, Subcommittee SC 4, Fire safety engineering.

[12] ISO/FDIS 16730-2011: Fire Safety Engineering – Assessment, verification and validation of calculation methods. Part 3: Example of a CFD-model. International Organization of Standardization, Technical Committee ISO/TC 92, Fire Safety Subcommitee SC 4, Fire safety engineering, 2011. ISO/TR 16730-3.

[13] VDI 6019 Blatt 2: Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebauden, Ingenieurmethoden. Verein Deutscher Ingenieure, Juli 2009.

[14] VDI 6020, Teil 1: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebaude- und Anlagensimulation, Gebaudesimulation. Verein Deutscher Ingenieure, Mai 2001.

[15] McGrattan, K. B.; McDermott, R.; Hostikka, S.; Floyd, J.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – User's Guide. NIST Special Publication 1019- 5. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, October 2010.

[16] McGrattan, K. B.; Baum, H.; Rehm, R.; Mell, W. McDermott, R.; Hostikka, S.; Floyd, J.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) – Technical Reference Guide. NIST Special Publication 1019- 5. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, October 2010.

[17] Kilian, S.; Münch, M.: A new generalized domain decomposition strategy for the efficient parallel solution of the FDS-pressure equation. Part I: Theory, Concept and Implementation. Technischer Bericht ZR-09-19, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, Takustr. 7, 14195 Berlin, June 2009, ISSN 1438-0064

[18] Münch, M.: Gegenwärtiger Stand des Konzeptes zur Eignungsüberprüfung des Fire Dynamics Simulators. 4. FDS-Usergroup Treffen, Tagungsband, hhpberlin, Berlin 4.-5. November 2010

PROBABILISTISCHE RISIKOANALYSE ALS BASIS FÜR DIE QUANTITATIVE BEWERTUNG DER PERSONENSICHERHEIT IN ATRIEN

Cornelius Albrecht
WPI, Worcester, MA / SGH, New York City, NY (USA)

EINLEITUNG

Moderne Architektur und der generelle Trend zu optimierter und leistungs-orientierter Bauweise lässt wenig Spielraum für den traditionellen Ansatz mit präskriptiven Vorgaben und starren Anforderungen. In vielen Fällen ist diese Vorgehensweise sogar schlichtweg unmöglich. Stattdessen werden numerische Methoden im Brandschutz eingesetzt, mit denen u. a. die Feuer- und Rauchausbreitung, brandbedingte Tragwerksverformungen sowie Personenströme simuliert werden können. Mit diesen Methoden wird dann versucht, eine möglichst Kosten-Nutzen-optimierte Lösung nach dem Stand der Technik für das betrachtete Bauwerk zu finden. Um für diese Vorgehensweise die benötigten Genehmigungen von den Behörden zu bekommen, muss in der Regel nachgewiesen werden, dass der leistungsorientierte Ansatz ein äquivalentes Sicherheitsniveau im Vergleich zur präskriptiven Lösung bietet, da letztere eine vom Gesetzgeber als sicher definierte Lösung darstellt (sog. „deemed-to-satisfy“).

Momentan kann dieser Äquivalenznachweis nur qualitativ erbracht werden, z. B. indem bei einem Personensicherheitsnachweis gezeigt wird, dass die verfügbare Zeit zur Selbstrettung (*ASET* – available safe egress time) größer ist als die Zeit, die zur sicheren Selbstrettung benötigt wird (*RSET* – required safe egress time). Die für diese Berechnungen benötigten Eingangswerte, Szenarien, Grenzwerte usw. werden in der Regel jeweils individuell vom Brandschutzingenieur festgelegt und bestenfalls mit den zuständigen Behörden abgestimmt, um eine für alle Parteien akzeptable Lösung zu erreichen. Zusätzlich zu konservativ gewählten Werten wird zumeist noch ein einfaches globales Sicherheitskonzept mit einem Sicherheitsfaktor κ zwischen 1,5 und 3,0 [1-6] angewendet, sodass sich folgende Ungleichung ergibt, die zum Nachweis der Personensicherheit erfüllt werden muss:

$$ASET \geq \kappa \cdot RSET \tag{1}$$

Eine Betrachtung der Unsicherheiten in den Eingangswerten und Szenarien bleibt meist aus, obwohl es offensichtlich ist, dass die Eingangswerte hohen Unsicherheiten unterliegen und somit auch die Lösungen stark streuen müssen [7]. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn die in Gleichung (1) beschriebene Ungleichung nur für den binären Fall „Bestehen/Nichtbestehen“ ausgewertet wird und eine Betrachtung der „Sicherheitsmarge“ Δt zwischen ASET und RSET ausgelassen wird [8].

PROBABILISTISCHE BETRACHTUNG

Diesem Manko kann begegnet werden, indem man statt deterministischer Werte für die Eingangsparameter (x_i), wie z. B. die maximale Wärmefreisetzungsrate, die Brandentwicklungsgeschwindigkeit, die Anzahl der Gebäudenutzer zum Brandzeitpunkt usw., stochastische Werte wählt. Dann kann eine probabilistische Methodik angewendet werden, um die Versagenswahrscheinlichkeit (p_f) zu quantifizieren. Unter Berücksichtigung von Gleichung (1) ergibt sich

$$p_f \equiv P(\Omega_f) = P\left[ASET(x_1,...x_i) - RSET(x_k,...x_n) \leq 0\right] \tag{2}$$

wobei Ω_f den sogenannten Versagensbereich des Grenzzustandes darstellt. Die stochastischen Parameter (x_i) werden mit Verteilungsfunktionen und Werten aus verfügbaren Brandstatistiken beschrieben, um ihre Unsicherheit zu berücksichtigen.

Um Gl. (2) zu lösen und p_f zu berechnen, muss die gemeinsame Verteilungsfunktion f($\boldsymbol{x}$) aller Parameter über den Versagensbereich Ω_f integriert werden:

$$p_f = \int_{\Omega_f} \cdots \int f(\mathbf{x}) \cdot d\mathbf{x} \tag{3}$$

Für diesen vermeintlich einfachen Ansatz ist es allerdings häufig unmöglich, eine analytische Lösung zu finden, vor allem weil für Gleichung (2) numerische Methoden, wie z. B. CFD- und Personenstromsimulatoren eingesetzt werden. Eine häufig benutzte und robuste numerische Integrationsmethode ist die Monte Carlo Simulation [9-11]. Somit kann Gleichung (3) zu

$$p_f = \int_{\mathbf{x}} \cdots \int I(\Omega_f) \cdot f(\mathbf{x}) \cdot d\mathbf{x} \tag{4}$$

umformuliert werden, wobei $I(\Omega_f)$ eine sog. Indikatorfunktion ist. Für eine numerische Implementierung kann Gleichung (4) dann zu

$$p_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} I(\Omega_f)_i \tag{5}$$

diskretisiert werden, wobei n eine endliche Anzahl voneinander unabhängiger Simulationen ist. Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, wird eine große Anzahl von Simulationen benötigt, denn erst eine unendliche Anzahl von Simulationen wäre aufgrund des Gesetzes der großen Zahlen theoretisch exakt [12]. Bei Verwendung dieser Methode muss daher mit hohen numerischen Kosten gerechnet werden.

Antwortflächenverfahren

Um die numerischen Kosten soweit zu senken, dass eine Berechnung durchgeführt werden kann, wurde ein adaptives Antwortflächenverfahren entwickelt und mit einem Varianz-optimierten Monte Carlo Verfahren gekoppelt [13]. Somit

können die vielen benötigten Simulationsläufe mit einer alternativen mathematischen Formulierung, der sog. Antwortfläche, umgangen werden. Die Nutzung der Antwortfläche ist numerisch wesentlich günstiger, da nur noch wenige Simulationen (die sog. Stützpunkte) benötigt werden. Um die Anpassung der Antwortfläche zu optimieren wurde statt des normalerweise gewählten linearen Polynomansatzes [14] ein interpolatives Verfahren der kleinsten gleitenden Fehlerquadrate (ILMS) gewählt [15]. Diese Methodik ist im Detail in [16] beschrieben und soll hier nicht weiter ausgeführt werden.

Lastverteilung mit Cloud-basiertem IaaS-HTC System

Trotz des vorgenannten Verfahrens, das eine probabilistische Betrachtung mit komplexen numerischen Modellen überhaupt erst möglich macht, werden immer noch diverse (Stützpunkt-)Simulationen benötigt, die die Rechenleistung einzelner Computer oder sogar kleiner Clustersysteme bei weitem übersteigen können. Dies ist vor allem der Fall, wenn komplexe Geometrien betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde ein Lastverteilungssystem entwickelt, welches „Infrastructure as a Service“ (IaaS) Cloud-Computing [17] benutzt, um die numerische Last auf sog. lose gekoppelte, dezentrale High-Throughput Computerclustersysteme (HPC) [18] in der Cloud zu verteilen. Dieser Ansatz ist vor allem für die hier beschriebene Problemstellung hervorragend geeignet, da die einzelnen Simulationen voneinander unabhängig sind und nicht interagieren. Dieser somit als „einfach parallel“ [19] bezeichnete Ansatz kann daher die numerische Last auf diverse Cloud-Instanzen verteilen. Die Cloud-Instanzen oder Agents, die vereinfacht viele einzelne Computer in der Cloud darstellen, können abhängig von der Last dynamisch allokiert und wieder freigegeben werden, sodass die benötigten Ressourcen optimiert eingesetzt werden und die Kosten im Rahmen bleiben. Damit kann z. B. ein FDS-Cluster mit 250 Kernen in weniger als 30 Minuten gestartet werden und für weniger als 4 Euro pro Stunde betrieben werden.

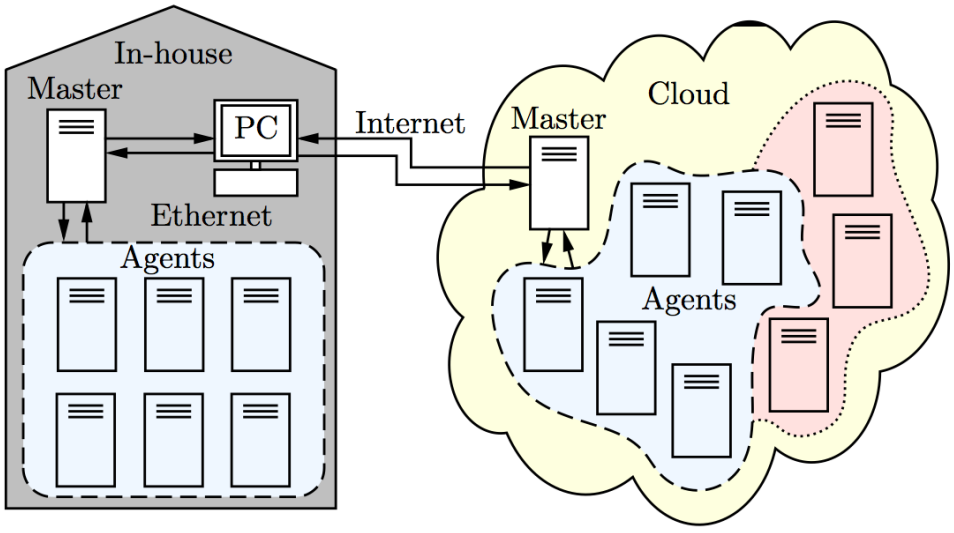


Bild 1 *Vergleich von In-house und Cloud-basierten Rechnersystemen. Cloud-Ressourcen können dynamisch allokiert und freigegeben werden.*

Solche skalierbare oder sogar hybride Systeme, wie in Bild 1 dargestellt, die sowohl lokale, als auch bei gesteigertem Bedarf zusätzliche Cloud-Agents benutzen können, stellen genügend Rechenkapazität auch für aufwendigste Simulationen dar. Durch die geringen Kosten und die einfache Anbindung wird diese Methodik sicherlich auch jenseits der probabilistischen Simulationen viele Anwendungsbereiche im Brandschutz finden.

SZENARIEN UND PARAMETER FÜR EIN BEISPIELHAFTES ATRIUM

Um die Anwendung der vorgestellten Methodik zu demonstrieren, ähnlich zu dem Beispiel in [13[, [16], wird ein Atrium betrachtet, welches beispielhaft in Bild 2 zu sehen ist. Gerade Atrien werden häufig in leistungsorientieren Brandschutzkonzepten betrachtet, da die präskriptiven Anforderungen hier meist nicht ausreichen oder nicht anwendbar sind [1].

Des Weiteren werden Atrien häufig unterschiedlich genutzt und das Brandrisiko für ein Atrium kann teilweise sogar innerhalb eines Jahres variieren. Auch dies muss in einem leistungsorientieren und optimierten Brandsicherheitskonzept Berücksichtigung finden.

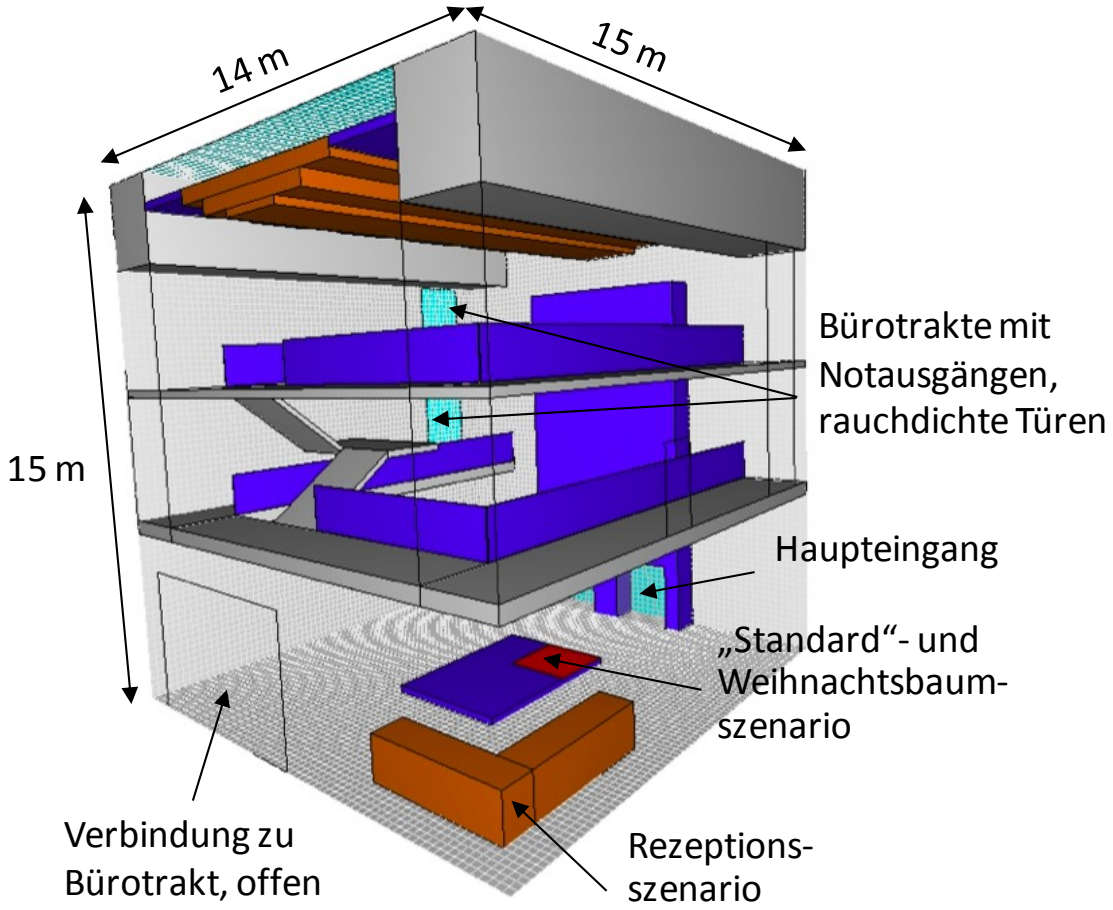


Bild 2 Numerisches Modell und Beschreibung des Atriumaufbaus.

Gebäudebeschreibung und Schutzziele

Das in Bild 2 vorgestellte Atrium soll beispielhaft den Eingangsbereich eines mittelgroßen Bürogebäudes darstellen. Die offene Bauweise soll eine einladende und repräsentative Atmosphäre schaffen. Im Atriumbereich befinden sich ein Ausstellungsbereich z. B. für Produkte oder saisonale Dekoration und ein Rezeptionsbereich für Gäste und Kunden. Die Bürobereiche befinden sich in allen Stockwerken in Fluren, die vom Atrium abgehen. Die Flure sind vom Atrium mit rauchdichten Türen abgetrennt, die sich im Brandfall automatisch schließen sollen. Vereinfachend wird von einer Funktion dieser Türen ausgegangen, sodass die Flure nicht in der Brandsimulation, sondern nur in der Entfluchtungssimulation berücksichtigt werden müssen. Ein Versagen der Türen kann in einer Systemanalyse berücksichtigt werden. Nottreppenhäuser befinden sich jeweils am äußeren Ende der Flure; im Normalfall sollen die Büros jedoch ausschließlich durch das Atrium betreten und verlassen werden.

Hauptaugenmerk der Analyse ist der Nachweis der Personensicherheit im Falle eines Brandes im Atriumbereich. Trotz der vorhandenen Nottreppenhäuser muss davon ausgegangen werden, dass der Großteil der Nutzer versuchen wird, das Gebäude durch das Atrium zu verlassen. Zusätzlich soll in der Risikoanalyse berücksichtigt werden, dass das Atrium unter anderem auch für Veranstaltungen mit hoher Personenanzahl, z. B. Empfänge, Produktvorstellungen usw., genutzt werden kann.

Brand- und Evakuierungsszenarien

Der Einfachheit halber werden drei Szenarien im Hinblick auf die quantitative Risikoanalyse genauer untersucht: ein „Standard“-Szenario basierend auf dem sog. t^2-Ansatz [20] mit einer linearen Brandentwicklungsphase [21], ein Brand im Rezeptionsbereich basierend auf den Ergebnissen der NIST-Kiosk-Brandversuche [22] und ein sich schnell entwickelnder Brand eines Weihnachtsbaumes auf Basis von Versuchen des Department of Homeland Security (DHS) [23].

„Standard“-Szenario

Das „Standard“-Szenario wird hier betrachtet, da der t^2-Ansatz einen de-facto Standard im Brandschutzingenieurwesen darstellt und häufig zur Quantifizierung von Brandszenarien genutzt und akzeptiert wird. Es wird unterstellt, dass sich die Wärmefreisetzungsrate (HRR) quadratisch über die Zeit entwickelt, bis ein Maximum erreicht ist (HRR_{max}). Die Brandentwicklungsgeschwindigkeit wird häufig als Zeitdauer t_g in Sekunden bis zum Erreichen von 1 MW angegeben. Basierend auf den Ergebnissen in [21], [24], wird der quadratischen Phase noch eine lineare Phase mit gleicher Länge t_g vorgeschaltet, um ein Brandinkubationsphase zu simulieren.

Dieses Szenario wurde auch in [16], [25] genutzt und stellt somit einen ersten quantitativen Vergleich mit der Versammlungsstätte dar. Der Brand wird zentral

im Atrium vermutet (s. Bild 2), da sich hier eine Produktausstellung befindet (z. B. ein Auto). Das stochastische Modell für die Quellterme wurde aus den genannten Quellen übernommen und ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Stochastisches Modell für das „Standard“-Szenario

Parameter	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Std. Abw.	Var. Koeff.
HRRmax	MW	Normal	4	0,8	20%
tg	s	Gumbel (min)	250	30	12%
yCO	g/g	Normal	0,090	0,030	33%
yHCN	g/g	Normal	0,006	0,002	33%
ySOOT	g/g	Normal	0,120	0,040	33%

Tabelle 2 Stochastisches Modell für den Brand im Rezeptionsbereich

Parameter	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Std. Abw.	Var. Koeff.
HRRmax	MW	Normal	1.645	0,2	12%
tg	s	Gumbel (min)	400	100	25%
yCO	g/g	Normal	0,050	0,0125	25%
yHCN	g/g	Normal	0,003	0,0008	27%
ySOOT	g/g	Normal	0,100	0,0300	30%

Brand im Rezeptionsbereich

Um ein nutzungsspezifisches Szenario direkt für das Atrium zu entwickeln, wird ein Brand im Rezeptionsbereich angesetzt. Es wird angenommen, dass dieser Brand sich ähnlich zu den NIST-Kiosk-Versuchen verhält [22]. Daher wird ein stochastisches Modell für die Quellterme (Tabelle 2) auf deren Basis entwickelt, bei dem konservativ die Umhüllenden für die HRR-Kurven gewählt wird. Um eine bessere Anpassung zu erreichen wird wieder eine lineare Inkubations-phase angenommen, wie in Bild 3 dargestellt.

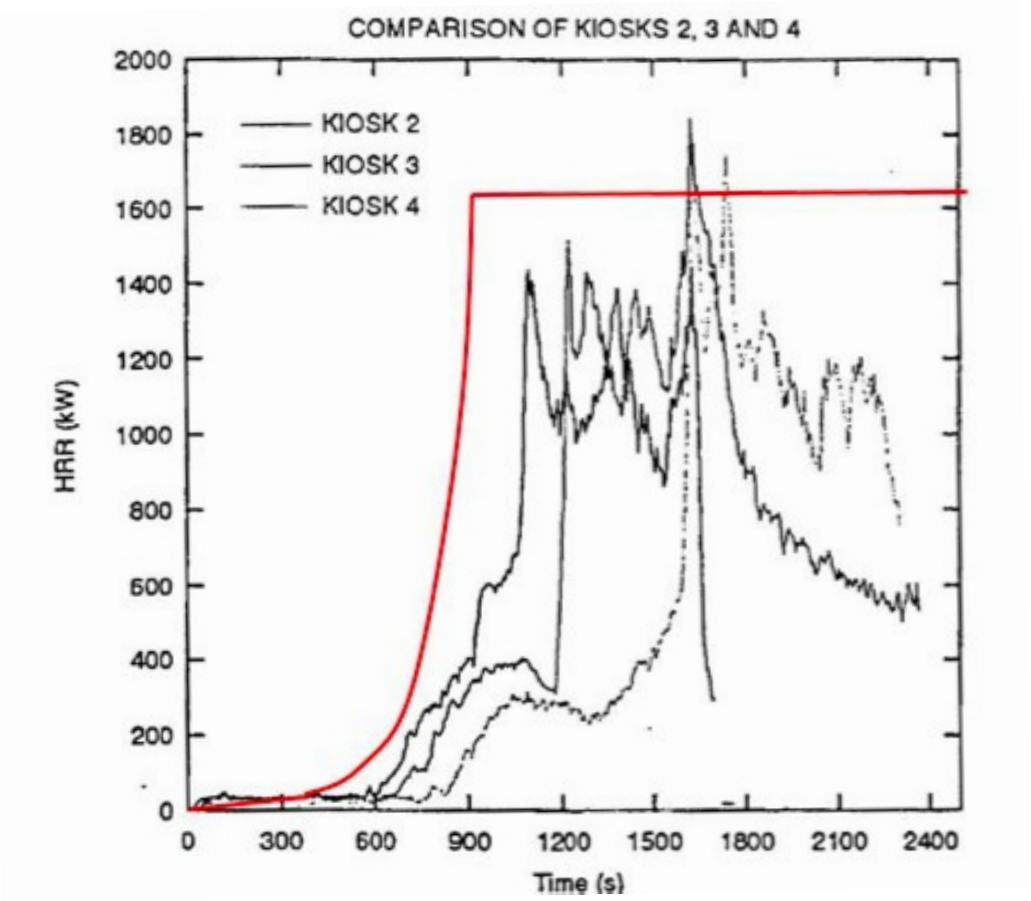


Bild 3 *Konservative Herleitung des Rezeptionsszenarios. Die Umhüllende zeigt, wie das Szenario (hier Mittelwert) auf der sicheren Seite liegend aus den NIST-Kiosk-Versuchen abgleitet wurde.*

Brand eines Weihnachtsbaumes

Das dritte Szenario soll ein sich sehr schnell entwickelndes Feuer darstellen. Aus diesem Grunde wird angenommen, dass saisonal ein großer Weihnachtsbaum im Atriumbereich aufgestellt wird. Um das Szenario zu quantifizieren wird eine Studie zu Weihnachtsbaumbränden des Department of Homeland Security (DHS) verwendet [23]. Die dort angegebenen Daten werden auf der sicheren Seite liegend extrapoliert, um dem angenommenen, repräsentativen Baum im Atriumbereich gerecht zu werden. Das größte Risiko ist die extrem schnelle Brandentwicklung mit dem Erreichen von hohen maximalen Wärmefreisetzungsraten nach sehr kurzer Zeit. Die Daten des DHS werden konservativ mit einem t^2-Ansatz beschrieben, der im Gegensatz zu den vorigen Szenarien keine lineare Inkubationsphase hat. Aus der DHS-Studie wird ersichtlich, dass schon nach 150 Sekunden 70% der Brandlast verbrannt ist. Für die Modellierung wird eine linear abfallende HRR angenommen; nach 200 Sekunden ist die Brandlast vollständig verbrannt. Dies ist im groben Einklang mit den Ergebnissen der DHS-Studie, auf dessen Basis auch das stochastische Modell mit den in Tabelle 3 angegebenen Parametern quantifiziert wird.

Tabelle 3 Stochastisches Modell für den Weihnachtsbaumbrand

Parameter	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Std. Abw.	Var. Koeff.
HRRmax	MW	Normal	3,05	1,3	43%
tg	s	Gumbel (min)	40	16,3	41%
yCO	g/g	Normal	0,005	0,001	20%
yHCN	g/g	Normal	0,001	0,0003	30%
ySOOT	g/g	Normal	0,02	0,0020	10%

Entfluchtungsszenario

Für das Entfluchtungsszenario wird hier beispielhaft eine ungewöhnlich hohe Personenanzahl auch mit ortsfremden Personen angenommen, um Szenarien wie Empfänge oder (Weihnachts-)Feiern zu berücksichtigen. Auf ein Alltagsszenario mit deutlich weniger und ortskundigen Personen wird verzichtet, da dieses durch das angenommene Szenario auf der sicheren Seite liegend abgedeckt ist. Aufgrund der Veranstaltung wird außerdem berücksichtigt, dass das Atrium inklusive der Umlaufbalkone eine Personendichte ähnlich der von Versammlungsstätten aufweist. Konservativ wird darüber hinaus eine für Bürogebäude übliche Personendichte in den Büros und den Bürofluren angesetzt. Es muss weiterhin angenommen werden, dass im Brandfall 70% der Personen aus Gewohnheit und/oder Ortsunkundigkeit versuchen werden, durch den Haupteingang zu fliehen. Das stochastische Modell ist in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Stochastisches Modell für die Entfluchtung

Parameter	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Std. Abw.	Var. Koeff.
Warnzeit	s	Normal	60	15	25%
Premovementzeit	s	Gumbel (max)	90	25	28%
Personendichte	Pers./m2	Gumbel (max)	1,5	0,5	33%
Gehgeschwindigkeit	m/s	Normal	1,25	0,3	24%

Es lässt sich natürlich argumentieren, dass dieses Szenario eher konservativ ist und bei einer Betrachtung über den Zeitraum eines Jahres nur an wenigen Tagen auftreten kann. Für diese Studie soll es aber alle möglichen anderen Szenarien auf der sicheren Seite einhüllen. In vertiefenden, weiterführenden Studien sollte allerdings auch das „Alltags"-Szenario betrachtet werden, um das durchschnittliche Sicherheitsniveau richtig abzubilden. Diese Betrachtungen könnten dann in ein Mehr-Schrittverfahren überführt werden, in dem Brand- und Entfluchtungsszenarien entsprechend ihrer Auftretenswahrscheinlichkeiten risikogerecht miteinander verbunden werden.

PROBABILISTISCHE BERECHNUNG

Die probabilistischen Berechnungen werden mit dem eingangs beschriebenen Verfahren und dem im vorigen Abschnitt dargestellten stochastischen Modell durchgeführt. Neben den Versagenswahrscheinlichkeiten p_f können auch Sensitivitäten α_i berechnet werden, die den Einfluss einzelner Parameter auf die Versagenswahrscheinlichkeit darstellen.

RSET wird im Simulationsmodell „Pathfinder" definiert als der Zeitpunkt, bei dem die letzte Person das betrachtete Gebäude verlassen hat. Für die Bestimmung von *ASET* aus dem CFD-Simulationsmodell FDS ist diese Betrachtung allerdings nicht so einfach, da verschiedene Grenzwertmodelle existieren [6]. Für diese Studie werden daher zwei verschiedene Kriterien betrachtet. Zum einen wird ein Sichtweitekriterium zu Grunde gelegt, bei dem eine optische Dichte von 0,15 m^{-1} als Grenzwert angenommen wird; dies entspricht einer Sichtweite von ungefähr 20 m [26], [27]. Zum anderen wird ein zeitintegratives Dosismodell (Fractional Effective Dose, FED) angesetzt, welches neben den erstickenden Brandgasen (CO, HCN) auch die Hitzewirkungen (konvektiv und radiativ) berücksichtigt [28], [29]. Für das FED-Modell werden zwei verschiedene Grenzwerte angesetzt, 0,3 und 1,0, um den impliziten quantitativen Einfluss aufzuzeigen, der mit der (recht willkürlichen) Festlegung des Grenzwertes einhergehen.

Die benötigten Daten aus der Brandsimulation werden auf jeder Atriumebene 2,0 Meter über der jeweiligen Bodenhöhe aufgezeichnet. Dies ermöglicht in der quantitativen Analyse sogar eine stockwerksweise Betrachtung. Zusätzlich werden die Zeitpunkte der Rauchmelder- und Sprinklerauslösungen mittig im Atrium simuliert, um später stochastische Modelle abzuleiten.

„Standard"-Szenario

Eine erste Berechnung für den im Falle des „Standard"-Brand unter Berücksichtigung des Sichtweitekriteriums ergibt eine Versagenswahrscheinlichkeit p_f = 98,5%. Dies erscheint zunächst sehr hoch, ist aber bei genauerer Betrachtung als konservativ anzusehen, da der Zeitpunkt des Unterschreitens des Sichtweitekriteriums auf dem Balkon des obersten Stockwerkes (*ASET*) mit dem Zeitpunkt verglichen wird, zu dem die letzte Person das Gebäude verlassen hat

(*RSET*). Feiner aufgelöst wäre der Balkon selbst vor dem Erreichen des Grenzkriteriums über die Treppen oder die Flure geräumt (die Personenstromsimulation ergibt, dass der Balkon des obersten Geschosses im Mittel schon nach 30 Sekunden geräumt ist). Personen, die aus den Fluren kommen, werden wahrscheinlich durch den Rauch im Atrium abgeschreckt und in Richtung Nottreppenhaus umdrehen. Die rauchdichten Türen zwischen Atrium und Bürotrakt bieten noch zusätzliche (hier noch unquantifizierte) Sicherheit.

Die höchsten Sensitivitäten werden für die Brandentwicklung (Zeit bis 1 MW, $\alpha = 0{,}57$), die Premovementzeit ($\alpha = -0{,}58$) und die Personenanzahl ($\alpha = -0{,}58$) berechnet, wobei diese drei Parameter mehr als 99 % der Gesamtvarianz des Grenzzustandes abdecken.

Eine Berechnung mit dem FED-Modell als Kriterium für ASET liefert für keine der Simulationen bei einer Simulationsdauer von 20 Minuten einen Wert von 1,0 oder größer. Für den Grenzwert von 0,3, der häufig in der Praxis angesetzt wird [1], [3], ergibt sich eine Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f = 5{,}4$ %, wobei *ASET* in den Berechnungen im Mittel 411 Sekunden (> 6 Minuten) größer ist als *RSET*. Dies ist die eingangs erwähnte Sicherheitsmarge Δt.

Die Sensitivitäten betragen $\alpha = 0{,}87$ für die Brandentwicklung, die damit allein schon etwa 75 % zur Varianz beiträgt, sowie $\alpha = -0{,}37$ für die Premovementzeit und $\alpha = -0{,}31$ für die Personenanzahl. Insgesamt tragen diese drei Parameter 98 % zur Gesamtvarianz bei.

Eine vergleichende Analyse wird durchgeführt, um den Einfluss des Ortes der Datenaufzeichnung zu identifizieren. Hierzu werden die Simulationsergebnisse aus den ersten beiden Stockwerken ausgewertet, während das oberste Stockwerk ausgelassen wird. Diese neuen *ASET*-Werte werden wiederum mit dem vorherigen *RSET* verglichen (letzte Person verlässt das Gebäude) und ergeben eine um etwa den Faktor 15 reduzierte Versagenswahrscheinlichkeit $p_f = 6{,}4$ % für das Sichtweitekriterium.

Dies hängt offensichtlich mit dem Volllaufen des Atriumvolumens mit Rauch zusammen, zeigt aber deutlich, dass ein schlecht gewählter Vergleich von *ASET*- und *RSET*- Zeiten (hier: Sichtweite oberer Balkon vs. letzte Person aus Gebäude) zu unausgewogenen Ergebnissen führten kann, die nicht das für die Personensicherheit relevante Sicherheitsniveau im Gebäude widerspiegeln.

Die Auswertung der Daten für die simulierten und mittig im Atrium über dem Brand positionierten Rauchmelder- und Sprinklerauslösungen ergibt eine mittlere Auslösedauer von 49 Sekunden für die Rauchmelder und 600 Sekunden für die Sprinkler. Wie schon in vorherigen Studien gezeigt [16], korreliert die Sprinklerauslösung direkt mit der angesetzten Brandentwicklung ($R^2 > 99\%$).

Brand im Rezeptionsbereich

Obwohl das „Standard“-Szenario einen guten Anhaltspunkt und bietet, soll mit dem Brand im Rezeptionsbereich ein weniger konservatives und spezifisch auf das Atrium zugeschnittenes Szenario analysiert werden. Die Werte für die Sichtweite und den FED werden wie oben aufgezeichnet, um die Vergleichbarkeit zu wahren. Die Wahrscheinlichkeit, dass im oberen Balkon das Sichtweitekriterium unterschritten wird bevor die letzte Person das Gebäude verlassen hat, wird in diesem Szenario zu p_f = 43 % berechnet. Da auch dieser Wert noch recht hoch ist, sei angemerkt, dass dieses nutzungsspezifisch zugeschnittene Szenario ebenfalls konservativ gewählt wurde, aber eine nur eine halb so große Versagenswahrscheinlichkeit hat wie das allgemeine und konservativere „Standard“-Szenario.

Die höchsten Sensitivitäten werden wiederum für die Brandentwicklung (α = 0,76, dies entspricht 57 % der Varianz), die Premovementzeit (α = -0,46) und die Personenanzahl (α = -0,43) identifiziert, die zusammen 97 % der Varianz ausmachen.

Für den FED-Wert erreicht keine der Simulationen weder den Grenzwert von 1,0, noch den konservativeren Grenzwert von 0,3. Der maximal berechnete FED-Wert liegt bei rund 0,15 im oberen Balkon. Dies hängt vor allem mit den deutlich geringeren Beiwerten für CO und HCN zusammen.

Die mittlere Auslösezeit für die Rauchmelder beträgt 124 Sekunden, was auf die längere Inkubationsphase mit geringerer HRR zurückzuführen ist. Auch die Position des Brandes und die damit größere Distanz zu den Rauchmeldern, sowie die Dispersion des Rauches tragen hierzu bei. Die Sprinkler mittig an der Atriumdecke lösen in keiner der Simulationen innerhalb der ersten 20 Minuten aus da die geringere HRR und die längere Distanz nicht die zur Auslösung notwendige Temperatur mittig im Atrium produziert.

Brand eines Weihnachtsbaumes

Obwohl dieses Szenario wesentlich geringere Beiwerte für Ruß, CO und HCN aufweist, ist es doch aufgrund seiner extrem schnellen Brandentwicklung für die Personensicherheit von Bedeutung, zumal die Brandentwicklung in den vorherigen Szenarien jeweils die höchste Sensitivität hatte. Eine hohe maximale Wärmefreisetzung wird wesentlich früher als bei den anderen Szenarien erreicht.

Dies zeigt sich direkt in der Versagenswahrscheinlichkeit für die Sichtweite, die p_f = 99% beträgt. Somit wird das Kriterium im oberen Balkon nahezu immer erreicht, bevor die letzte Person das Gebäude verlassen hat. Allerdings liegen die Maximalwerte der optischen Dichte in diesem Szenario bei 0,25 m^{-1}, was einer minimalen Sichtweite von rund 4 bis 5 Metern entspricht, also noch nicht als besonders kritisch einzustufen ist. Dazu trägt auch die Tatsache bei, dass die Brandlast des Baumes recht schnell verbrannt ist und sich mit abfallender HRR auch die Sichtweite wieder bessert.

Ähnliche Ergebnisse können auch beim Ansatz des FED-Kriteriums beobachtet werden. Der maximale FED-Wert aller Simulationen liegt bei 0,1. Das kann zwar bedeuten, dass die Personen im oberen Balkonbereich zwar den Brandwirkungen ausgesetzt sind, von denen aber keine direkte Gefahr für Leib und Leben ausgeht. Zusätzlich dazu wurden auf sicherer Seite liegend die Eingangswerte für die Warn- und die Premovementzeit nicht geändert, obwohl in der Realität von einem schnelleren Einsetzen der Flucht bei einer offensichtlich gefährlichen Brandentwicklung ausgegangen werden kann [28].

Die Rauchmelder lösen in den Simulationen im Mittel nach 23 Sekunden aus, während die Sprinkler im Mittel erst nach 120 Sekunden auslösen. In einigen Simulationen mit niedrigen Werten für die HRR wird jedoch keine Auslösung beobachtet. Dieses Verhalten kann wieder mit der starken Korrelation zwischen der Sprinklerauslösezeit und der HRR erklärt werden.

Trotz der extrem schnellen Brandentwicklung kann für dieses Szenario gezeigt werden, dass eine gewisse Sicherheit für die Personen besteht, wenn akzeptiert wird, dass diese kurzzeitig und in geringen Dosen dem Rauch ausgesetzt sein können. Dies könnte zwar kurzzeitig die Flucht behindern oder verzögern, sollte aber nicht zu einer Verhinderung der Flucht führen. Ein solcher Ansatz ist allerdings in vielen Ländern, u. a. Deutschland, nicht möglich, da die Rauchfreihaltung gefordert wird [1], [31]. Für die Zukunft wäre es wünschenswert, ein hierarchisches System [16] zu entwickeln, in welchem risikoorientiert z. B. je nach Auftretenswahrscheinlichkeit und potentiellem Schadensausmaß die zugehörigen Kriterien und Grenzwerte gewählt werden können. Ein schlimmstmögliches Szenario („worst possible“) könnte in so einem Fall anders behandelt werden als ein realistisches und wahrscheinlicheres schlimmst-anzunehmendes Szenario („worst credible“).

Systemanalyse

Auch wenn die in den vorigen Abschnitten berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten teilweise sehr hoch erscheinen, sollten diese auch im Rahmen einer Systemanalyse betrachtet und auf den Bezugszeitraum eines Jahres angepasst werden, wie es bei eingeführten Sicherheitskonzepten im Bauwesen, z. B. für die Eurocodes [32], üblich ist. Hierbei wird eine jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Brandes in einer Nutzungseinheit berücksichtigt, da dieser ein sehr seltenes Ereignis darstellt. Analog zu [13], [16] und unter Berücksichtigung von Brandstatistiken wird für das hier untersuchte Beispiel eine Auftretenswahrscheinlichkeit von $p_1 = 2$ % pro Jahr angesetzt. In einer Systemanalyse können auch die Wirkungen der Brandschutzsystemen unter Berücksichtigung ihrer Ausfallwahrscheinlichkeiten direkt quantifiziert und in die Sicherheitsanalysen mit einbezogen werden. Somit könnten die oben beschriebenen Szenarien mit und ohne die Wirkung der Systeme quantifiziert und verknüpft werden, um alle Fälle zu berücksichtigen und ein ausgeglichenes und optimiertes Sicherheitsniveau zu erreichen. Für weitere Informationen zur Systemanalyse sei auf [16], [33] verwiesen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die hier vorgestellten Rechnungen und Ergebnisse probabilistischer Analysen sind zwar noch recht begrenzt, lassen jedoch bereits einige grundsätzliche Schlussfolgerungen im Bezug zum Umgang mit leistungsorientierten Personensicherheitsnachweisen im Brandschutz zu. Neben der offensichtlichen und bekannten Tatsache, dass vor allem die Szenarien- und Parameterauswahl das Ergebnis maßgeblich beeinflusst, konnte gezeigt werden, dass die Brandentwicklungsgeschwindkeit, die Premovementzeit und die Personenanzahl die entscheidenden Parameter sind, wenn ein t^2-Szenario oder eine Modifikation davon zu Grunde gelegt wird. Somit können diese Parameter wesentlich zielgerichteter gewählt werden.

Neben den Szenarien und Parametern sind auch die Wahl des Grenzkriteriums und die Höhe des angesetzten Grenzwertes von großer Bedeutung. Während die Unterschiede zwischen Sichtweite und Dosis-Zeit-Modell FED offenkundig sind, ist es zunächst nicht direkt ersichtlich, welche Auswirkung die Änderung des Grenzwertes des FED von 1,0 auf 0,3 hat. Der klassische Ansatz, das *ASET*/*RSET*-Konzept als binären Fall „Bestehen/Nichtbestehen“ zu betrachten, führt zu nicht-optimalen Ergebnissen wie das Beispiel des Weihnachtsbaumszenarios zeigt. Zwar liegt die Versagenswahrscheinlichkeit für die Einhaltung einer Sichtweite von 20 Metern bei $p_f = 99\ \%$, aber Sichtweiten von 4 bis 5 Meter werden nicht unterschritten und die FED-Werte werden zu keinem Zeitpunkt kritisch. Die Wahl des Grenzwertes führt hier also direkt zu entweder zu konservativen oder zu optimistischen Ergebnissen. In einer Richtlinie für Nachweise der Personensicherheit sollte deshalb festgelegt werden, wo (Ort, Höhe usw.) mit welchem Modell (z. B. CFD- oder Zonenmodell) die Werte für die Berechnung der *ASET* zu ermitteln sind.

Dies gilt ebenso für die Entfluchtungssimulation mit den diversen verfügbaren Modellen. *RSET* wird typischerweise als die Zeit angenommen, zu der die letzte Person das Gebäude ins Freie oder die Nutzungseinheit in einen sicheren Bereich verlassen hat. In dem hier gezeigten Beispiel würden also die Brandwirkungen auf dem Balkon des oberen Stockwerks der Entfluchtung des Gesamtgebäudes gegenübergestellt. Dies ist zwar als konservative Vorgehensweise durchaus plausibel, aber die dadurch entstehende, implizite Sicherheit kann nicht quantifiziert werden.

Die Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung wie in einer früheren Studie für eine Versammlungsstätte [13]. Auch die Parameter mit den größten Sensitivitäten sind gleich. Somit stellen die Beispiele einen ersten Schritt für die Entwicklung eines risikogerechten, leistungsorientieren Ansatzes dar, da nun anstelle einer rein qualitativen Bewertung über die Versagenswahrscheinlichkeit auch ein quantitativer Vergleich möglich ist.

Bei dem Ansatz von Ingenieurmethoden für Personensicherheitsnachweise ist es wichtig, dass der Brandschutzplaner darlegt, wie *ASET* und *RSET* zu Stande kommen und wie das Konzept angewendet wurde. Dies könnte auch beinhal-

ten, dass in einem Mehr-Schritt-Verfahren zunächst ein lokaler Nachweis geführt werden muss, z. B. in dem Atrium der Nachweis der Sicherheit des oberen Balkons. Im nächsten Schritt ist dann die Nutzungseinheit und ggf. das gesamte Gebäude mit angemessenen Szenarien, Parametern und Grenzwerten nachzuweisen

Wie oben beschrieben, könnten somit dann auch die jeweiligen Szenarien, Wirkungen von Brandschutzsystemen und Leistungskriterien miteinander in einem optimierten Gesamtkonzept verknüpft werden. Ultimative Grenzkriterien wie z. B. der FED-Wert würden eher bei den „Worst-Possible"-Szenarien zu Grunde gelegt werden, während konservative Kriterien wie die Sichtweite mit wahrscheinlicheren, weniger scharfen Szenarien angewendet würden. Die Lösung wäre somit risikogerecht und Kosten-Nutzen-optimiert, würde jedoch auch den schlimmsten Fall mit berücksichtigen und abdecken.

Bild 4 zeigt die Elemente eines risikogerechten, leistungsorientierten Sicherheitskonzeptes für die Personenrettung, die grundsätzlich in Basis- und Leistungselemente unterteilt werden können. Während in den Basiselementen Anforderungen und Definitionen, Validierungsbeispiele für numerische Modelle sowie Stufen/Schritte und Kompetenzen für die Nachweise festlegt sind, beziehen sich die Leistungselemente auf Leistungskriterien und Grenzwerte sowie ein (semi-)probabilistisches Sicherheitskonzept oder eine andere Methodik zum Umgang mit den Unsicherheiten. Des Weiteren müssen Festlegungen für Eingabeparameter und die Modellierung (auch von Brandschutzsystemen) getroffen werden.

Wie bereits in [16] dargestellt, wäre es mittelfristig wünschens- und erstrebenwert, ein semi-probabilistisches Sicherheitskonzept zu entwickeln mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_i für die oben identifizierten wichtigsten Parameter. Diese könnten analog zum Sicherheitsformat für die Eurocodes [32] als Quotient eines aus der erforderlichen Zuverlässigkeit β_{fi} im Brandfall und den Sensitivitäten α_i der Parameter abgeleiteten Bemessungswertes und eines als ungünstiges Quantil definierten charakteristischen Wertes berechnet wird.

Wenn der Parameter als normalverteilt mit dem Variationskoeffizient V_i und der charakteristische Wert als 90 %-Quantil vorausgesetzt wird, ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert aus Gleichung (6):

$$\gamma_i = \frac{1 - \alpha_i \cdot \beta_{fi} \cdot V_i}{1 \pm 1{,}28 \cdot V_i} \tag{6a}$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}\left(1 - p_{f,fi}\right) \tag{6b}$$

Hierbei ist $p_{f,fi}$ die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall, β_{fi} der zugehörige Zuverlässigkeitsindex und $\Phi^{-1}(.)$ die Inverse Funktion der Standardnormalverteilung. Zur Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte siehe auch [37]. Gleichung (6) kann auch für andere Verteilungstypen formuliert werden [33].

Dieses Sicherheitsformat kann in das beschriebene Rahmenwerk eingebettet werden und einen objektiven, risikogerechten, leistungsorientieren und optimierten Nachweis der Personensicherheit nach dem Stand der Technik ermöglichen.

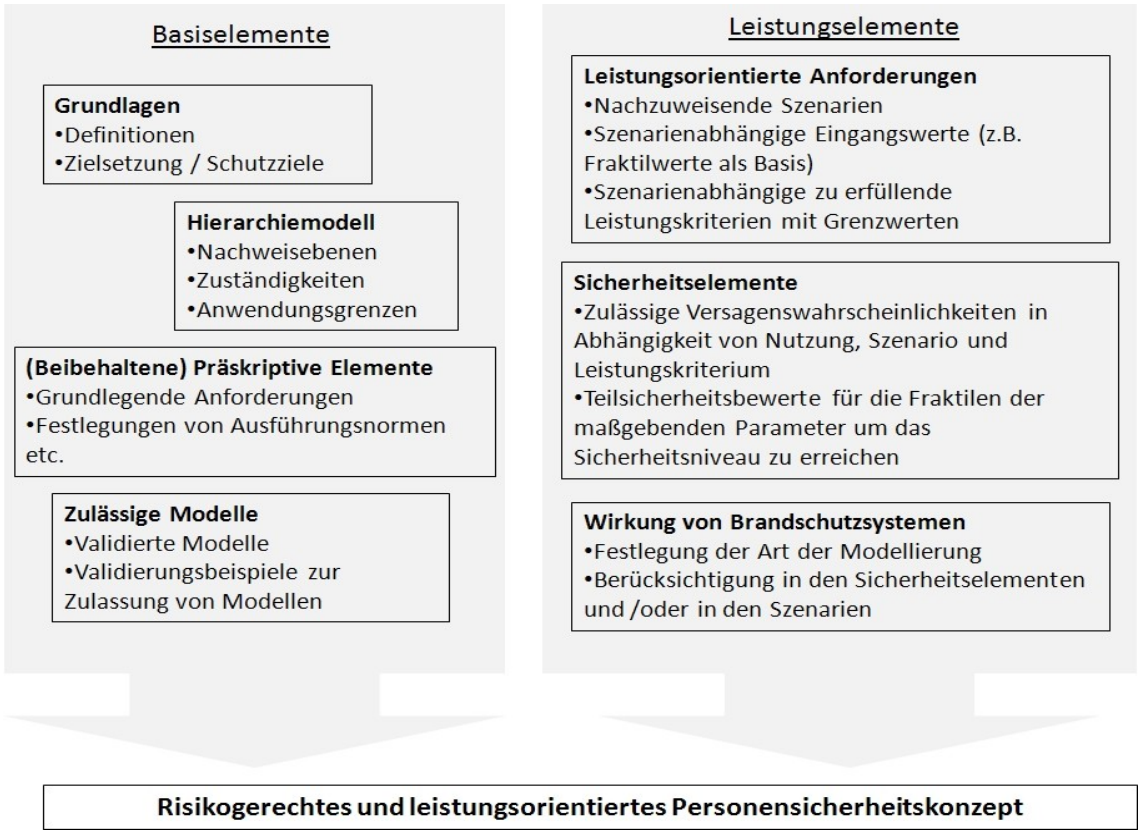


Bild 4 Elemente für ein risikogerechtes, leistungsorientiertes Personensicherheitskonzept im Rahmen einer Anwendungsnorm [34].

DANKSAGUNG

Diese Studie wurde mit Unterstützung eines Stipendiums im Rahmen des Post-Doc Programms des DAAD und einer Förderung durch den NIST-Grant #219810 ermöglicht.

Ich möchte mich recht herzlich beim Department of Fire Protection Engineering des Worcester Polytechnic Institute (WPI) und Prof. Meacham für die Gastfreundschaft bedanken.

LITERATUR

[1] Mehl, F.: Richtlinien für die Erstellung und Prüfung von Brandschutzkonzepten. In: Hosser, D. (Hrsg.): Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 178, 2004.

[2] BS 7974. Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice. British Standards Institution (BSI), 2001.

[3] Tubbs, J. S.; Mecham, B. J.: Egress Design Solutions – A Guide to Evacuation and Crowd Management Planning. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1. Auflage, 2007.

[4] Johnson, T.; Timms, G.: Performance-based Design of Shopping Center Fire Safety. In Proceedings of the First International ASIAFLAM Conference 1995, Hong-Kong, March 1995. InterScience Communications Ltd.

[5] Deakin, G.; Cooke, G.: Future Codes for Fire Safety Design. Fire Safety Journal, 23(2):193–218, 1994. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0379-7112(94)90026-4.

[6] Hosser, D. (Hrsg.): vfdb-Leitfaden Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht TB 04-01, 2. Auflage Mai 2009. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Altenberge, Braunschweig, 2009.

[7] Society of Fire Protection Engineers (SFPE). 8th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods – Proceedings & Case Studies. 2010.

[8] Babrauskas, Y.; Fleming, J. M.; Russell, D.: REST/ASET, a flawed concept for fire safety assessment. Fire and Materials, 34:341–355, 2010. doi: http://dx.doi.org/10.1002/fam. 1025.

[9] Metropolis, N.; Ulam, S.: The Monte Carlo method. Journal of the American Statistical Association, 44:335–341, 1949. doi: http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1949.10483310.

[10] Rubinstein, R. Y.: Simulation and the Monte Carlo Method. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 1981.

[11] Fishman, G. S.: Monte Carlo - Concepts, Algorithms and Applications. Springer-Verlag New York, Inc., NY, 1995.

[12] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.: Taschenbuch der Mathematik. Wissenschatflicher Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt/Main, 7. Auflage, 2008.

[13] Albrecht, C.; Hosser, D.: A Response Surface Methodology for Probabilistic Life Safety Analysis using Advanced Fire Engineering Tools. Fire Safety Science, 10:1059–1072, 2011. doi: http://dx.doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.10-1059.

[14] Bucher, C. G.; Bourgund, U.: A Fast and Efficient Response Surface Approach for Structural Reliability Analysis. Structural Safety, 7(1):57–66, 1990. doi: http://dx.doi.org/10.1016/ 0167-4730(90)90012-E.

[15] Lancaster, P.; Salkauskas, K.: Surfaces generated by moving least squares methods. Mathematics of Computation, 37(155):141–158, 1981. doi: http://dx.doi.org/10.1090/ S0025-5718-1981-0616367-1.

[16] Albrecht, C.: A risk-informed and performance-based life safety concept in case of fire. Dissertation Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), May 2012. URL http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00043585.

[17] Mell, P.; Grance, T.: The NIST Definition of Cloud Computing, Special Publication 800-145, National Institute for Standards and Technology, 2001.

[18] Magoules, F.; Pan, J.; Tan, K.-A.; Kumar, A.: Introduction to Grid Computing. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton, FL, 2009.

[19] Ian Foster. Designing and Building Parallel Programs: Concepts and Tools for Parallel Software Engineering. Addison Wesley, 1995.

[20] Heskestad, G.: Engineering Relations for Fire Plumes. Fire Safety Journal, 7(1):25–32, 1984. doi: http://dx.doi.org/10.1016/0379-7112(84)90005-5.

[21] Brein, D.; Hegger, T.: Innenraumluftqualität im Brandfall. Bauphysik, 27(4):234–240, 2005. doi: http://dx.doi.org/ 10.1002/bapi.200590058.

[22] Mitler, H.: Input Data for Fire Modeling. In 13th Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, 1996. Auch online, URL http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire97/PDF/f97128.pdf.

[23] Madrzykowski, D.: Impact of a Residential Sprinkler on the Heat Release Rate of a Christmas Tree Fire, NISTIR 7506. Technischer Bericht, Department of Homeland Security, Washington, DC, 2008.

[24] Peacock, R.; Portier, R.; Reneke, R.: FastDATA 1.0, NIST Standard Reference Database Number 75, Online Preview Release, 1999. Auch online, URL http://fire.nist.gov/fastdata/.

[25] Albrecht, C.; Hosser, D.: Probabilistic CFD and Evacuation Simulation for Fire Life Safety Assessment. In Proceedings of the first FEMTC (Fire and Evacuation Modeling Technical Conference), Baltimore, MD, USA, August 2011. Auch online, URL http://www.thunder headeng.com/2011/08/d1-14-albrecht/

[26] Jin, T.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke, volume 1, chapter 2-6, pages 2–42–2– 53. National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA, 3rd Edition, 2002.

[27] Purser., D. A.: Toxicity Assessment of Combustion Products, chapter 2-6, pages 2–83–2–171. National Fire Protection Association (NFPA), 3rd Edition, 2002.

[28] Purser, D. A.: Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat, chapter 2-6, pages 2–96–2–193. National Fire Protection Association (NFPA), 4th Edition, 2008.

[29] Speitel, L. C.: Fractional effective dose model for post-crash aircraft survivability. Toxicology, 115:167–177, 1996. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0300-483X(96)03505-6.

[30] Forell, B.: Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten – Nachweis nach vfdb-Leitfaden. In Tagungsband der 56. Jahresfachtagung der vfdb. Leipzig, 2007.

[31] Siemon, M.; Albrecht, C.; Hosser, D.: Considerations for the development of a quantitative life safety design concept using performance based fire engineering methods. In Proceedings of the 9th SFPE International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, 2012.

[32] DIN EN 1991-1-2/NA. National Annex - Nationally determined parameters – Eurocode 1 - Actions on structures – Part 1-2/NA: General actions - Actions on structures exposed to fire. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.

[33] DIN EN 1990. Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, German Edition. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2002.

[34] Hosser, D.; Weilert, A.; Klinzmann, C.; Schnetgöke, R; Albrecht, C.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben “Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung)”. Technischer Bericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), TU Braunschweig, November 2008.

[35] Albrecht, C.: ‘Grundlagen und Sicherheitskonzept für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall’. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 214, ISBN 978-3-89288-198-8, 2011.

[36] Hosser, D.; Siemon, M.: Fortschreibung des vfdb-Leifadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3, 2013.

SITZUNG 2

NORMEN, RICHTLINIEN, VERORDNUNGEN

Sitzungsleitung: G. Hoppe, Berlin

GEÄNDERTE ANFORDERUNGEN AN DEN RAUCHABZUG BEI VERKAUFSSTÄTTEN, VERSAMMLUNGSSTÄTTEN UND INDUSTRIEBAUTEN

Jost Rübel
Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr NRW, Düsseldorf

EINLEITUNG

Einleitend ist zum Thema Rauchableitung aus Gebäuden anzumerken, dass in Deutschland durchschnittlich 400 - 500 Tote pro Jahr in Folge von Bränden zu verzeichnen sind. Dabei sind die Brandtoten nicht etwa in Industriegebäuden, Versammlungsstätten, Verkaufsstätten, Hochhäusern, Büro- und Verwaltungsgebäuden zu beklagen, sondern hauptsächlich in Wohngebäuden oder Gebäuden mit wohnähnlicher Nutzung. Mangels einer nationalen Brandstatistik kann diese Aussage durch internationale Untersuchungen belegt werden, z. B. durch eine aktuelle Untersuchung aus Schweden. Insgesamt gab es in den Jahren 1999 – 2007 ca. 830 Todesfälle in Gebäuden in Folge von Bränden, davon 806 bei Bränden im Wohnumfeld (ca. 97 %) und 24 bei Bränden in sonstigen Gebäuden [1]. Hinzu kommt, dass Deutschland im internationalen Vergleich mit die wenigsten Brandtoten zu beklagen hat, sodass sich das in den Bauvorschriften enthaltene Sicherheitsniveau im Grundsatz bewährt hat. Aber auch bei nach aktuellen Bauvorschriften errichteten Gebäuden verbleibt ein gewisses Restrisiko, eine hundertprozentige Sicherheit können die Bauvorschriften nicht garantieren. Dies ist sowohl bei der Aufstellung von Brandschutznachweisen als auch bei deren Prüfung zu berücksichtigen.

RÜCKBLICK

War der Anwendungsbereich der DIN 18232-2 1989 noch ausschließlich auf Industriebauten beschränkt, wurde er mit der Änderung der DIN 18232-2 in 2003 auf alle Sonderbauten ausgeweitet. Darüber hinaus wurde die DIN 18232-2 in 2003 auch inhaltlich überarbeitet. Es wurde ein neues Bemessungsverfahren für raucharme Schichten und die Bildung von Rauchabschnitten mit einer Größe von maximal 1600 m² (mit Varianten bis zu 2600 m²) durch Rauchschürzen eingeführt. Bereits in der Schlichtungsverhandlung zu dieser Normfassung hatte die ARGEBAU (Arbeitsgemeinschaft der Bauministerkonferenz der Länder) angeregt, Regelungen für unterschiedliche Nutzungen bzw. unterschiedliche Anforderungen an raucharme Schichten in die Norm aufzunehmen. Dieser Anregung wurde aber nicht gefolgt.

Die Industrieverbände hatten gegenüber der Fachkommission Bauaufsicht, dem für Bauordnungsrecht zuständigen Gremium der ARGEBAU, schon sehr bald massive Kritik geübt, da insbesondere die Forderung nach Rauchabschnittsbildung durch Rauchschürzen bei Industriebauten zu erheblichen Problemen in

den Betriebsabläufen führte. Die Fachkommission hat sich deshalb bei der Überarbeitung der DIN 18232-2 in 2006 dafür eingesetzt, dass in der DIN eine erleichternde Regelung für Industriebauten eingeführt werden solle.

Die Anregung wurde in der Entwurfsfassung aufgegriffen. Im informativen Anhang D wurde eine Bemessungsregel für das Schutzziel „Unterstützung des Löschangriffs durch die Feuerwehr“ aufgenommen:

„Ist in großen Räumen der Nachweis raucharmer Schichten weder für Flucht oder Rettung, noch aus Sachschutzgründen erforderlich, jedoch eine Rauchverdünnung notwendig, um z. B. der Feuerwehr einen Löschangriff zu ermöglichen, kann auf die Bildung von Rauchabschnitten nach Festlegungen dieser Norm verzichtet werden.

Dabei sollten die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen mindestens stets ergriffen werden:

a) Die Rauch- und Wärmeabzugsgeräte sollten gleichmäßig verteilt eingebaut werden. Dies ist sichergestellt, wenn alle 200 m² der Raumgrundfläche mindestens ein Rauchabzugsgerät vorgesehen wird.

b) Die aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche je Rauchabzugsgerät sollte mindestens 1,0 m² A_w betragen.

c) Es sollte mindestens eine Auslösegruppe je 1 600 m² Raumfläche vorgesehen werden.

d) Zuluftflächen für den Raum sollten mindestens die gleiche Größe aufweisen, wie für die für 1600 m² Raumgrundfläche nach dieser Norm vorgesehenen Rauchabzugsflächen erforderlich wären.“

Der Normenausschuss hat den Anhang D aber letztendlich wieder verworfen, sodass es nach wie vor keine allgemein anerkannte Regel der Technik gibt, in der eine Bemessung von Rauchabzugsanlagen für unterschiedliche Schutzziele möglich wäre.

AUFTRAG DER FACHKOMMISSION BAUAUFSICHT

Die Fachkommission Bauaufsicht hatte deshalb die ihr unterstellte Projektgruppe Brandschutz in 2007 beauftragt, alle Mustervorschriften in Hinblick auf die Schutzziele sowie die Anforderungen an die Rauchableitung aus Gebäuden zu untersuchen. Dies führte zunächst zu dem in 2008 gemeinsam von der Fachkommission Bauaufsicht und den Arbeitskreisen „Grundsatzfragen“ und „Vorbeugender Brandschutz“ der Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren (AGBF) veröffentlichten Beitrag „Grundsätze zur Auslegung des § 14 MBO“. Danach dienen die in der MBO und in den Muster-Vorschriften enthaltenen Anforderungen an die Rauchableitung im Grundsatz der Unterstützung wirksamer Löscharbeiten der Feuerwehr (Entdeckung des Brandherdes) und grund-

sätzlich nicht der Rettung von Personen. Raucharme Schichten zur Sicherung der Evakuierung von Personen werden in aller Regel nur dann erforderlich, wenn in Einzelfällen von bauordnungsrechtlichen Anforderungen nicht nur unwesentlich abgewichen wird.

Die Fachkommission Bauaufsicht hatte weiterhin beschlossen, dass die Mustervorschriften der ARGEBAU in Hinblick auf die Anforderungen an die Rauchableitung zur Klarstellung der Schutzziele und Konkretisierung der Anforderungen überarbeitet werden sollen. Ziel ist es, für Standard-Bauvorhaben (auch im Anwendungsbereich von Sonderbauvorschriften) vereinfachte Nachweisverfahren ohne Zugrundelegung technischer Regeln oder Methoden des Brandschutzingenieurwesens zu ermöglichen. Dies setzt den Verzicht auf die Forderung nach raucharmen Schichten in bauordnungsrechtlichen Vorschriften voraus, da die Bemessung raucharmer Schichten durch allgemein anerkannte Regeln der Technik geregelt ist.

Da bei dem Schutzziel „Unterstützung wirksamer Löscharbeiten“ keine Differenzierungen in Hinblick auf die Nutzung der Gebäude erforderlich sind, werden die Anforderungen in der MVStättV, der MVkV und der MIndBauRL zukünftig nahezu identisch sein. Die Anforderungen an die Rauchableitung aus Hallen in Schulen, über die Rettungswege geführt werden, wurden bereits mit der Novellierung der MSchulBauR in 2009 verändert.

Anfang 2013 hat die Fachkommission Bauaufsicht eine öffentliche Anhörung zu den Änderungsentwürfen der MVStättV, MVkV und MIndBauRL durchgeführt. Im Folgenden möchte ich über das Ergebnis der Beratung der Projektgruppe Brandschutz über die in der Anhörung eingegangenen schriftlichen Stellungnahmen zur MIndBauRL und MVStättV berichten. Zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Beitrages hat eine Beratung über die eingegangenen Stellungnahmen der MVkV noch nicht stattgefunden.

ÖFFENTLICHE ANHÖRUNG

Zunächst möchte ich auszugsweise die Vorbemerkungen der Fachkommission Bauaufsicht zur Neuregelung der Vorschriften über die Rauchableitung im Rahmen der öffentlichen Anhörung zitieren [2]:

„1. Im Regelfall dienen bauordnungsrechtlich geforderte Maßnahmen zur Rauchableitung der Unterstützung der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr; Maßnahmen zur Rauchableitung in Bezug auf die Sicherung der Personenflucht bedarf es insoweit nicht, als die sonstigen baulichen Vorgaben nach Bauordnungsrecht (Ausgangsbreiten, Weglängen, Baustoff-/Bauteilanforderungen, Bildung von brandschutztechnisch getrennten baulichen Abschnitten und anderes mehr) eingehalten sind.

2. Die nach 1. geforderten Maßnahmen zur Rauchableitung sollen unmittelbar aus den bauordnungsrechtlichen Regelwerken entnommen werden können; die

Bestimmungen der MVStättV, der MVkV und der MIndBauRL sind entsprechend geändert worden.

3 Die vorliegenden Anforderungen an die Rauchableitung sind auf andere Schutzziele nicht ausgerichtet.

Zur Absicherung des Schutzziels – Unterstützung der Brandbekämpfung – ist grundsätzlich von Folgendem auszugehen:

a) Die Gebäudenutzer haben bei typischen Brandfällen den Brandraum/Gefahrenbereich auf den entsprechend dem Brandschutzkonzept der Bauordnung oder ergänzender bauordnungsrechtlicher Vorschriften vorgeschriebenen Rettungswegen verlassen.

b) Unter Beachtung physikalischer Modelle (Energie- und Massebilanzmodell) einschließlich physikalisch-strömungsmechanischer Modelle – wie sie beispielsweise auch der Normenreihe DIN 18232 zu Grunde liegen, hier wegen des geforderten Schutzziels jedoch mit modifizierten Randbedingungen – wäre z. B. bei einer natürlich wirkenden Rauchableitung rechnerisch eine aerodynamisch wirksame Rauchabzugsfläche A_W von 4 bis 5 m² in Zuordnung zu der Fläche des Raumes von A = 1600 m² ausreichend. Dabei wird ein Brandverlauf bis zum Ende der Entstehungsphase als Bemessungsszenario mit einer Energiefreisetzung von 2 MW über einen Zeitraum von einer Stunde betrachtet. Der öffentlichen Feuerwehr wird zudem eine gewisse Verrauchung des Raumes, z. B. durch örtliche Verwirbelung, zugemutet.

c) Bei großen Räumen mit natürlich wirkender Rauchableitung ist allerdings dem Umstand Rechnung zu tragen, dass Rauchgase nicht über größere Entfernungen innerhalb der Räume „verschleppt“ werden; insofern wird als Vorgabe eine möglichst gleichmäßige Verteilung von Rauchabzugsgeräten in diesen Räumen und die Bildung von Auslösegruppen verlangt. Daraus ergibt sich für große Räume eine Anordnung von mindestens 1 m² A_W bezogen auf jeweils höchstens 400 m² der Fläche A und die Zusammenfassung von Rauchabzugsgeräten zu Auslösegruppen für je 1600 m² der Fläche A. Die Größe der Rauchabschnitte ergibt sich aus der Raum- bzw. zulässigen Brandabschnittsgröße.“

Da das Schutzziel – Unterstützung der Brandbekämpfung der Feuerwehr – in allen Sonderbauvorschriften identisch ist, konnten die Bemessungsregeln für Rauchabzugsanlagen sowie für Rauchableitungsöffnungen in der MVStättV, MVkV und MIndBauRL vereinheitlicht werden. Es handelt sich hierbei jeweils um einen Regelbeispielkatalog, der auch andere Lösungen zulässt. Dies wird durch die Formulierung “…*die Anforderungen sind <u>insbesondere</u> erfüllt bei*…..“ deutlich.

Die Regelungen, die der öffentlichen Anhörung zu Grunde lagen, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Räume bis 200 m² (gilt nicht für Industriebauten):
  - Fenster nach § 47 Abs. 2 MBO.
- Räume (nach MVStättV jetzt auch Magazine und Lagerräume, nach MVkV jetzt auch sonstige Aufenthaltsräume und Lagerräume) mit einer Fläche von mehr als 200 m² bis 1000 m² (bei Industriebauten bis 1600 m²):
  - An der obersten Stelle unmittelbar ins Freie führende Öffnungen zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von insgesamt 1 v. H. der Grundfläche
  - in den Außenwänden Öffnungen, Türen oder Fenster mit einem freien Querschnitt von insgesamt 2 v. H. der Grundfläche und wenn die Öffnungen, Türen oder Fenster im oberen Drittel der Außenwand angeordnet sind;
  - Zuluftflächen müssen in insgesamt gleicher Größe im unteren Raumdrittel vorhanden sein,
- In Räumen mit einer Fläche von mehr als 1000 m² (bzw. 1600 m² bei Industriebauten):
  - Je höchstens 400 m² ein Rauchabzugsgerät mit mindestens 1,5 m² aerodynamisch wirksame Fläche A_W im oberen Raumdrittel.
  - Je 1600 m² Grundfläche des Raumes Bildung von Auslösegruppen für die Rauchabzugsgeräte.
  - Zuluftflächen im unteren Raumdrittel von insgesamt mindestens 12 m² freiem Querschnitt.
- Alternative mit maschinellen Rauchabzugsanlagen:
  - Je 400 m² Grundfläche der Räume ein Rauchabzugsgerät oder eine Absaugstelle mit einem Luftvolumenstrom von 10.000 m³/h.
  - Bei einer Grundfläche über 1600 m² genügt je weitere 400 m² Grundfläche ein Luftvolumenstrom von 5000 m³/h.
  - Die Zuluftflächen müssen im unteren Raumdrittel in solcher Größe angeordnet werden, dass eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 3 m/s nicht überschritten wird
- Räume mit Sprinkleranlagen:
  - Vorhandene Lüftungsanlagen werden im Brandfall automatisch bei Auslösen der Sprinkleranlage so betrieben, dass sie nur entlüften und ein mindestens 6-facher Luftwechsel gewährleistet ist, soweit es die Zweckbestimmung der Absperrvorrichtungen gegen Brandübertragung zulässt (Variante Industriebau: Luftvolumenstrom einer maschinellen Rauchabzugsanlage statt 6-facher Luftwechsel).
- Fenster, Türen, mit Abschlüssen versehene Öffnungen zur Rauchableitung und Rauchabzugsgeräte müssen Vorrichtungen zum Öffnen haben, die von jederzeit zugänglichen Stellen im Raum aus leicht von Hand bedient werden

können; sie können im Raum auch an einer jederzeit zugänglichen Stelle zusammengeführt werden.

- Rauchabzugsanlagen müssen automatisch auslösen und von Hand von einer jederzeit zugänglichen Stelle ausgelöst werden können.
- Maschinelle Rauchabzugsanlagen sind für eine Betriebszeit von 30 Minuten bei einer Rauchgastemperatur von 300°C auszulegen. Maschinelle Lüftungsanlagen können als maschinelle Rauchabzugsanlagen betrieben werden, wenn sie die an diese gestellten Anforderungen erfüllen.
- Die Zuluftflächen müssen leicht geöffnet werden können.

Hinweisen möchte ich an dieser Stelle auf eine neue Regelung im Entwurf der MIndBauRL, die eine Vergrößerung der Brandabschnittsfläche bzw. Brandbekämpfungsabschnittsfläche unter Berücksichtigung erhöhter Anforderungen an die Rauchabzugsanlage vorsieht. Hier darf künftig in der Sicherheitskategorie 2 (also in Verbindung mit Brandmeldeanlagen) bei erdgeschossigen Gebäuden die Fläche um 10 % vergrößert werden:

„Die zulässige Größe darf um 10 % überschritten werden, wenn in dem Brandabschnitt die Produktions- und Lagerräume Rauchabzugsanlagen haben, bei denen

- *je höchstens 200 m² der Grundfläche mindestens ein Rauchabzugsgeräte*
- *je höchstens 1600 m² Grundfläche mindestens eine Auslösegruppe für die Rauchabzugsgeräte gebildet wird,*
- *Zuluftflächen mit einem freien Querschnitt von mindestens 36 m² im unteren Raumdrittel vorhanden sind sowie …*
- *die Anforderungen der Nrn. 5.7.4.3 und 5.7.4.4 erfüllt sind.“*

ERGEBNIS DER ÖFFENTLICHEN ANHÖRUNG

Im Rahmen der Anhörung zur MVStättV, MVkV und MIndBauRL sind über 100, zum Teil umfangreiche Stellungnahmen eingegangen. Die Projektgruppe Brandschutz hat über die Stellungnahmen zur MVStättV, die Projektgruppe MIndBauRL über die Stellungnahmen zur MIndBauRL beraten. Die Beratung über die MVkV steht noch aus. Im Hinblick auf die Rauchableitung werden aber nur noch die Anforderungen an Ladenstraßen zu beraten sein, im Übrigen werden die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse zur MVStättV auch für die MVkV und die MIndBauRL gelten.

Zunächst gab es eine Vielzahl von Stellungnahmen, in denen die raucharme Schicht von 2,50 m (wieder) gefordert wird, z. T. verbunden mit dem Schutzziel der Eigenrettung von Personen. Diese Forderung steht dem Anlass der Überarbeitung entgegen [4] und wurde deshalb nicht weiterverfolgt.

Zu § 16 MVStättV:

Im Entwurf zu § 16 Abs. 1 MVStättV wurde die Pflicht zur Entrauchung auf alle Versammlungs- und Aufenthaltsräumen (bisher erst ab 200 m²) erweitert sowie auf Magazine und Lagerräume mit mehr als 200 m² und Szenenflächen ausgedehnt. Hierzu gab es eine Vielzahl von Stellungnahmen, denen diese Vorschläge zu weit gingen. Unter Betrachtung des Schutzziels lässt sich eine Rücknahme der erweiterten Anforderungen aber nicht rechtfertigen. Allerdings wird eine Entrauchung von Versammlungsräumen und sonstigen Aufenthaltsräumen erst gefordert, wenn die Räume mehr als jeweils 50 m² Grundfläche haben. Der Feuerwehr ist ein Löschangriff von der Eingangstür aus zuzumuten, ohne dass es einer gesonderten Rauchableitung bedarf.

Auch Szenenflächen sollen erst ab einer Grundfläche von mehr als 200 m² entraucht werden, da kleinere Szeneflächen in der Regel innerhalb eines Raumes liegen, für den ohnehin eine Rauchableitung vorgesehen ist. Erst größere Szenenflächen bedürfen der separaten Entrauchung, sie werden hinsichtlich der Entrauchung nunmehr wie Bühnen behandelt (freier Querschnitt von insgesamt mindestens 3 v.H. ihrer Grundfläche).

Natürliche Entrauchung:

Bei der Regelung über die Entrauchung von Versammlungsräumen, sonstigen Aufenthaltsräumen, Magazinen und Lagerräumen mit nicht mehr als 1000 m² Grundfläche wurde bei der Anforderung über die Zuluftflächen ergänzt (…in insgesamt gleicher Größe…), dass sie einen freien Querschnitt von nicht mehr als 12 m² haben müssen, da ansonsten die Zuluftflächen für den Nachweis über Außenwände (2 %) unverhältnismäßig groß wären (bis zu 20 m²).

Die Anforderungen an notwendige Treppenräume wurden in einen eigenen Absatz überführt, bleiben im Wesentlichen aber unverändert. Auf die Angabe einer Mindestgröße der Zuluftflächen bei Treppenräumen ohne Fenster nach § 35 Abs. 8 Satz 2 Nr. 1 MBO kann verzichtet werden, weil die Mindestbreite des Ausgangs ins Freie bei Versammlungsstätten 0,90 m oder mehr betragen muss (Zuluftfläche ≥ 1,8 m²).

Im Übrigen bleiben die Anforderungen an die natürliche Entrauchung unverändert.

Maschinelle Entrauchung:

Eine große Gruppe von Einwendern schlägt vor, die Räume ab 200 m² hinsichtlich der Rauchableitung pauschal und gleich zu behandeln. Es wurde deshalb vorgeschlagen, dass Räume ab 200 m² Rauchabzugsanlagen erhalten sollen, die Rauch generell mit einem Volumenstrom von 40.000 m³/h maschinell ableiten. Die Größe der Räume spiele keine Rolle, ebenso sei keine Unterteilung in Rauchabschnitte notwendig.

Dem sicherlich interessanten Vorschlag konnten sich die Projektgruppen nicht anschließen, weil es von den Projektgruppen insbesondere erwünscht ist, dass die Anforderungen an die Rauchableitung abgestuft erfolgen sollen, also auch für kleinere Räume verhältnismäßig sind bzw. an dem System der „vereinfachten“ Rauchableitung über Öffnungen für kleine Räume festgehalten werden soll. Bei Räumen mit mehr als 1600 m² ergibt sich ohnehin ein Volumenstrom von 40.000 m³/h. Auch vertreten die Projektgruppen die Auffassung, dass eine Vorgabe zur Verteilung der Rauchabzugsgeräte bzw. der Absaugstellen (1 je 400 m² mit 10.000 m³/h) bei maschinellen Rauchanzugsanlagen sinnvoll ist.

Ebenfalls soll es bei der Anforderung bleiben, dass bei Räumen mit mehr als 1600 m² ein zusätzlicher Volumenstrom von 5000 m³/h je weitere 400 m² Grundfläche erforderlich werden. Der Entwurf wurde dahingehend ergänzt, dass die zusätzlichen Volumenströme gleichmäßig auf die Geräte oder Stellen zu verteilen sind. Auch hier ist eine Alternative ohne zusätzlichen Volumenstrom bei Räumen > 1600 m² denkbar, wenn Steuerungen ein gezielten Ableiten über dem Brandherd ermöglichen.

Gefolgt wurde der Anregung, dass die Auslegung der maschinellen Rauchabzugsanlage mit einer Rauchgastemperatur von 600°C zu erfolgen hat, soweit die Luftvolumenströme der Anlage kleiner als 40.000 m³/h sind.

Räume mit Sprinkleranlagen:

Hier gab es in den Entwürfen zur Anhörung der MIndBauRL einerseits und zur MVStättV und MVkV andererseits den einzigen Unterschied im Hinblick auf die Anforderung an die Lüftungsanlage. Die in der geltenden MVkV und MIndBauRL bereits enthaltene Regelung wurde zunächst auch für Versammlungsstätten übernommen. Darüber hinaus wurden Luftvolumenströme festgelegt, mit denen Lüftungsanlagen bei Auslösen der Sprinkleranlage betrieben werden müssen, soweit es die Zweckbestimmung der Absperrvorrichtungen gegen Brandübertragung zulässt.

Für Versammlungs- und Verkaufsstätten sollte ein mindestens 6-facher Luftwechsel gewährleistet sein, für Industriebauten soll die Lüftungsanlage mindestens den gleichen Luftvolumenstrom wie bei einer maschinellen Rauchabzugsanlage erreichen. Eine quantifizierbare Entrauchung ist mit diesen Vorgaben jedoch nicht verbunden.

Aufgrund der Anregungen in der Anhörung sollen nunmehr auch für Versammlungs- und Verkaufsstätten die Luftvolumenströme der Lüftungsanlage der Leistung der maschinellen Rauchabzugsanlage entsprechen. Damit ist die Anforderung auch an Lüftungsanlagen in gesprinklerten Räumen in allen Mustervorschriften identisch. Zusätzlich wurde ergänzt, dass bei Gebäuden mit Brandmeldeanlagen die Auslösung der Lüftungsanlage nicht über die Sprinkleranlage, sondern über die Brandmeldeanlage erfolgen muss.

Bei der Beratung der Einwendungen wurde dem Vorschlag gefolgt, an den manuellen Bedienungs- und Auslösestellen auch Auslösegruppen anzugeben, weil damit die Arbeit der Feuerwehr erleichtert wird. Das Hinweisschild mit der Bezeichnung „RAUCHABZUG“ soll deshalb neben der Angabe des jeweiligen Raumes bei natürlichen Rauchabzugsanlagen auch mit Angaben zu den Auslösegruppen versehen werden.

Zu Sonderregelung der MIndBauRL:

Die gerade vorgestellten Änderungen zur MVStättV wurden auch in den Entwurf der MIndBauRL übernommen.

Der Entwurf der MIndBauRL enthält darüber hinaus in Nr. 5.7.2.2 eine Sonderregelung für Industriebauten mit Ebenen. Bei der Beratung wurde festgestellt, dass es für die wirksame Zuluftführung in Nr. 5.7.2.2 aus darunter liegenden Ebenen zwingend einer Festlegung anrechenbarer Öffnungsflächen für die Überströmöffnungen aus darunter liegenden Ebenen wie in Nr. 5.7.2.1 bedarf. Es sollen deshalb nur Öffnungen in Ebenen mit einem freien Querschnitt von mindestens 1 m² angerechnet werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit den neuen Regelungen zur Rauchableitung wird ein Regelbeispielkatalog geschaffen, der alternative Lösungsmöglichkeiten eröffnet, um das Schutzziel (Unterstützung der Brandbekämpfung) zu erfüllen, ohne dass es einer formalen Abweichungsentscheidung (§ 67 MBO) bedarf. Beispielhaft sei hier auf die Anwendung der Normenreihe DIN 18232 „Rauch- und Wärmefreihaltung“ verwiesen.

Bei alternativen Lösungen sind mindestens eine Energiefreisetzungsrate von 2 MW über einen Zeitraum von einer Stunde und eine öffentliche Feuerwehr als Eingangsparameter zu berücksichtigen. Alternative Lösungen sind mit den erforderlichen Unterlagen im aufzustellenden Brandschutznachweis (§ 11 Abs. 2 MBauVorlV) darzustellen bzw. zu erläutern.

Es bedarf allerdings einer Abweichungsentscheidung nach § 67 MBO, wenn von den vorgegebenen Eingangsparametern abgewichen werden soll, z. B. weil eine geringere Energiefreisetzungsrate in Ansatz gebracht wird. Damit verbunden ist auch eine dauerhafte Beschränkung der Nutzungsmöglichkeiten, z. B. auf bestimmte Brandlasten.

Der Regelbeispielkatalog stellt auf den in den Sonderbauvorschriften geregelten Standardfall ab und behandelt ausschließlich das Schutzziel Unterstützung der Brandbekämpfung der Feuerwehr. Die vorliegenden Anforderungen an die Rauchableitung sind somit auf andere Schutzziele nicht ausgerichtet. Bei Abweichungen von den Sonderbauvorschriften muss folglich geprüft werden, ob weitere Schutzziele zu beachten sind. Sollen Rauchabzugsanlagen auch dem

Personenschutz dienen, reichen die in den Sonderbauvorschriften festgelegten Regeln zur Rauchableitung nicht aus. Hier bedarf es weitergehender Nachweise, z. B. nach den hierzu zur Verfügung stehenden allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Die Beratung der Muster-Vorschriften in der Fachkommission Bauaufsicht ist für Dezember 2013 vorgesehen. Im Anschluss daran müssen die Vorschriften notifiziert (3 – 6 Monate) werden. Erst dann können die überarbeiteten Mustervorschriften veröffentlicht und anschließend von den Ländern umgesetzt werden.

LITERATUR

[1] Hans Jochen Blätte und Dr. Peter Wagner, vfdb-Zeitschrift – Forschung, Technik und Management im Brandschutz, Heft 2/2013.

[2] Fachkommission Bauaufsicht, Anhörung zum Entwurf der Änderung

[3] der MVStättV, MVkV und der MIndBauRL, Anlage 1: Vorbemerkungen zur Neuregelung der Rauchableitung.

[4] Grundsätze zur Auslegung des § 14 MBO der Fachkommission Bauaufsicht (ARGRBAU), abgestimmt mit dem AK Grundsatzfragen und dem AK VB/G der AGBF (16./17.10. 2008).

UMGANG MIT NATURBRANDNACHWEISEN NACH EUROCODE IM BAUAUFSICHTLICHEN VERFAHREN

Klaus-Dieter Wathling
Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin

EINLEITUNG

Zum 1. Juli 2012 sind in den Bundesländern die europäischen Bemessungsnormen – Eurocodes – als Technische Baubestimmungen eingeführt worden, die bei der Bemessung der Standsicherheit tragender und aussteifender Bauteile zu beachten sind, auch für den Brandfall. Die Festlegungen der baustoffbezogenen Eurocode-Brandschutzteile ersetzen weitgehend die Bemessungsregeln für tragende Bauteile nach DIN 4102-4 bzw. DIN 4102-22. Nach der bauaufsichtlichen Einführung der Eurocode-Brandschutzteile stehen für die Bemessung von tragenden und aussteifenden Bauteilen und Tragwerken bei einer Brandeinwirkung rechnerische Nachweisverfahren zur Verfügung. Mit der letzten Änderung der Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen können diese Nachweise nun auch auf der Basis von Naturbrandmodellen erstellt werden.

EUROCODE-BRANDSCHUTZTEILE

Folgende Eurocode-Brandschutzteile – jeweils mit einem zugeordneten Nationalen Anhang – sind als Technische Baubestimmungen bauaufsichtlich eingeführt, und zwar die technischen Regeln zu den Brandeinwirkungen auf Tragwerke

- DIN EN 1991-1-2 und DIN EN 1991-1-2/NA

und die baustoffbezogenen Bemessungsregeln in ihren konsolidierten, d. h. fehlerbereinigten Ausgaben Dezember 2010 (sofern nicht anders angegeben):

- DIN EN 1992-1-2 und DIN EN 1992-1-2/NA für Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
- DIN EN 1993-1-2 und DIN EN 1993-1-2/NA für Stahlbauten
- DIN EN 1994-1-2 und DIN EN 19924-1-2/NA für Verbundtragwerke aus Stahl und Beton
- DIN EN 1995-1-2 und DIN EN 1995-1-2/NA für Holzbauten
- DIN EN 1999-1-2 und DIN EN 1999-1-2/NA Ausgabe April 2011 für Aluminiumtragwerke

Für die Bemessung von Mauerwerk stehen die Eurocodes noch nicht vollständig zur Verfügung; eine Brandschutzbemessung von Mauerwerksbauteilen nach europäischen Regelungen ist daher zurzeit noch nicht möglich.

Die Festlegungen der als Technische Baubestimmungen eingeführten baustoffbezogenen Eurocode-Brandschutzteile ersetzen somit die Bemessungsregeln für tragende Bauteile nach DIN 4102-4 Ausgabe März 1994 bzw. DIN 4102-22 Ausgabe November 2004.

In den Nationalen Anhängen werden nur zu den Regelungen der Eurocode-Brandschutzteile die für Deutschland maßgebenden Festlegungen getroffen, die in der Norm selbst für nationale Festlegungen vorgesehen sind. Bauaufsichtliche Anwendungsfestlegungen können jedoch nicht Inhalt der Nationalen Anhänge sein und werden daher als Anlagen in der Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen formuliert. Werden mit diesen Anlagen die technischen Regeln geändert oder ergänzt, gehören auch diese Änderungen oder Ergänzungen zum Inhalt der Technischen Baubestimmungen.

MUSTER-LISTE DER TECHNISCHEN BAUBESTIMMUNGEN

Als Technische Baubestimmungen werden gemäß § 3 Absatz 3 der Musterbauordnung – MBO [1] die bauaufsichtlich zu beachtenden technischen Regeln für die Planung, Bemessung und Konstruktion baulicher Anlagen und ihrer Teile durch öffentliche Bekanntmachung eingeführt, die zur Erfüllung der Grundanforderungen des Bauordnungsrechts unerlässlich sind. Neben diesem Kernbestand technischer Regeln kann aber auch auf nicht eingeführte technische Regeln zurück gegriffen werden, sofern es sich dabei um allgemein anerkannte Regeln der Technik handelt. Technische Baubestimmungen sind allgemein verbindlich, da sie nach den Landesbauordnungen beachtet werden müssen. Die Einführung der Technischen Baubestimmungen geschieht in den 16 Bundesländern auf der Grundlage einer Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen, die von der Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz erarbeitet und zurzeit zweimal jährlich fortgeschrieben wird. Aktuell liegt die Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen Teil I – Fassung September 2012 – (M-LTB 09/2012) vor [2]. Das Inhaltsverzeichnis und einen Ausschnitt des Abschnitts 1 der M-LTB 09/2012 zeigt Bild 1.

Der Brandfall wird nach den europäischen Bemessungsnormen als Einwirkung aufgefasst. Aus diesem Grund wird in Abschnitt 1 der M-LTB der Eurocodeteil zu den Brandeinwirkungen zusammen mit dem Nationalen Anhang und einer Anlage als Technische Baubestimmung eingeführt.

Nach Abschnitt 3 der DIN EN 1991-1-2 können die Brandeinwirkungen für die Bemessung tragender und aussteifender Bauteile nach nominellen Temperaturzeitkurven oder Naturbrandmodellen ermittelt werden. DIN EN 1991-1-2/NA legt fest, dass für die zu erbringenden brandschutztechnischen Nachweise bei Tragwerken im Hochbau in der Regel die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) anzuwenden ist.

Teil I: Technische Regeln für die Planung, Bemessung und Konstruktion baulicher Anlagen und ihrer Teile

Inhalt

1 Technische Regeln zu Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen
2 Technische Regeln zur Bemessung und zur Ausführung
2.1 Grundbau
2.2 Mauerwerksbau
2.3 Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau
2.4 Metall- und Verbundbau
2.5 Holzbau
2.6 Bauteile
2.7 Sonderkonstruktionen
3 Technische Regeln zum Brandschutz
4 Technische Regeln zum Wärme- und zum Schallschutz
4.1 Wärmeschutz
4.2 Schallschutz
5 Technische Regeln zum Bautenschutz
5.1 Schutz gegen seismische Einwirkungen
5.2 Holzschutz
6 Technische Regeln zum Gesundheitsschutz
7 Technische Regeln als Planungsgrundlagen

1 Technische Regeln zu Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen

Kenn./ Lfd. Nr.	Bezeichnung	Titel	Ausgabe	Bezugsquelle/ Fundstelle
1	2	3	4	5
1.1	DIN EN 1990 Anlage 1.1/1	Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung	Dezember 2010	*)
	-/NA	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung	Dezember 2010	*)
1.2	DIN EN 1991	Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke		
	-1-1	-, Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau	Dezember 2010	*)
	-1-1/NA	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau	Dezember 2010	*)
	-1-2	- Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke	Dezember 2010	*)
	-1-2/NA Anlage 1.2/1	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke	Dezember 2010	*)

Bild 1 Auszug Abschnitt 1 der M-LTB 09/2012

Naturbrandnachweise, d. h. Nachweise auf der Basis von Naturbrandmodellen, mit denen im Vergleich zur ETK ein realistischer Brandverlauf mit Brandentwicklungsphase, Vollbrand- und Abkühlungsphase abgebildet werden kann und die insbesondere in großen Räumen zu einer realistischeren Erfassung von Temperaturzeitverläufen führen, sollen nur im Zusammenhang mit einem schutzzielbezogenen ganzheitlichen Brandschutzkonzept erstellt werden. Hierbei muss allerdings die umfängliche Anlage 1.2/1 der M-LTB 09/2012 beachtet werden, mit der die Bemessung aufgrund leistungsabhängiger Festlegungen möglich gemacht wird und damit die Anwendung der Naturbrandmodelle, d. h. vereinfachter oder allgemeiner Brandmodelle nach den Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 der DIN EN 1992-1-2 für einen „realen Brand“. Vereinfachte Naturbrandmodelle sind Näherungsverfahren, mit denen der Temperaturzeitverlauf eines natürlichen Brandes in Abhängigkeit der wesentlichen physikalischen Eingangsgrößen berechnet werden kann. Bei den allgemeinen Naturbrand-

modellen handelt es sich um die für Brand- und Rauchgassimulationen angewandten Zonen- und Feldmodelle, bei denen ein Bemessungsbrand in Abhängigkeit der Randbedingungen physikalisch beschrieben wird.

Die Bemessung tragender Bauteile im Brandfall erfolgt mit den baustoffbezogenen Eurocode-Brandschutzteilen, die in den Abschnitten 2.3 bis 2.5 der M-LTB 09/2012 aufgeführt sind; einen Auszug zeigt Bild 2. Im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsvorhaben [3] konnte durch umfangreiche Vergleichsrechnungen nachgewiesen werden, dass das bisherige deutsche Sicherheitsniveau bei der Bemessung der Standsicherheit tragender Bauteile im Brandfall unter Beachtung der DIN 4102-4 auch bei Anwendung der Eurocode-Brandschutzteile zusammen mit den Nationalen Anhängen gewahrt bleibt, weitere Erläuterungen und Anwendungsbeispiele zu den Eurocode-Brandschutzteilen finden sich in [4].

2.4 Metall- und Verbundbau

2.4.1	DIN EN 1993	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten		
	-1-1 Anlagen 2.3/4 und 2.4/1 E	- Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau	Dezember 2010	*)
	-1-1/NA	Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau	Dezember 2010	*)
	-1-2 Anlage 2.3/5	- Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall	Dezember 2010	*)
	-1-2/NA	Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall	Dezember 2010	*)

Bild 2 Auszug Abschnitt 2.4 der M-LTB 09/2012

Die Anwendung tabellarischer Daten (Nachweisverfahren der Stufe 1) ist nur für Bauteile aus Stahlbeton und für Verbundbauteile aus Stahl und Beton möglich. Die Tabellen entsprechen im Wesentlichen denen der DIN 4102-4. In den Tabellen nach Abschnitt 5 der DIN EN 1992-1-2. werden die tragenden Bauteile den Feuerwiderstandsklassen R 30 bis R 240 bzw. für Decken den Klassen REI 30 bis REI 240 nach DIN EN 13501-2 Ausgabe Februar 2010 zugeordnet, nach Abschnitt 4.1 der DIN EN 1994-1-2 nur den Klassen R 30 bis R 180. Das Klassifizierungskriterium „R“ steht für Tragfähigkeit im Brandfall, „EI“ für Raumabschluss und Wärmedämmung. Grundlage der Tabellen in den beiden Eurocode-Brandschutzteilen ist die Brandbeanspruchung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK). Da es für die Bemessung dieser feuerwiderstandsfähigen Bauteile als Technische Baubestimmungen bekannt gemachte technische Regeln gibt, handelt es bei diesen Bauteilen um geregelte Bauarten im Sinne des § 21 Abs. 1 MBO. Bei den dort nicht aufgeführten Bauteilen handelt es sich um nicht geregelte Bauarten; für nicht geregelte Bauarten können die dann erforderlichen bauaufsichtlichen Verwendbarkeits-nachweise (allgemeine

bauaufsichtliche Zulassungen, allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse oder auch Zustimmungen im Einzelfall für einzelne Bauvorhaben) Angaben zur Feuerwiderstandsfähigkeit enthalten.

Die baustoffbezogenen Eurocode-Brandschutzteile bieten auch die Möglichkeit der Anwendung rechnerischer Verfahren zum Nachweis der Standsicherheit im Brandfall. Es werden vereinfachte Bemessungsverfahren (Nachweisverfahren der Stufe 2) und allgemeine Bemessungsverfahren (Nachweisverfahren der Stufe 3) zur Verfügung gestellt, die in die Statik-Rechenprogramme integriert werden können. Die Vorteile allgemeiner Bemessungsverfahren ergeben sich insbesondere im Zusammenhang mit der Anwendung von Naturbrandmodellen; allgemeinen Bemessungsverfahren kann aber auch die ETK-Brandbeanspruchung zugrunde liegen. Mit Naturbrandnachweisen kann gezeigt werden, dass die bauaufsichtliche Grundanforderung „Gewährleistung einer ausreichend langen Standsicherheit im Brandfall“ – als leistungsorientierte Anforderung – erfüllt wird. Die verschiedenen Möglichkeiten des Nachweises zeigt Bild 3.

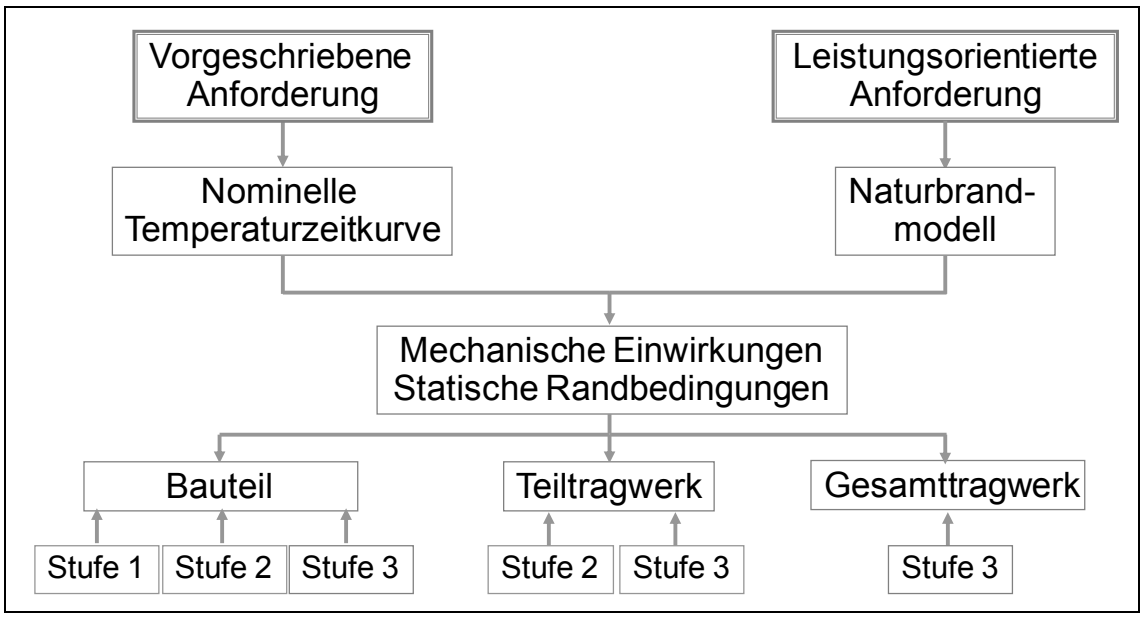
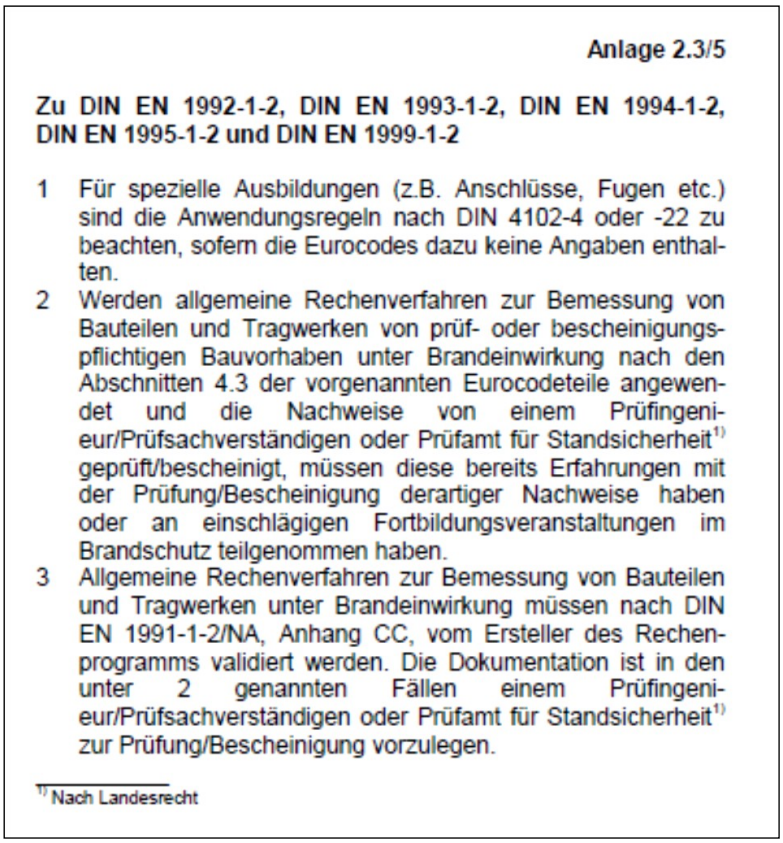


Bild 3 Möglichkeiten des Nachweises nach [5]

Zu den vorgeschriebenen Anforderungen gehören die bauordnungsrechtlichen Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen, auf die im nachfolgenden Abschnitt eingegangen wird.

Bei der Anwendung aller baustoffbezogenen Eurocode-Brandschutzteile muss die Anlage 2.3/5 der M-LTB 09/2012 beachtet werden, die insbesondere Festlegungen bei der Anwendung allgemeiner Rechenverfahren (Nachweisverfahren der Stufe 3) enthält (Bild 4).



Anlage 2.3/5

Zu DIN EN 1992-1-2, DIN EN 1993-1-2, DIN EN 1994-1-2, DIN EN 1995-1-2 und DIN EN 1999-1-2

1 Für spezielle Ausbildungen (z.B. Anschlüsse, Fugen etc.) sind die Anwendungsregeln nach DIN 4102-4 oder -22 zu beachten, sofern die Eurocodes dazu keine Angaben enthalten.

2 Werden allgemeine Rechenverfahren zur Bemessung von Bauteilen und Tragwerken von prüf- oder bescheinigungspflichtigen Bauvorhaben unter Brandeinwirkung nach den Abschnitten 4.3 der vorgenannten Eurocodeteile angewendet und die Nachweise von einem Prüfingenieur/Prüfsachverständigen oder Prüfamt für Standsicherheit[1)] geprüft/bescheinigt, müssen diese bereits Erfahrungen mit der Prüfung/Bescheinigung derartiger Nachweise haben oder an einschlägigen Fortbildungsveranstaltungen im Brandschutz teilgenommen haben.

3 Allgemeine Rechenverfahren zur Bemessung von Bauteilen und Tragwerken unter Brandeinwirkung müssen nach DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang CC, vom Ersteller des Rechenprogramms validiert werden. Die Dokumentation ist in den unter 2 genannten Fällen einem Prüfingenieur/Prüfsachverständigen oder Prüfamt für Standsicherheit[1)] zur Prüfung/Bescheinigung vorzulegen.

[1)] Nach Landesrecht

Bild 4 Anlage 2.3/5 der M-LTB

ANWENDUNG VON NATURBRANDNACHWEISEN

Nach Abschnitt 3.3 der DIN EN 1991-1-2 können die Brandeinwirkungen für die Bemessung tragender und aussteifender Bauteile nach Naturbrandmodellen ermittelt werden. Die bauaufsichtliche Anwendung dieses Abschnitts wird mit der Neufassung der Anlage 1.2/1 der M-LTB 09/2012 geregelt. Danach muss bei Anwendung von Naturbrandnachweisen grundsätzlich das Folgende beachtet werden:

- Bauteilbemessungen auf der Grundlage von Naturbrandmodellen stellen auf die jeweilige konkrete Nutzung und Ausgestaltung eines Raums oder Gebäudes unter Berücksichtigung der vorhandenen brandschutztechnischen Infrastruktur ab. Da eine solche Bauteilbemessung das auf Feuerwiderstandsklassen ausgerichtete globale bauaufsichtliche Anforderungssystem nicht vollständig abdeckt, bedarf die Wahl der Brandeinwirkung nach einem Naturbrandmodell sowie die Bemessung des Feuerwiderstands für diese Brandeinwirkung der Zulassung einer bauordnungsrechtlichen Abweichung nach § 67 Abs. 1 MBO; sie kann auch im Rahmen des § 51 MBO für Sonderbauten zugelassen werden. Dieses bauaufsichtliche System stellt für das Standardgebäude oder den über Sonderbauvorschriften „geregelten“ Sonderbau Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile –

feuerhemmend, hochfeuerhemmend bzw. feuerbeständig – und ist auf Feuerwiderstandsklassen ausgerichtet. Dabei erfolgt die Beurteilung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen auf der Grundlage von Brandprüfungen nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK). Dies führt zu Einstufungen in Feuerwiderstandsklassen, die gemäß Bauregelliste A Teil 1, Anlagen 0.1.1 und 0.1.2 [6] den bauaufsichtlichen Anforderungen zugeordnet werden, und zwar zu den deutschen Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102-2:1977-09 (Bild 5) und zu den europäischen Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2:2010-02 (Bild 6).

Anlage 0.1.1 (2004/1)

Die in DIN 4102-2:1977-09, Abschnitt 8.8.2, Tabelle 2 angegebenen Bezeichnungen entsprechen folgenden Anforderungen in bauaufsichtlichen Verwendungsvorschriften:

Tabelle 1

Bauaufsichtliche Anforderungen	Klassen nach DIN 4102-2	Kurzbezeichnung nach DIN 4102-2
feuerhemmend	Feuerwiderstandsklasse F 30	F 30 - B1)
feuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 30 und aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 30 - A1)
hochfeuerhemmend	Feuerwiderstandsklasse F 60 und in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 60 - AB2)
	Feuerwiderstandsklasse F 60 und aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 60 - A2)
feuerbeständig	Feuerwiderstandsklasse F 90 und in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 90 - AB3) 4)
feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerwiderstandsklasse F 90 und aus nichtbrennbaren Baustoffen	F 90 - A3) 4)

[1] bei nichttragenden Außenwänden auch W 30 zulässig
[2] bei nichttragenden Außenwänden auch W 60 zulässig
[3] bei nichttragenden Außenwänden auch W 90 zulässig
[4] nach bestimmten bauaufsichtlichen Verwendungsvorschriften einiger Länder auch F 120 gefordert

Bild 5 Anlage 0.1.1 der Bauregelliste A Teil 1

- Im Rahmen der vom Bauherrn zu beantragenden bauordnungsrechtlichen Abweichung nach § 67 MBO kann die Bauaufsichtsbehörde Abweichungen von gesetzlichen Anforderungen – wie den Anforderung an die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen – zulassen, wenn sie unter Berücksichtigung des Zwecks der jeweiligen Anforderung und unter Würdigung der öffentlich-rechtlich geschützten nachbarlichen Belange mit den öffentlichen Belangen, insbesondere den Grundanforderungen des Bauordnungsrechts gemäß § 3 Absatz 1 MBO vereinbar sind. Einer Zulassung einer Abweichung bedarf es nach der Regelung des § 67 MBO allerdings dann nicht, wenn der Standsicherheitsnachweis durch einen Prüfsachverständigen bescheinigt wird; der Prüfsachverständige beurteilt im Rahmen der Prüfung des Standsicherheitsnachweises, ob von den Anforderungen abgewichen werden kann.

Anlage 0.1.2 (2012/2)

Die nach DIN EN 13501-2 und DIN EN 13501-3 und DIN EN 13501-4 klassifizierten Eigenschaften zum Feuerwiderstandsverhalten entsprechen folgenden Anforderungen in bauaufsichtlichen Verwendungsvorschriften:

Tabelle 1: Feuerwiderstandsklassen von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 und ihre Zuordnung zu den bauaufsichtlichen Anforderungen

Bauaufsichtliche Anforderung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände	Doppelböden	Selbständige Unterdecken
	ohne Raumabschluss[1]	mit Raumabschluss[1]				
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) und EI 30-ef (i←o)	REI 30	EI 30(a↔b)
hochfeuerhemmend	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) und EI 60-ef (i←o)		EI 60(a↔b)
feuerbeständig	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) und EI 90-ef (i←o)		EI 90(a↔b)
Feuerwiderstands-fähigkeit 120 Min.	R 120	REI 120	--	–		–
Brandwand	--	REI 90-M	EI 90-M	–		–

[1] Für die mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Stahlbauteile ist die Angabe IncSlow gemäß DIN EN 13501-2 zusätzlich erforderlich.

Bild 6 Anlage 0.1.2 der Bauregelliste A Teil 1

- Nach § 51 MBO können an Sonderbauten im Einzelfall zur Verwirklichung der allgemeinen Anforderungen nach § 3 Absatz 1 MBO besondere Anforderungen gestellt werden. Es können aber auch Erleichterungen gestattet werden, soweit es der Einhaltung von Vorschriften wegen der besonderen Art oder Nutzung baulicher Anlagen oder Räume oder wegen besonderer Anforderungen nicht bedarf.
- Im Nachweis des Brandschutzes gemäß § 11 Absatz 1 der Muster-Bauvorlagenverordnung – MBauVorlV [7] (Brandschutznachweis) muss angegeben werden, weshalb es einer ETK-Brandbeanspruchung nicht bedarf. Es muss dargestellt und begründet werden, dass das gewählte Brandmodell für das Vorhaben geeignet ist und wie die damit zwangsläufig verbundene eingeschränkte Nutzung des Vorhabens (z. B. aufgrund begrenzter Brandlasten) sichergestellt werden soll. Die zulässige Art der Nutzung des Bauvorhabens (z. B. als Bürogebäude) wird durch die gewählten und durch die Baugenehmigung festgelegten Eingangsparameter für die Ermittlung der Brandbeanspruchung (raumbezogen) konkretisiert und begrenzt. Es sind daher bereits im Brandschutznachweis geeignete Maßnahmen festzulegen, die die Einhaltung dieser Nutzungsbeschränkung sicherstellen. Dazu kommen insbesondere die Bestellung eines Brandschutzbeauftragten (als Betriebsvorschrift) für die diesbezügliche Überwachung des laufenden Betriebs sowie eine Überprüfung der Brandlastannahmen innerhalb des ersten Jahres nach Aufnahme der Nutzung und wiederkehrende Überprüfungen (z. B. in Abständen von 3 bis 5 Jahren) durch einen Prüfingenieur/Prüfsachverständigen für Brandschutz in Betracht. Nutzungsbeschränkungen und die zu ihrer Einhaltung vorgesehenen Maßnahmen sind durch entsprechende Nebenbestimmungen in der Baugenehmigung aufzunehmen, die auch den Hinweis

enthalten sollte, dass Änderungen des genehmigten Nutzungskonzepts, die zu einer höheren Brandbeanspruchung führen, eine Überprüfung der Standsicherheit und gegebenenfalls die Beantragung und Erteilung einer neuen Baugenehmigung erforderlich machen.

- Für den Nachweis der Standsicherheit gemäß § 10 Absatz 1 der MBauVorlV (Standsicherheitsnachweis) sind zusätzlich die für die Beurteilung der Brandeinwirkungen erforderlichen Unterlagen, insbesondere für die Ermittlung der thermischen Einwirkungen und die bemessungsrelevanten Brandszenarien einschließlich der entsprechenden Bemessungsbrände vorzulegen. Diese Unterlagen müssen vollständig, nachvollziehbar und prüfbar sein; die thermischen Einwirkungen sind raumbezogen zu ermitteln und zu dokumentieren.
- Im Brandschutznachweis muss im Übrigen auch dargestellt werden, wie die nach Naturbrandmodellen bemessenen Bauteile des Tragwerks mit den erforderlichen (klassifizierten) raumabschließenden Bauteilen (wie Brand- und Trennwände, Decken, Wände notwendiger Treppenräume und Flure) zu einem geeigneten Brandschutzkonzept zusammengeführt werden sollen. Dazu gehören auch Aussagen zu den Anschlüssen brandschutztechnisch unterschiedlich bemessener Bauteile. Die Anforderungen der MBO, der Muster-Sonderbauverordnungen und Muster-Richtlinien an raumabschließende Bauteile (feuerhemmend, hochfeuerhemmend, feuerbeständig) müssen berücksichtigt werden. Bauteile, deren Raumabschluss mit deutschen F-Klassen klassifiziert ist, können der DIN 4102-4 entnommen werden oder aber den bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweisen. Liegen für Bauteile, wie Betonfertigteile, harmonisierte europäische Bauproduktnormen vor, finden sich Angaben zum europäisch klassifizierten Raumabschluss (Kriterium E nach DIN EN 13501-2) in der CE-Kennzeichnung.

Anlage 1.2/1 der M-LTB 09/2012 enthält unter Punkt 6 außerdem notwendige inhaltlichen Korrekturen und Ergänzungen des Anhangs BB „Eingangsdaten für die Anwendung von Naturbrandmodellen“ der DIN EN 1991-1-2/NA in Form bauaufsichtlicher Mindestvorgaben für einige der zu wählenden Eingangsparameter. Bei dem Anhang BB handelt es sich um ein übergreifendes Sicherheitskonzept für die Bemessung von Bauteilen und Tragwerken unter Brandeinwirkung von Bauwerken unterschiedlichster Bauweisen und Nutzungen, das das Zusammenwirken der baulichen, anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen in einem Gesamtsystem und den Ausfall einzelner Maßnahmen berücksichtigt. Damit können künftig allgemeine Bemessungsverfahren regelmäßig für den Nachweis der Standsicherheit im Brandfall insbesondere bei Sonderbauten angewendet werden. Bereits heute sind brandschutztechnische Bemessungen auf der Grundlage von Naturbrandszenarien bei großen Sonderbauten oder Gebäuden besonderer Bauart, beispielsweise bei Atrien üblich, allerdings ohne dass diesen bisher ein allgemein verbindliches Sicherheitskonzept zugrunde lag, das durch Sicherheitszuschläge für die angesetzten Brandlasten, die Wärmefreisetzungsrate und die anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen ein quantifizierbares Sicherheitsniveau gewährleistet [8]. Für die

Anwendung des Anhangs BB werden folgende Hinweise und Einschränkungen gegeben:

- Mit Abschnitt 6.1 wird ein Schreibfehler in Gleichung BB.1 korrigiert.
- Abschnitt 6.2 legt den pauschalen Wert für die Verbrennungseffektivität als konservativen Ansatz fest. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass die Brandlastdichten für die einer Gebäudeart typischen Raumnutzungen (und nicht des gesamten Gebäudes) nach Tabelle BB.1 nicht unterschritten werden dürfen. Somit sind Einzelerhebungen nur in Sonderfällen zulässig. Zudem ist als konservativer Ansatz für Bibliotheksräume der Wert der flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrate nach Tabelle BB.2 mit 0,5 MW/m² anzusetzen.
- Abschnitt 6.3 regelt den Ansatz der maximalen Wärmefreisetzungsrate, so dass auch für große Räume ein lokaler Brand als Bemessungsbrand zu wählen ist. Die Entwicklungsphase 1 nach Bild BB.1 ist grundsätzlich so zu wählen, dass die maximale Wärmefreisetzungsrate Q_{max} nach spätestens 10 Minuten erreicht wird. Damit soll den Bedenken Rechnung getragen werden, dass bei dem Bemessungsbrand insbesondere für große Räume ein sehr spätes Erreichen der Vollbrandphase eintritt.
- Abschnitt 6.4 legt fest, dass der jeweils ungünstige Wert der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes nach Tabelle BB.3 in Ansatz zu bringen ist, für die öffentliche Feuerwehr grundsätzlich der Wert 0,5 nach Tabelle BB.4.
- Nach Abschnitt 6.5 sind grundsätzlich die Werte der Tabelle BB.5 für „mittlere“ Schadensfolgen anzusetzen, für Bürogebäude mit mehr als 400 m² großen Nutzungseinheiten und für Sonderbauten, bei denen die Auswirkungen des Versagens eines Tragwerks zu schweren Folgen für Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen führen können, die jeweiligen Tabellenwerte für „hohe“ Schadensfolgen.

Diese Festlegungen sind vor dem Hintergrund der großen Varianz der Parameter des Anhangs BB getroffen worden. Damit wird dem Prüfingenieur/Prüfsachverständigen (siehe nachfolgender Abschnitt) für die Beurteilung der Brandeinwirkungen ein auf der „sicheren Seite“ liegender Beurteilungsrahmen gegeben, von dem aber in begründeten Einzelfällen gemäß § 3 Absatz 3 MBO abgewichen werden darf [9].

BAUAUFSICHTLICHE PRÜFUNG VON NATURBRANDNACHWEISEN

Nach Anlage 2.3/5 der M-LTB 09/2012 müssen Nachweise der Standsicherheit von Bauteilen und Tragwerken unter Brandeinwirkung auf der Grundlage allgemeine Bemessungsverfahren (Nachweisverfahren der Stufe 3) von einem dafür qualifizierten Prüfingenieur/Prüfsachverständigen für Standsicherheit überprüft werden, der sich mindestens in der Prüfung/Bescheinigung derartiger Nachweise fortgebildet haben muss. Dies gilt unabhängig davon, ob als Brandeinwir-

kung eine nominelle Temperaturzeitkurve oder ein Naturbrandmodell Anwendung findet. Aufgrund dieser Notwendigkeit wird die MBauVorlV in Anlage 2 „Kriterienkatalog nach § 14 Absatz 3“ um die Kriterien „Keine Anwendung allgemeiner Bemessungsverfahren zum Nachweis der Standsicherheit unter Brandeinwirkung“ und „Keine Anwendung von Naturbrandmodellen für die Brandeinwirkung“ ergänzt werden. Denn bei Einhaltung dieses Kriterienkatalogs ist nach den Regelungen des § 66 Absatz 3 MBO die Prüfung des Standsicherheitsnachweises bei Gebäuden der Gebäudeklassen 1 bis 3 nicht erforderlich. Mit der Ergänzung des Kriterienkatalogs wird künftig auf Verordnungsebene festgelegt, dass bei Anwendung von Nachweisverfahren der Stufe 3 und von Naturbrandnachweisen jeder Standsicherheitsnachweis – einschließlich des Bestandteils Nachweis der Standsicherheit im Brandfall – dem „4-Augen-Prinzip“ unterworfen wird; die entsprechende Festlegung in Anlage 2.3/5 der M-LTB 09/2012 kann dann entfallen. Der mit der Prüfung/Bescheinigung des Standsicherheitsnachweises nach § 66 Absatz 3 MBO beauftragte Prüfingenieur/Prüfsachverständige für Strandsicherheit muss entweder zugleich Prüfingenieur/Prüfsachverständiger für Brandschutz sein oder für die Beurteilung der Brandeinwirkungen einen mit derartigen Brandmodellen erfahrenen Prüfingenieur/Prüfsachverständigen für Brandschutz heranziehen. Im Rahmen der Beurteilung der Brandeinwirkung sind alle Eingangsparameter auf Vollständigkeit und Richtigkeit zu überprüfen; nur stichprobenartige oder Plausibilitätsprüfungen genügen nicht. Es müssen die in einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept betrachteten maßgeblichen Brandszenarien überprüft werden, ebenso der Ansatz der Ventilationsverhältnisse, d. h. ob eine niedrige Ventilation (brandlastgesteuerter Brand) oder eine große Ventilation (ventilationsgesteuerter Brand) maßgeblich wird.

FAZIT

Die Anwendung von Naturbrandmodellen als Brandeinwirkung für die Bemessung tragender und aussteifender Bauteile erfordert eine sehr sorgfältige Vorgehensweise; der Aufwand bei Naturbrandnachweisen ist deutlich höher als bei Annahme der ETK als maßgebliche Brandeinwirkung. Naturbrandnachweise sind anspruchsvoll und bedürfen vertiefter Kenntnisse der Aufsteller; sie müssen von qualifizierten Prüfingenieuren/Prüfsachverständigen für Standsicherheit bauaufsichtlich geprüft/bescheinigt werden. Deshalb werden mit der Anlage 1.2/1 der M-LTB 09/2012 Hinweise und Anwendungsfestlegungen für die Erstellung von Naturbrandnachweisen gegeben.

LITERATUR

[1] Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012 *)

[2] Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen – Fassung September 2012 *)

[3] veröffentlicht im Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, www.baufachinformation.de

[4] Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocode. Hosser, D. (Hrsg.): 2. Auflage. Beuth-Verlag, Berlin, 2013

[5] Hosser, D.: Gesamtkonzept der Brandschutzbemessung nach Eurocode und DIN 4102-4, Vortragsskript VPI/DIN-Seminar, Braunschweig, 23. März 2013

[6] Bauregelliste A Teil 1 - Ausgabe 2013/1, Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin *)

[7] Muster einer Verordnung über Bauvorlagen und bauaufsichtliche Anzeigen (Musterbauvorlagenverordnung) - MBauVorlV - Fassung Februar 2007 *)

[8] Zehfuß, J.: Brandschutzbemessung eines weitgespannten, mehrstöckigen Stahlfachwerk-Trägers für ein Verwaltungsgebäude. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger-Brandschutztage 2009, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 208, 2009

[9] Wathling, K.-D.: Bauaufsichtliche Behandlung von Abweichungen. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger-Brandschutztage 2008, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 202, 2008

*) veröffentlicht im Internet-Informationssystem der Bauministerkonferenz „is-argebau“, unter www.bauministerkonferenz.de

ERSTE ERFAHRUNGEN MIT DER RAUCHWARNMELDERPLICHT IN DEN LANDESBAUORDNUNGEN

Sebastian Festag
Hekatron GmbH, Sulzburg

EINLEITUNG

Die von Bränden ausgehenden Gefahren können sich schnell ausbreiten und zu erheblichen Schäden führen. Menschen sind den Gefahren von Bränden, vor allem in der Nacht aufgrund reduzierter Wahrnehmungsfähigkeiten, ohne geeignete Schutzmaßnahmen hilflos ausgeliefert. Rauchwarnmelder sind technische Geräte, die in Wohnungen und wohnungsähnlichen Bereichen zum Einsatz kommen und haben den Zweck Brände zu erkennen. Sie sollen Personen vor den Gefahren eines Brandes frühzeitig warnen und deren Selbstrettung in Gang setzen. Damit sollen vor allem Personenschäden in Form von Todesfällen verhindert werden, wobei in diesem Zuge auch die Fremdrettung durch die Feuerwehr erleichtert werden kann, was dann wiederum zu einer sinkenden Zahl der Verletzten sowie Sach- und Umweltschäden führt. Durch eine frühe Branderkennung wird im Brandfall wertvolle Zeit gewonnen.

Obwohl Rauchwarnmelder im Ernstfall über Leben und Tod entscheiden können, sind laut Forsa-Umfragen in der Vergangenheit in Deutschland nur 5-7 % der Wohnungen im Jahre 1999 und 31 % im Jahre 2006 mit Rauchwarnmeldern ausgestattet. Erst durch die Verankerung der Rauchwarnmelderpflicht in den Landesbauordnungen setzen sich Rauchwarnmelder in der Bevölkerung durch. Da der Brandschutz in Deutschland Ländersache ist, sind die Regelungen in den Bundesländern in Bezug auf eine Rauchwarnmelderpflicht, sowohl zeitlich, als auch zum Teil inhaltlich unterschiedlich geregelt. Zurzeit sind in 13 Bundesländern Rauchwarnmelder verpflichtend vorgeschrieben und in drei Bundesländern (Berlin, Brandenburg und Sachsen) nicht.

Während sich die Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern nahezu flächendeckend durchsetzt, werden Kritiken laut, die den Nutzen der Maßnahme in Frage stellen (vgl. [1], [2]). Im Rahmen der *Sulzburger Studie* [3] wurde der Frage nachgegangen, ob die Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern einen risikoreduzierenden Beitrag am Brandopfergeschehen leistet. Die ersten Arbeiten an der Studie erfolgten im Jahre 2011 und die Ergebnisse wurden im April 2013 veröffentlicht. Bevor die Studienergebnisse und neue erweiterte Ergebnisse im vorliegenden Beitrag vorgestellt werden, sollen ein paar Grundlagen über Rauchwarnmelder und der Situation in Deutschland zum besseren Verständnis erläutert werden.

RAUCHWARNMELDER – GRUNDLEGENDES

In Deutschland werden Rauchwarnmelder eingesetzt, die in der Regel auf dem Streulichtprinzip (vgl. [4], S. 32 f.) beruhen. Dabei wird die Lichtbrechung und -streuung durch im Brandrauch befindliche Partikel zur Erzeugung eines Alarms genutzt. Weniger verbreitet sind Rauchwarnmelder, die über eine elektrochemische Zelle gezielt Kohlenmonoxid erkennen können, welches vor allem bei unvollständigen Verbrennungen in der niedrigenergetischen Brandphase entsteht. In Zukunft spielt die Branderkennung durch Brandgassensoren, die einzelne Brandgase und Gemische erkennen, eine zunehmende Rolle und diese Entwicklung wird vermutlich im Laufe der Zeit auch einen Einfluss auf Rauchwarnmelder haben.

Rauchwarnmelder werden innerhalb von Wohnungen oder wohnungsähnlichen Bereichen und damit in Bauwerken bzw. Gebäuden eingesetzt. Sie unterliegen im europäischen Raum dem Mandat M/109 und entsprechen den Produktanforderungen der DIN EN 14604:2009-02 [5]. Hierbei handelt es sich um eine mit der im Juli 2013 in Kraft getretenen Bauproduktenverordnung (zuvor *Bauproduktenrichtlinie*) harmonisierten Norm. Sofern Rauchwarnmelder die Produktanforderungen nach DIN EN 14604 erfüllen und dies durch eine notifizierte Stelle nachgewiesen ist, können sie mit einem CE-Kennzeichen versehen und im europäischen Raum frei gehandelt werden.

Über die vfdb-RL 14-01 [6] werden in Deutschland zusätzliche und erhöhte Anforderungen an Rauchwarnmelder gestellt. Anforderungen, die hierzulande als wichtig erachtet wurden, aber sich im europäischen Raum nicht durchgesetzt haben und deshalb im europäischen Regelwerk nicht auftauchen. Beispielsweise geht aus der vfdb-RL 14-01 die Anforderung hervor, dass Rauchwarnmelder eine nicht entnehmbare Batterie mit einem Energievorrat für den Betrieb von 10 Jahren beinhalten müssen. Diese Forderung resultiert aus Erkenntnissen aus den USA (z. B. [7], S. 7 ff.), die zeigen, dass dort zwar 96 % der Wohnungen mit Rauchwarnmeldern ausgestattet sind, aber in 24 % der Brandfälle mit Brandtoten, die Melder nicht funktionsfähig waren. Es zeigte sich, dass dabei in 73 % der Fälle die Melder über eine fehlende, nicht angeschlossene, leere oder defekte Batterie verfügten. Studien aus England kommen zu einem ähnlichen Ergebnis (vgl. [8]). Sofern Rauchwarnmelder zusätzliche und erhöhte Produktanforderungen gemäß der vfdb-RL 14-01 erfüllen, darf der Melder zusätzlich das Qualitätskennzeichen „Q-Label“ in Verbindung mit dem Logo des Prüfinstituts tragen und signalisiert damit einen hohen Qualitätsstandard über die europäischen Produktanforderungen hinaus.

Werden Rauchwarnmelder über Funk miteinander verbunden, sollte die Funkkommunikation zusätzlich der VdS 3515:2007-06 [9] entsprechen, wobei diese in der prDIN EN 14604:2012-02 [10] mit den allgemeinen Produktanforderungen zusammenfließt und dann in Zukunft als eigenständige Richtlinie entfällt.

Neben den Produktanforderungen, die hier aufgrund ihres Umfangs im Detail nicht aufgeführt werden, unterliegen Rauchwarnmelder in Deutschland den

Anwendungsanforderungen gemäß der DIN 14676:2012-09 [11]. Diese Norm hat den Stand einer „anerkannten Regel der Technik“[1] und legt Mindestanforderungen für die Planung, den Einbau, den Betrieb und die Instandhaltung von Rauchwarnmeldern nach DIN EN 14604 in Wohnhäusern, Wohnungen und Räumen mit wohnungsähnlicher Nutzung fest. Aus der Anwendungsnorm geht unter anderem hervor, an welcher Stelle im Raum der Rauchwarnmelder zu installieren ist, wie Täuschungsgrößen vorgebeugt wird und in welchen Zeitabständen die Melder hinsichtlich ihrer Funktion überprüft werden. Sofern die Projektierung, Installation und Instandhaltung von Rauchwarnmeldern als Dienstleistung erbracht wird, verlangt die DIN 14676 einen Kompetenznachweis („Fachkraft für Rauchwarnmelder“), wodurch eine Mindestqualifikation des Dienstleisters gewährleistet werden soll.

Die Landesbauordnungen legen in den Bundesländern, in denen eine Rauchwarnmelderpflicht verankert ist, fest, dass Brände frühzeitig erkannt und gemeldet werden müssen. Dabei wird in den Landesbauordnungen zum Teil unterschiedlich festgelegt, wer für die Installation und den Betrieb der Rauchwarnmelder verantwortlich ist, in welchen Räumen die Rauchwarnmelder anzubringen sind und bis wann die Nachrüstpflicht erfolgt, welche vorschreibt, bis wann die Bestandsbauten mit Rauchwarnmelder auszustatten sind – während die Neubauten mit Inkrafttreten des entsprechenden Gesetzestextes mit Rauchwarnmeldern auszustatten sind.

WIRKSAMKEIT DER RAUCHWARNMELDERPFLICHT

Im Folgenden wird die *Sulzburger Studie* [3] vorgestellt. Die Studie befasst sich anhand der Brandopferzahlen von 1998 bis 2010 mit der risikologischen Effektivität der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern. Da seit der Veröffentlichung der Studie auch die Daten für das Jahr 2011 vorliegen, werden im vorliegenden Beitrag die Ergebnisse der *Sulzburger Studie* um diese Daten ergänzt und die Fragestellung der Effektivität auf die Nachrüstpflicht von Bestandsbauten erweitert. Das ausführliche Zahlenmaterial ist der Studie zu entnehmen.

Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern (erweiterte Sulzburger Studie)

In der Sicherheitswissenschaft ist es üblich, dass Risiken anhand des (möglichen) Schadens quantifiziert werden, sofern die Arten der Risiken das zulassen. Dementsprechend kann die Wirkung einer Maßnahme zur Vorsorge oder Kontrolle von Risiken, wie die Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern, am verhinderten – hier gemittelten – Schaden bemessen werden. Dabei ist zu beachten, dass der Schaden durch Brände hinsichtlich der Art und des Betrags sehr unterschiedlich ausfallen kann. Auf der einen Seite können sich Personenschäden ergeben, von Verhaltensänderungen und psychischen Beeinträchti-

[1] Unter *anerkannte Regeln der Technik* wird die Summe der in einem Fachgebiet anerkannten wissenschaftlichen, technischen und handwerklichen Erfahrungen, die durchweg bekannt sind und sich als richtig und brauchbar bewährt haben verstanden (vgl. [12], [13]).

gungen über körperliche Verletzungen bis hin zu Todesfällen. Auf der anderen Seite können Brände Sachschäden produzieren, mit volkwirtschaftlichen Verlusten in Milliardenhöhe und nur schwer zu beziffernden Verlusten von kulturellen und ideellen Werten, aber auch durch Umweltschäden sowie Betriebsausfall- und Imageschäden. Rauchwarnmelder sollen im Brandfall vor allem Personenschäden, insbesondere Todesfälle, verhindern. Aus diesem Grund und weil Bewertungsmaßstäbe anderer Schadensarten Gründe einer nicht hinreichenden Vergleichbarkeit liefern, bietet es sich an, zur Risikoquantifizierung und Berechnung der Effektivität der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern die Anzahl der Todesfälle durch Brände heranzuziehen. Diese Angaben sind in Deutschland der amtlichen Todesursachenstatistik [14] zu entnehmen. Dieser Statistik liegt eine amtliche Klassifikation der Krankheiten und Todesursachen zugrunde [15, 16]. Todesfälle durch Brände werden dort als Todesfälle durch die „Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flammen“ (X00-X09) bezeichnet. Diese Fälle sind eindeutig einem unfallartigen Brand zugeordnet. Alle Fälle, die nicht eindeutig einem unfallartigen Brand zugeordnet werden können, sind in diesen Angaben nicht enthalten. Das hat zur Folge, dass es sich bei den Angaben um Mindestwerte in Bezug auf die Brandopferzahlen handelt (vgl. [17], S. 10 ff.). Unberücksichtigt bleiben bei diesen Angaben nämlich Todesfälle durch Brände, wenn die Betroffenen nicht durch die Exposition gegenüber Rauch, Feuer und Flamme starben, z. B. wenn Einsatzkräfte zu einem Brand gerufen werden und bei einem Verkehrsunfall durch mechanische Einwirkungen ums Leben kommen. Diese Fälle werden zwar auch in der Todesursachenstatistik erfasst, allerdings können sie im Nachhinein nicht den Brandfolgen zugeordnet werden. Zudem liefert die Todesursachenstatistik Angaben über Todesfälle durch Brände, die nicht einer unfallartigen Natur entsprechen, wie z. B. Todesfälle durch „Vorsätzliche Selbstbeschädigung durch Rauch, Feuer und Flammen“ (X76) oder durch „Tätliche Angriffe mit Rauch, Feuer und Flammen“ (X97). Die Angaben zu solchen Fällen wurden in der Analyse ausgegrenzt, da sie nicht zu den unfallartigen Ereignissen zählen und Rauchwarnmelder in solchen Fällen i.d.R. keine risikoreduzierende Wirkung entfalten können.

Die hier zur Analyse der Effektivität der Rauchwarnmelderpflicht verwendeten Angaben über die Brandopfer wurden bereits zur Analyse von Brandschäden verwendet (vgl. [18], [19] und [20]). Es ist sinnvoll, die Anzahl der Todesfälle auf diejenigen Fälle zu beschränken, die in Wohnungen und im wohnungsähnlichen Bereich zustande kommen, da sie nur dann in den direkten Wirkungsbereich von Rauchwarnmeldern und der Rauchwarnmelderpflicht der Landesbauordnungen fallen. Diese Angaben werden ebenfalls von der Todesursachenstatistik erfasst. Sie werden als Todesfälle *durch die Exposition gegenüber nicht unter Kontrolle stehendem Feuer in Gebäuden oder Bauwerken* (zu Hause) dokumentiert.

Im Rahmen der *Sulzburger Studie* wurden die Brandopferzahlen vom Jahr 1998 bis 2010 analysiert, wobei ältere Daten existieren. Die letzte Umstellung des Klassifikationssystems erfolgte allerdings am 01.01.1998 [21]. Um Einflüsse der Änderung im Klassifikationssystem auf die Datenreihen auszuschließen, wurde

der Zeitraum vor dem Jahre 1998 aus der Analyse ausgeschlossen. Bei der Anfertigung der *Sulzburger Studie* lagen die letzten Daten für das Jahr 2010 vor, weshalb die Studie mit diesen Daten abschließt. Die Daten für das Jahr 2011 wurden für den vorliegenden Beitrag ergänzt.

Die Studie analysiert die Effektivität der Rauchwarnmelderpflicht unter risikologischen Gesichtspunkten. Aus diesem Grund wird das Schadensrisiko durch Brände (zu Hause) auf eine messbare Größe operationalisiert. Unter Risiko wird dabei vereinfacht das stochastische Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit (W) und Ausmaß (S) eines Schadens verstanden, siehe Gl. (1):

$$R = W \cdot S \tag{1}$$

Um quantifizierte Aussagen über Risiken durchführen zu können, ist es notwendig, die absoluten (Unfall-) Zahlen (hier der Todesursachenstatistik) in Wahrscheinlichkeiten umzurechnen. Dabei wird unter Wahrscheinlichkeit der *Grenzwert der relativen Häufigkeit* verstanden [22], welcher das Verhältnis zwischen der Anzahl der beobachteten Fälle n_A und der Grundgesamtheit (n) darstellt, Gl. (2) und (3):

$$W = \lim (n \rightarrow \infty)\ n_A / n \tag{2}$$

mit

$$n = n_A + n_B \tag{3}$$

Als Grundgesamtheit bietet sich im vorliegenden Zusammenhang die Anzahl der Einwohner der Bundesrepublik Deutschland bzw. der jeweiligen Bundesländer auf der Basis der Daten des statistischen Bundesamtes an, wobei es üblich ist, die Werte auf 100.000 Einwohner zu beziehen.

In Bild 1 und 2 sind die durchschnittlichen Brandopferzahlen (mit den gemittelten Jahreswerten von 1998 bis 2011) und die durchschnittlichen Einwohnerzahlen (ebenfalls von 1998 bis 2011 gemittelt) je Bundesland zu erkennen. Zwischen der Einwohneranzahl und der Brandopferanzahl je Bundesland existiert ein signifikanter (α = 5 %) Zusammenhang, mit einem Korrelationskoeffizient von 0,959. Der Korrelationskoeffizient zwischen den Brandopfern (zu Hause) und den Einwohnerzahlen beträgt 0,771 und ist geringer, aber ebenfalls signifikant.

Mit der Einwohnerzahl und Brandopferzahl (zu Hause) lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Todesfalls durch Brände ermitteln. Die zweite Risikokenngröße ist das Schadensaumaß, hier Todesfälle.

Um die risikologische Effektivität der Rauchwarnmelderpflicht zu überprüfen, wird für die einzelnen Bundesländer das Brandopferrisiko in den Zeiträumen vor und nach der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern miteinander vergli-

chen. Die Bundesländer ohne eine Rauchwarnmelderpflicht werden als Kontrollgruppe zum Vergleich herangezogen.

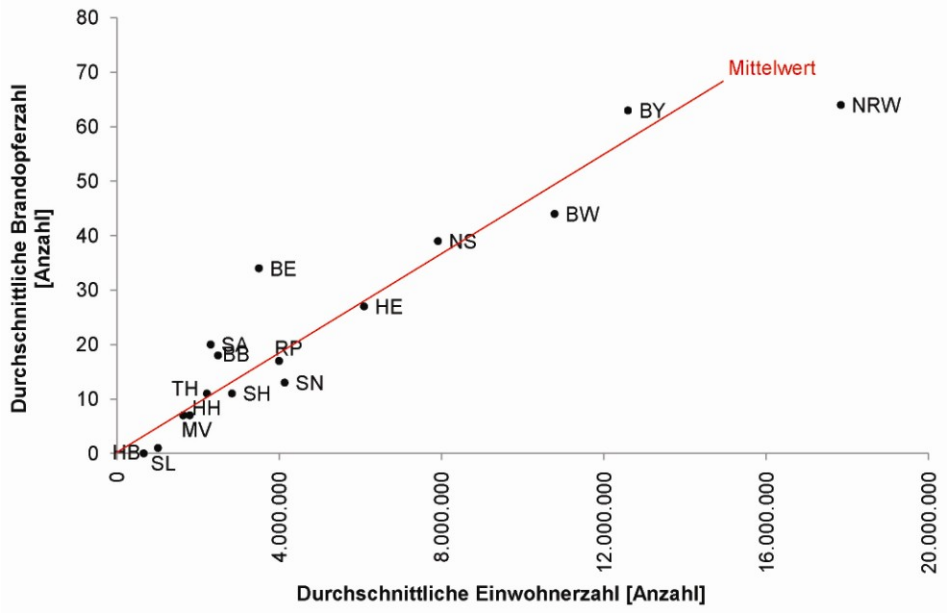


Bild 1 Brandopferanzahl je Bundesland (1998-2011)

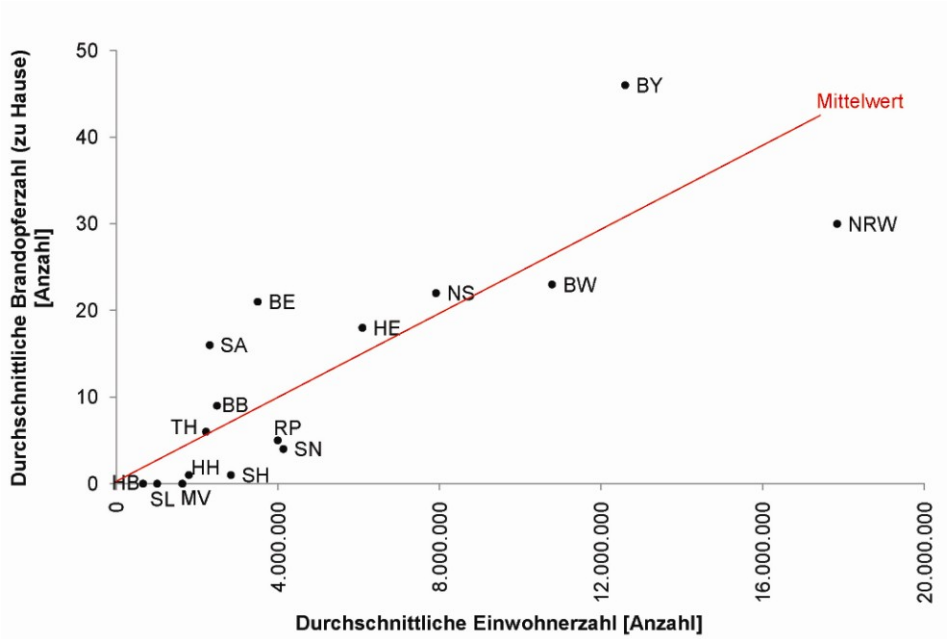


Bild 2 Brandopferanzahl (zu Hause) je Bundesland (1998-2011)

In den Bildern 3, 4 und 5 sind die Brandopferrisiken jahresweise als Punkte aufgetragen. Die roten Punkte bis zur senkrechten Markierung verweisen auf den Zeitraum vor der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern und die schwarzen Punkte nach der senkrechten Markierung auf den Zeitraum nachher. Die grauen Balken zeigen den Mittelwert des Brandopferrisikos vorher und nachher.

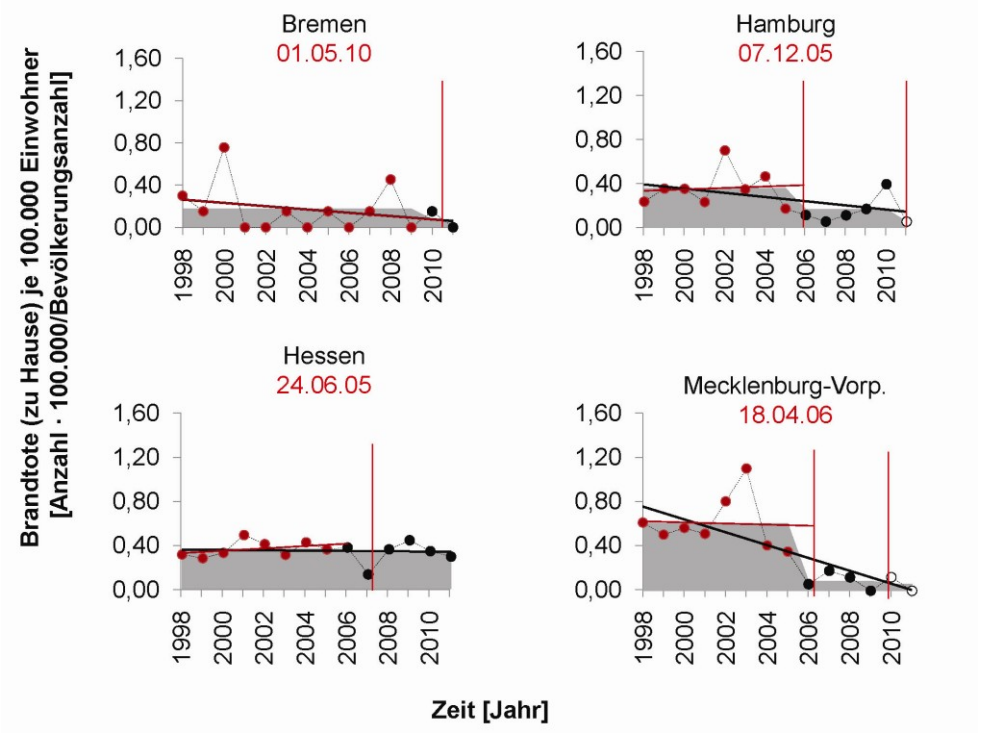


Bild 3 *Einführung der Rauchwarnmelderpflicht und die Entwicklung des Brandopferrisikos (HB, HH, HE, MV)*

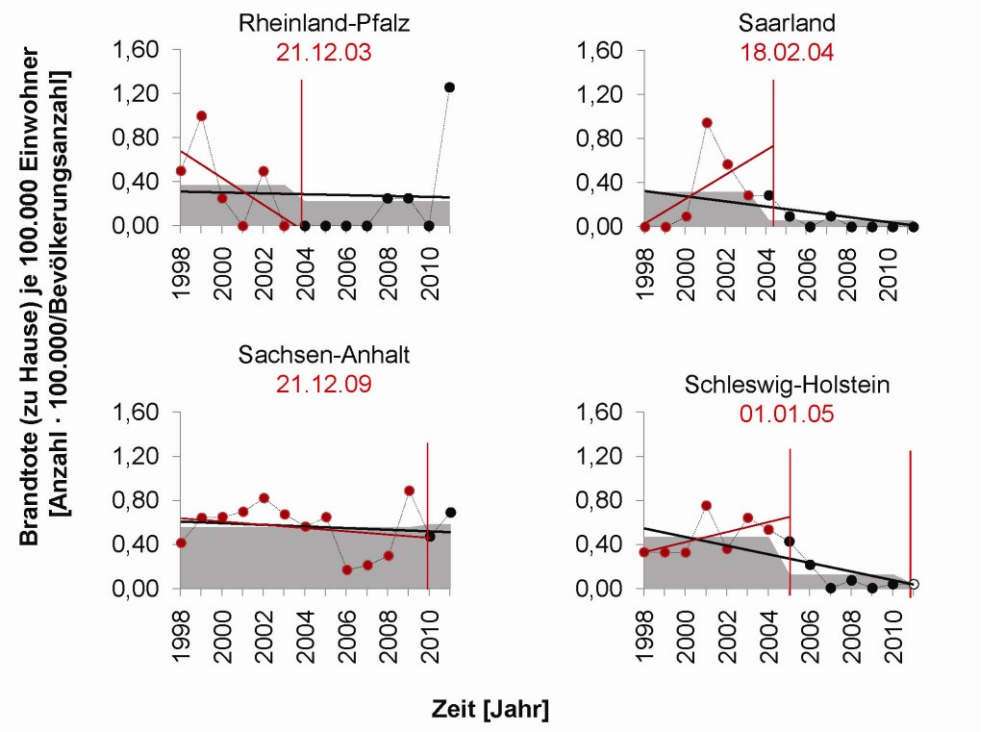


Bild 4 *Einführung der Rauchwarnmelderpflicht und die Entwicklung des Brandopferrisikos (RP, SL, SA, SH)*

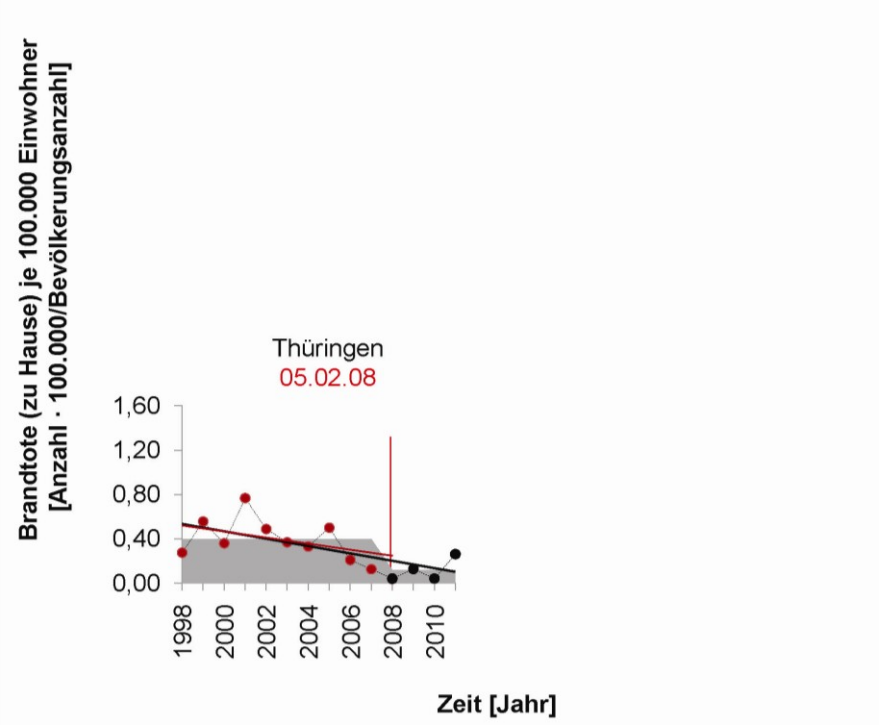


Bild 5 Einführung der Rauchwarnmelderpflicht und die Entwicklung des Brandopferrisikos (TH)

Darüber hinaus sind den Bildern die Ausgleichskurven vor der Einführungspflicht und über den Gesamtzeitraum zu entnehmen, woran die Risikoentwicklung zusätzlich analysiert werden kann.

Die Bilder 3, 4 und 5 zeigen, dass in allen Bundesländern, in denen eine Rauchwarnmelderpflicht eingeführt wurde, das Brandopferrisiko (zu Hause) gesunken ist.

In Mecklenburg-Vorpommern, im Saarland, in Schleswig-Holstein und Thüringen ist das Risiko deutlich gesunken.

In Hamburg ist seit der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht ein kurvenförmiger Anstieg des Risikos bis zum Jahre 2010 zu erkennen. Der kurvenförmige Verlauf ist ein Indiz für einen systematischen Einfluss (vgl. [3]). Im Jahr 2011 wird diese Kurve mit einem abfallenden Wert unterbrochen.

In Hessen ist das Brandopferrisiko nur leicht gesunken, wobei sich der Effekt mit der Zeit verstärkt. Während die Daten bis 2010 eine Risikoreduzierung um 9,06 % verzeichnen, liefern die Daten bis 2011 nun eine Reduzierung um 10,66 %. Das liegt vermutlich daran, dass sich der Ausstattungsgrad der Wohnungen mit Rauchwarnmeldern mit der Zeit erhöht. In Hamburg und Mecklenburg-Vorpommern sind zum Beispiel Schätzungen zu Folge mittlerweile 60 % und 80 % der Haushalte mit Rauchwarnmeldern ausgestattet [23].

In Sachsen-Anhalt deutet, die Mittelwertveränderung von 0,555 auf 0,581 auf ein erhöhtes Brandopferrisiko (+4,68 %) hin, wobei hier vertiefende Analysen anhand der Mediane ein sinkendes Risiko von 0,645 auf 0,581 (-9,92 %) darlegen. Das wird anhand von Bild 6 deutlich.

Werden die Zahlenwerte als Verteilungen zusammengefasst, lassen sich die Veränderungen zwischen den Zeiträumen vor und nach der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht deutlich erkennen. Dazu werden die Datenreihen der Bundesländer als „Box-Plots“ dargestellt. Sie ergeben sich aus den folgenden Lagemaßen: 1) Mindestwert der Datenreihe (unterster Wert), 2) unteres Quartil (unterer Rand der jeweiligen Box; 25 % Marke), 3) Median (Balken in den Boxen, 50 % Marke), 4) oberes Quartil (oberer Rand der Boxen; 75 % Marke) und 5) Maximalwert der Datenreihe (oberster Wert).

Bild 6 zeigt die Brandopferrisiken bundesländerweise, für die Bundesländer mit einer Rauchwarnmelderpflicht innerhalb des Untersuchungszeitraumes, als Box-Plots dargestellt. Es liegen für jedes betrachtete Bundesland zwei Verteilungen der Datenwerte vor. Zum einen für den Zeitraum vom Jahre 1998 bis zum Zeitpunkt der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht (rote Markierungen) und zum anderen vom Zeitpunkt der Einführungspflicht bis zum Jahre 2011 (grüne Markierungen).

Wie Bild 6 verdeutlicht, ist in allen Bundesländern zum Zeitpunkt der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht eine risikoreduzierende Wirkung und damit ein positiver Effekt festzustellen.

Das wird auch an den ermittelten Risiken in Tabelle 1 ersichtlich. Wie dort zu sehen ist, ergeben sich Mittelwertveränderungen in die gewünschte Richtung zwischen 10,66 % in Hessen und 86,80 % in Mecklenburg-Vorpommern. Da die Wohnungen aber nicht alle mit in Kraft treten der Rauchwarnmelderpflicht gleichzeitig mit Rauchwarnmeldern ausgestattet sind, ist davon auszugehen, dass die hier ermittelten Effekte konservativ sind.

Die Berechnung über alle Bundesländer, mit einer Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern, zeigt einen signifikanten positiven Effekt. Die Rauchwarnmelderpflicht leistet in Deutschland einen risikoreduzierenden Beitrag in Bezug auf die Brandopfersituation (zu Hause).

Viele Brandschutz- und Brandbekämpfungsmaßnahmen wirken auf die Risikosituation ein und greifen teilweise ineinander. Einzelne Effekte von Maßnahmen, wie die Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern, können auf der Grundlage der hier verwendeten Daten nicht isoliert betrachtet werden, weshalb die Bestimmung des konkreten Wirkungsgrades der Rauchwarnmelderpflicht ausbleibt. Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Einflussfaktoren, ist es umso erstaunlicher, dass statistisch signifikante Ergebnisse in Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein, Thüringen und mit den Daten von 2011 nun auch in Hamburg erhoben werden konnten.

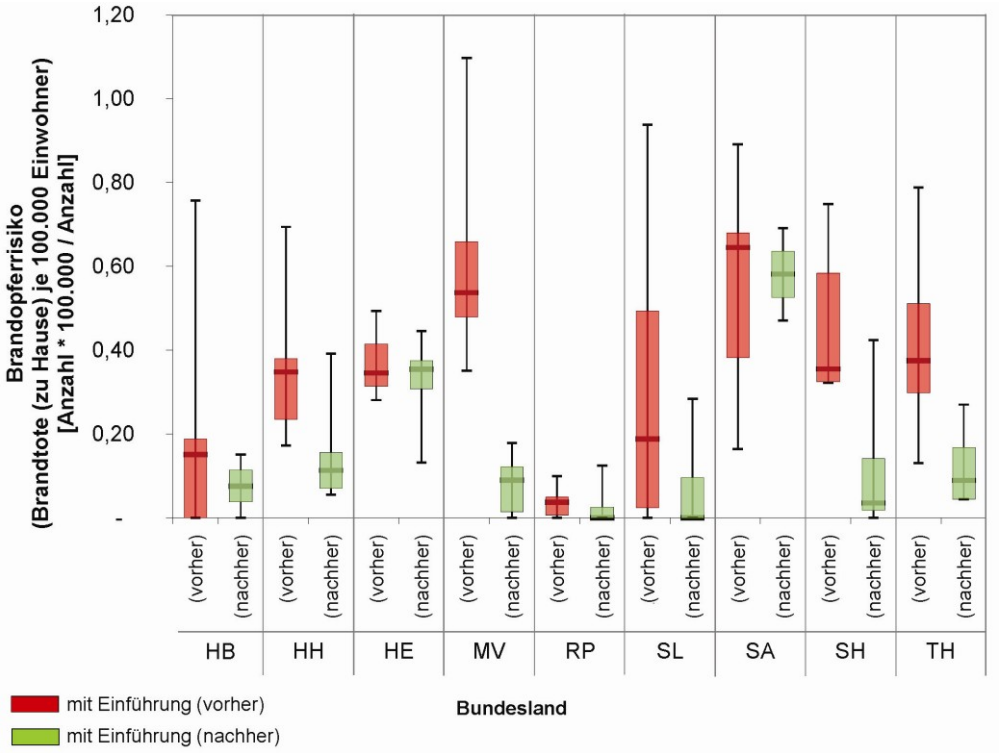


Bild 6 *Übersicht über die Verteilung des Brandopferrisikos vor und nach der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern (1998-2011)*

Tabelle 1 Risikokennwerte der Bundesländer und Rauchwarnmelderpflicht

Bundesland	Brandopfer, im Mittel [Anzahl]	Brandopfer-risiko, ge-samt [ ]	RWM-Einführungspflicht	RWM-Nachrüstpflicht
BW	25,9	0,242	10.07.2013	31.12.2014
BY	14,2	0,106	01.01.2013	31.12.2017
BE	23,8	0,698		
BB	12,9	0,503		
HB	1,1	0,162	01.05.2010	31.12.2015
HH	4,6	0,267	07.12.2005	31.12.2010
HE	21,2	0,349	24.06.2005	31.12.2014
MV	6,6	0,380	18.04.2006	31.12.2009
NS	23,4	0,295	01.11.2012	31.12.2015
NRW	33,5	0,186	01.04.2013	31.12.2016
RP	1,1	0,028	21.12.2003	12.07.2012
SL	1,8	0,168	18.02.2004	
SN	11,5	0,266		
SA	13,9	0,559	21.12.2009	31.12.2015
SH	8,1	0,287	01.01.2005	31.12.2010
TH	7,8	0,328	05.02.2008	

Bundesland	Brandopfer-risiko, vor Einführung	Brandopfer-risiko, nach Einführung	Mittelwert-unterschied [%]	Einführung Signifikant (t-Test, α = 5%)
BW				
BY				
BE				
BB				
HB	0,176	0,076	-56,82	nein
HH	0,355	0,150	-57,75	ja
HE	0,366	0,327	-10,66	nein
MV	0,606	0,080	-86,80	ja
NS				
NRW				
RP	0,037	0,022	-40,54	nein
SL	0,313	0,059	-81,15	nein
SN				
SA	0,555	0,581	4,68	nein
SH	0,463	0,111	-76,03	ja
TH	0,410	0,123	-70,00	ja
BRD				ja

In den Bundesländern, in denen innerhalb des Untersuchungszeitraumes keine Rauchwarnmelderpflicht in den Landesbauordnungen verankert wurde und die hier als Kontrollgruppe verwendet werden, zeigt sich ein diffuses Bild in Bezug auf die Entwicklung des Brandopferrisikos. Dort sinkt, stagniert und steigt das Brandopferrisiko auf einem unterschiedlichen Risikoniveau je nach Bundesland. Die prozentualen Veränderungen des Brandopferrisikos (zu Hause) zwischen dem Ausgangszeitpunkt (von 1998 bis 2002 gemittelt) und den letzten verfügbaren Werten im Jahre 2011 zeigen, dass sich die Situationen in den Bundesländern mit einer Rauchwarnmelderpflicht deutlicher verbessert haben, als in den Bundesländern ohne eine Rauchwarnmelderpflicht.

Nachrüstpflicht von Rauchwarnmeldern (erweiterte Sulzburger Studie)

Im aktuellen Untersuchungszeitraum liegen in Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein Daten vor, die eine erste Bewertung des Einflusses der Verankerung der Rauchwarnmelderpflicht einschließlich der Nachrüstpflicht auf die Risikosituation zulässt, wobei die Anzahl der Daten für den Zeitraum seit der Nachrüstpflicht sehr gering ist (1 bis 2 Werte), wie Bild 7 zeigt.

Durch den zeitlichen Ablauf bedingt, ergeben sich bei der Berücksichtigung der Nachrüstpflicht und der Bewertung der risikologischen Gesamtsituation der Rauchwarnmeldepflicht, die folgenden Zeitintervalle:

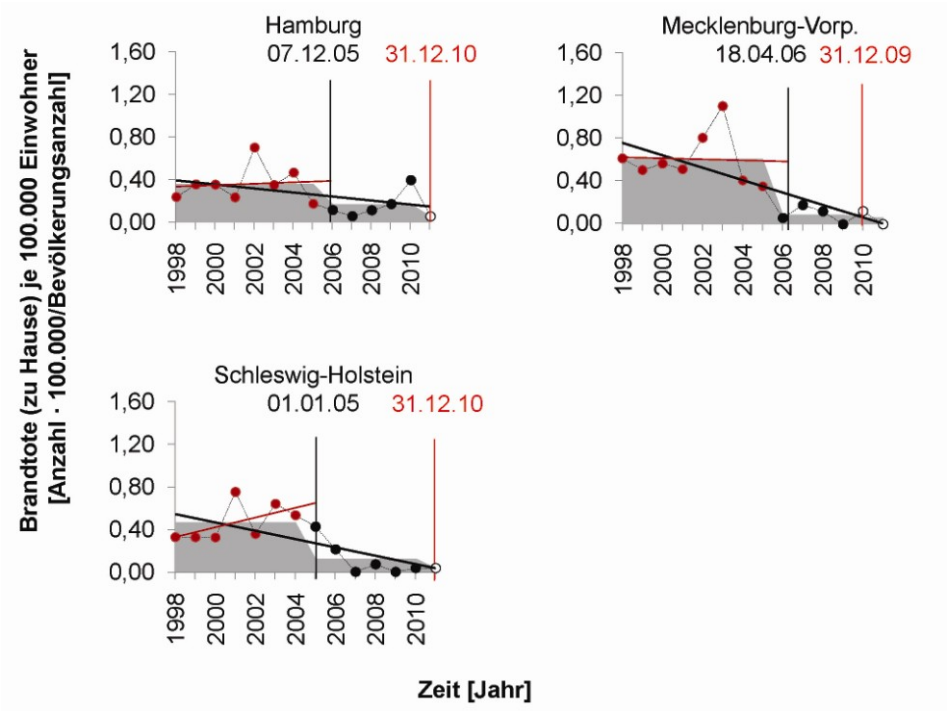


Bild 7 *Einführungs- und Nachrüstpflicht von Rauchwarnmeldern und die Entwicklung des Brandopferrisikos (HH, MV, SH)*

- Referenzrisiko = Risiko vor der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht (gemitteltes Brandopferrisiko vom Jahre 1998 bis zum Zeitpunkt der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht)
- Risiko nach der Einführung (gemitteltes Brandopferrisiko vom Zeitpunkt der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht bis zum Jahre 2011)
- Risiko während der Übergangsfrist (gemitteltes Brandopferrisiko vom Zeitpunkt der Einführung der Rauchwarnmelderpflicht bis zum Ablauf der Nachrüstpflicht)
- Risiko nach Nachrüstung (gemitteltes Brandopferrisiko vom Zeitpunkt des Ablaufs der Nachrüstpflicht bis zum Jahre 2011)

In Bild 8 sind den Zeitintervallen die entsprechenden gemittelten Brandopferrisiken zugeordnet. Wie oben bereits festgestellt wurde, liegen in Hamburg, Mecklenburg-Vorpommern und Schleswig-Holstein signifikante Risikoreduzierungen zwischen den Zeiträumen vor und nach der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern vor. In diesen Bundesländern hat sich das Risiko über die Zeit weiter verringert, was vermutlich an dem steigenden Ausstattungsgrad der Wohnungen mit Rauchwarnmeldern liegt. Die Vergleiche zwischen den Zeiträumen vor der Einführungspflicht und nach der Nachrüstung liefern ebenfalls signifikante Ergebnisse.

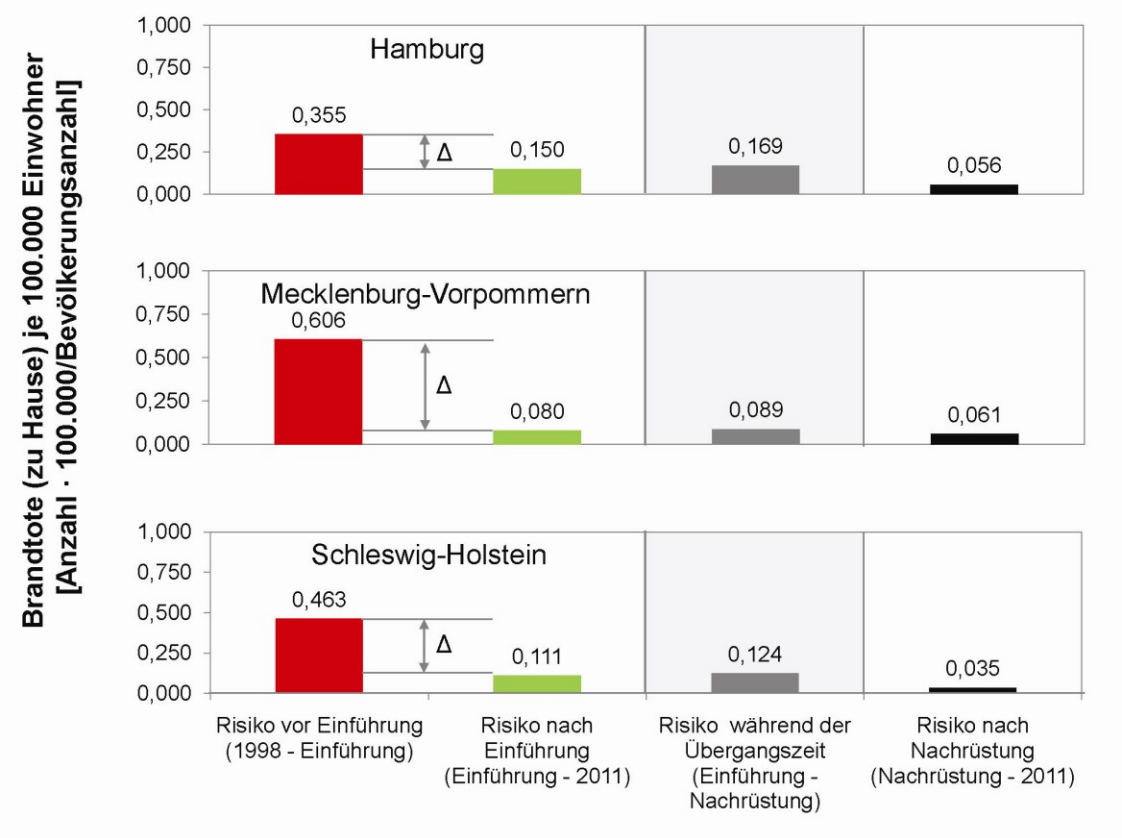


Bild 8 Nachrüstpflicht von Rauchwarnmeldern und das Brandopferrisiko (HH, MV, SH)

FAZIT

Rauchwarnmelder sind technische Geräte, für die es detaillierte Produkt- und Anwendungsnormen sowie Richtlinien mit zusätzlich erhöhten Qualitätsanforderungen gibt. Rauchwarnmelder kommen in Wohnungen und wohnungsähnlichen Bereichen zum Einsatz und haben den Zweck, Brände frühzeitig zu erkennen. Sie sollen vor allem Todesfälle durch Brände vermeiden. Im Jahre 2003 wurden in Rheinland-Pfalz erstmals in Deutschland Rauchwarnmelder in einer Landesbauordnung verankert. Seither sind sie in 13 der 16 Bundesländer vorgeschrieben.

Die Analyse der risikologischen Effektivität der Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern zeigt, dass in allen Bundesländern, in denen eine Rauchwarnmelderpflicht eingeführt wurde, das Brandopferrisiko gesunken ist. In diesen Bundesländern ist eine risikoreduzierende Wirkung und damit ein positiver Effekt der Maßnahme zu verzeichnen. In einzelnen Bundesländern konnten sogar statistisch signifikante Verbesserungen festgestellt werden, die zufällige Einflüsse weitestgehend ausschließen, und das trotz der Vielzahl sich überlagernder Brandschutz- und Brandbekämpfungsmaßnahmen, die zu dem Ergebnis beitragen.

In den Bundesländern, in denen innerhalb des Untersuchungszeitraumes die Nachrüstfrist für Bestandsbauten abgelaufen ist und Daten für den Zeitraum seither vorliegen, konnte die Risikosituation auch unter der Berücksichtigung der Nachrüstung analysiert werden. Dabei ist zu erkennen, dass sich das Risiko über die Zeit weiter verringert hat, was u. a. vermutlich an dem steigenden Ausstattungsgrad der Wohnungen mit Rauchwarnmeldern liegt.

Im Rahmen der vorliegenden Analyse konnten aufgrund mangelnder Daten einige Einflüsse auf die Risikosituation nicht berücksichtigt werden, wie der konkrete Ausstattungsgrad der Wohnungen mit Meldern, die Arten und Typen der eingesetzten Melder, die Qualität der Melder, die Detailregelungen der Rauchwarnmelderpflicht (Verantwortung, Einsatzort), die regionalen und strukturellen Gegebenheiten der Umgebung und allgemein der Umgang mit den Rauchwarnmeldern. Obwohl bisher einige Gesichtspunkte in der Analyse vernachlässigt wurden, zeigt sich, dass die Rauchwarnmelderpflicht in Deutschland einen bedeutsamen risikoreduzierenden Beitrag leistet. Eine besondere Bedeutung hat dabei, dass sich im Zuge der Gesetzesänderungen in der Bevölkerung eine Sensibilität für das Thema Rauchwarnmelder und allgemein für das Thema Brandschutz im Privatbereich entwickelt. Das ist wichtig und die Situation sollte weiter analysiert werden.

LITERATUR

[1] WirtschaftsWoche (12.11.2012). Pflicht zum Piepsen. *Wirtschaftswoche* Nr. 46, S. 30.

[2] Czycholl, H. (22.12.2012). Wem Rauchmelder wirklich nützen. *Die Welt / Welt am Sonntag*, S. IM 1 und IM 3.

[3] Festag, S. (2013). *Sulzburger Studie zur Einführungspflicht von Rauchwarnmeldern – Eine Analyse der Brandopferanzahl von 1998 bis 2010 zur risikologischen Effektivität der Rauchwarnmelderpflicht*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

[4] Gerber, G. (2009). *Brandmeldeanlagen: Planen, Errichten, Betreiben.* München/Heidelberg: Hüthig & Pflaum Verlag.

[5] DIN EN 14604:2005-10 [Ausgabedatum: 2009-02]. *Rauchwarnmelder*. Berlin: Beuth-Verlag.

[6] vfdb 14-01:2010-05. *Rauchwarnmelder, Zusatzanforderungen, Anforderungen und Prüfmethoden*. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (Hrsg.). vfdb-Richtlinien. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH (Verlag).

[7] Ahrens, M. (09/2011). *Smoke Alarms in U.S. Home Fires*. Quincy: National Fire Protection Association Fire Analysis and Research Division.

[8] Marriott, M. (1994). Reliability and effectiveness of domestic smoke alarms. Fire Research and Development Group, London.

[9] VdS 3515:2007-06. *Rauchwarnmelder mit Funk-Vernetzung – Anforderungen und Prüfmethoden*. VdS-Richtlinie für Rauchwarnmelder. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH (Hrsg. und Verlag).

[10] prDIN EN 14604:2012-02. *Rauchwarnmelder*. Berlin: Beuth-Verlag.

[11] DIN 14676:2012-09. *Rauchwarnmelder für Wohnhäuser, Wohnungen und Räume mit wohnungsähnlicher Nutzung – Einbau, Betrieb und Instandhaltung.* Berlin: Beuth-Verlag.

[12] Werner, U., Pastor, W. & Müller, K. (2000). *Baurecht von A-Z. Lexikon des öffentlichen und privaten Baurechts*. C.H. Beck Verlag, München/Köln, 7. Auflage.

[13] N.N. (07.07.2011). Normen und Technische Regeln – Kapitel 2: Die unbestimmten Rechtsbegriffe und ihre Dreiwertigkeit. Handwerkskammer für München und Oberbayern. URL: www.dasbayerischehandwerk.de (Zeitpunkt der Aktualisierung).

[14] GBE-Bund (2013). *Das Informationssystem der Gesundheitsbericht-erstattung des Bundes*. URL: www.gbe-bund.de.

[15] ICD-10-WHO – Band 1 (10/2010). *ICD-10, Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme – WHO-Ausgabe, Band 1 – Systematisches Verzeichnis*. Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, DIMDI (Hrsg.), 10 Auflage.

[16] ICD-10-WHO – Band 2 (11/2010). *ICD-10, Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme – WHO-Ausgabe, Band 2 – Regelwerk*. Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information, DIMDI (Hrsg.), 10 Auflage.

[17] Kaiser, G.O. (2013). *Die Bedeutung der Zyanwasserstoffintoxikation für die medizinische Akutbehandlung schwerer Brandrauchvergiftungen*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

[18] Mayr, J. (05/2012). Nicht gewarnt ist halb gestorben – Teil 2. *FeuerTrutz. Brandschutz Magazin für Fachplaner*, 02:44-49.

[19] Kaiser, G.O. (2012). *O.R.B.I.T. 2010 – Aktuelle Erkenntnisse zu medizinischen und rettungstechnischen Grundlagen der Planung im Feuerwehrwesen*. Jahresfachtagung 2012 der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V, 05:625-634.

[20] Giselbrecht, K. (09/2012). *Gebäudebrände mit Todesfolgen – Versuch einer statistischen Analyse*. Brandschutz-Fachtagung 2012, St. Pölten. 03.-04.09.2012, S. 163-168.

[21] Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information (DIMDI) (09.01.2012). Klassifikationen im Gesundheitswesen. URL: www.dimdi.de (Zugriffsdatum).

[22] Meyna, A. & Pauli, B. (2003*). Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Quantitative Bewertungsverfahren*. München: Carl Hanser Verlag.

[23] N.N. (07/2013). 36 Millionen Rauchwarnmelder in Deutschland installiert. *Technische Sicherheit*, Bd. 3, Nr. 7/8 - Juli/August, S. 7.

NEUE VDS-RICHTLINIE ZUM EINSATZ VON LÖSCHANLAGEN IN PFLEGE- UND WOHNHEIMEN

Uwe Klinkhardt
Marioff GmbH, Hoppegarten

EINLEITUNG

Der Schutz von hilfebedürftigen Personen wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten vor neue Herausforderungen gestellt. Vor allem die demografische Entwicklung in den industriell entwickelten Ländern, aber auch das Streben der Älteren zu neuen Wohnformen und zu einer höheren Lebensqualität in diesen Einrichtungen bedarf einer neuen Herangehensweise. Deutschland hat gerade im Brandschutz nicht mehr als Mittelmaß zum Schutz von Hilfebedürftigen zu bieten – ein Blick über Ländergrenzen zeigt Alternativen und andere Sichtweisen. Die Brandschutzgesetzgebung geht in der Regel von Personen aus, welche sich selbst retten können- dies trifft gerade für Bewohner dieser Einrichtungen nicht zu. Das Thema Schutz von Pflege- und Wohnheimen ist immer wieder auf der Tagungsordnung verschiedenster Brandschutzsymposien. Jedoch wird die Thematik mehr oder weniger einseitig betrachtet und endet mit Vorschlägen im Bereich des baulichen Brandschutzes. Die vielen Brände in diesen Einrichtungen haben den bvfa und EFSN in Zusammenarbeit mit dem VdS veranlasst, auf weitere Möglichkeiten zur Sicherung von Einrichtungen mit hilfebedürftigen Personen hinzuweisen. Eine belegbare Verbesserung zum Schutz von hilfebedürftigen Personen bieten Sprinkleranlagen. Internationale Erfahrungen zeigen ein eindeutiges Bild. Die VdS Richtlinie „Sprinkleranlagen für Wohnbereiche“ (VdS 2896) [1] eröffnet eine neue Qualität, gerade für kleinere und mittlere Gebäude und Einrichtungen, den Personen- und Sachschutz zu verbessern. Die nachfolgenden Informationen geben ein Überblick über die VdS-Richtlinie und deren Möglichkeiten der Umsetzung, aber auch über Erfahrungen und Statistiken anderer Länder beim Einsatz von Sprinkleranlagen in Einrichtungen mit hilfebedürftigen Personen.

RISIKEN IM BRANDFALL

Bis zum 30. Juni dieses Jahres gab es in Deutschland 40 Brände mit bisher 4 Toten und vielen Verletzten. Die Recherche wurde anhand von Medienauswertungen vorgenommen, die Dunkelziffer dürfte weit höher liegen. Gleichzeitig sei an die Brandkatastrophe im November letzten Jahres in Titisee-Neustadt mit 14 Toten erinnert, die in keinster Weise zum Umdenken beigetragen hat.

Man braucht sicherlich nicht viel Vorstellungskraft, um die Risiken im Brandfall einzuschätzen. Die Bewohner dieser Einrichtungen können gehbehindert, bettlägerig, seh- und hörbehindert oder dement sein und einen Mix aus den genannten Einschränkungen haben. Die Einschränkungen z. B. der Riech-, Seh-, Tast- und Hörorgane, aber vor allem der Mobilität stellen die Rettung dieser

Personen vor eine große Herausforderung. Die Pflegekräfte, soweit sie vorhanden sind, haben eine große Verantwortung. Bis zum Eintreffen der Feuerwehr müssen sie die Evakuierung vorbereiten und vornehmen. Bei den vorgenannten Behinderungen kann man sich vorstellen, dass die Evakuierungszeiten extrem verlängert werden. Vorschläge von verschiedensten Brandschutzexperten gab es gerade nach dem Brand in Titisee-Neuhaus. Die einen fordern verbesserte Rettungswege, andere wiederum mehr Hydranten und Feuerlöscher für diese Einrichtungen. Unserer Meinung nach ist das jedoch nicht der richtige Ansatz für Einrichtungen mit hilfebedürftigen Personen.

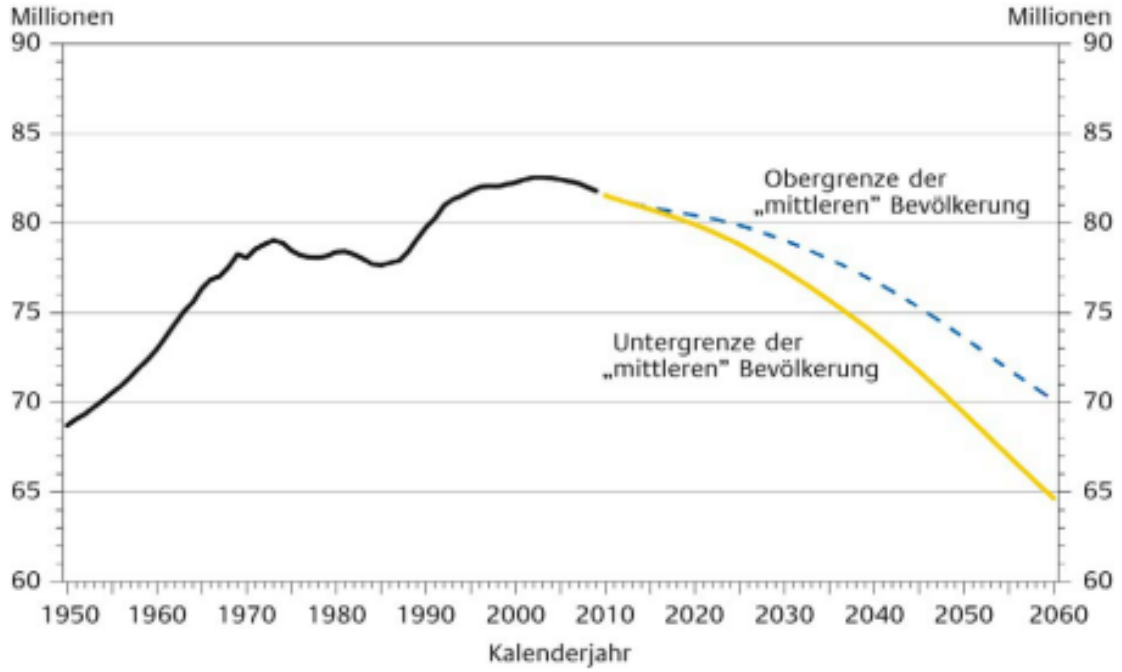
Entsprechend einer Statistik des BRE [2] aus dem Jahr 2012 ist das Risiko eines Brandes im Vergleich zu Einfamilienhäusern bei Pflegeheimen ca. 20-mal höher und bei Altersheimen ca. 40-mal höher. Brandursachen gemäß NFPA [3] sind zu 20 % elektrische Geräte und Kücheneinrichtungen (18 %). Die meisten Brände werden durch Brandstiftung (vorsätzlich oder fahrlässig) verursacht.

Zu hilfebedürftigen Gruppen gehören auch Kinderheime, Kindergärten etc., hier liegt die Risikorate nach NFPA sogar 136-mal höher. Unerklärlich ist, dass für diese Gebäude mit hilfebedürftigen Personen oder auch für Krankenhäuser in Deutschland keine allgemeingültigen Vorschriften bezüglich des Sprinklerschutzes bestehen. Verkaufsstätten, Garagen, Hochregallager und teilweise auch Versammlungsstätten, frequentiert mit Personen, die sich in der Regel selbst retten können, werden mit Sprinkleranlagen versehen. Hier sollte ein Umdenken erfolgen, um gerade den Personenschutz in den Vordergrund zu stellen. Eine automatische Sprinkleranlage würde den Brand selbsttätig bekämpfen, die Sicherheit der Bewohner erhöhen, das Schadensausmaß stark begrenzen und den Rettungskräften für die Evakuierung „den Rücken frei halten“.

DEMOGRAPHIE

Diverse Berichte, z. B. des statistischen Bundesamtes, weisen auf die Veränderungen in der Bevölkerungsentwicklung hin. Bis zum Jahr 2060 wird die Bevölkerungszahl in Deutschland um 14 bis 21 % abnehmen [4]. Damit sinkt die Anzahl der 20- bis 65-Jährigen, also der Menschen im berufsfähigen Alter, von jetzt knapp 50 Millionen auf ca. 34 Millionen. Das bedeutet, dass weniger Arbeitskräfte dem Markt zur Verfügung stehen. Diese Auswirkungen werden wir ab 2020 bereits spüren.

Gleichzeitig steigen der Anteil der älteren und pflegebedürftigen Personen und der Bedarf an entsprechenden Einrichtungen. Nach den Vorausberechnungen [5] steigt die Anzahl der Pflegebedürftigen von zurzeit 2,25 Millionen auf 2,9 Millionen bis 2020 und 3,37 Millionen bis 2030. Der Anteil der über 85-jährigen steigt sogar von heute 35 % auf 48 % im Jahr 2030. Der Anteil der häuslichen Pflege wird sich in Richtung stationärer Pflege verschieben. In den nächsten 15 bis 20 Jahren werden ca. 52 Milliarden Euro in Pflege- und Altersseinrichtungen investiert (Studie von CBRE und Immotiss).



1950 bis 1989 Früheres Bundesgebiet und DDR insgesamt, ab 1990 Deutschland, ab 2009 Ergebnisse der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung

Quelle: Statistisches Bundesamt, 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung

Bild 1 Entwicklung der Bevölkerungszahl in Deutschland im Zeitraum 1950 bis 2060 (in Millionen)

Die Zahl der Berufsfähigen wird abnehmen und der Wettbewerb um Arbeitskräfte wird zunehmen. Die Auswirkungen werden wir im Rettungswesen und bei den Feuerwehren spüren. Das Bundesinstitut für Bevölkerungswesen stellte 2008 in einer Studie fest, dass die bürgerlichen Aktivitäten hier um 25 % zurückgehen werden. Gerade in den ländlichen Bereichen ist dieses Engagement der freiwilligen Feuerwehren bis zu den Rettungskräften unerlässlich. Wenn man sich nun vorstellt, dass der genannte Rückgang um 25 % einen Durchschnitt für Deutschland darstellt, kann man davon ausgehen, dass die Grundversorgung in einigen Regionen Deutschlands nur noch minimal gewährleistet ist.

Aber auch das Pflegepersonal ist Mangelware; schon heute gibt es über 10.000 unbesetzte Stellen im Pflegedienst. Nach [6] wird die Zahl der Pflegekräfte langfristig nicht ansteigen. Ein großer Anteil der Pflegekräfte wird in den Ruhestand gehen. Des Weiteren sind die Kassen der Kommunen chronisch leer und Kürzungen bei der Feuerwehr wie auch im Gesundheitswesen sind weiterhin an der Tagesordnung. Wer also kann den organisatorischen Brandschutz gewährleisten?

Bei einem Brand in einem Pflegeheim werden zahlreiche Rettungskräfte benötigt. Beispielsweise waren am 12.11.2012 in Riemerlingen (Bayern) 160 Feuerwehrleute im Einsatz. Praktisch jeden Monat gibt es solche Schlagzeilen. Sprinkleranlagen sind ein probates Mittel, der sinkenden Anzahl von Rettungskräften, Ärzten und Feuerwehrleuten entgegenzuwirken und gleichzeitig den älteren und pflegebedürftigen Personen einen angemessenen Schutz zu bieten.

Bild 2 Rettungseinsatz (Quelle EFSN)

BAURECHTLICHE ÜBERSICHT ZU LÖSCHANLAGEN IN PFLEGEHEIMEN

Eine Musterrichtlinie für Gebäude oder Nutzungseinheiten mit Personen mit Pflegebedürftigkeit oder Behinderung in Deutschland gibt es bisher nicht. Die BauO NRW [7] als besondere Verwaltungsvorschrift erwähnt bei den bauaufsichtlichen Anforderungen auch Feuerlöschanlagen. Demnach können andere Brandschutzmaßnahmen reduziert werden, wenn selbsttätige Feuerlöschanlagen eingesetzt werden. Bundesländer wie Hessen, Rheinland-Pfalz und das Saarland besitzen Regelungen bzw. Empfehlungen bezüglich Pflegeheime, darin werden jedoch selbsttätige Löschanlagen nicht genannt. Die anderen Bundesländer haben keine Regelungen für diese Nutzungen. Die vorgenannten Regelungen (außer [7]) empfehlen zwar eine Vielzahl an passiven Brandschutzmaßnahmen sowie nichtautomatische Löscheinrichtungen wie Feuerlöscher und Wandhydranten, jedoch kein aktives System zur Brandbekämpfung und damit zur Reduzierung von Rauch und Feuer.

NACHWEISBARE ERGEBNISSE IN SPRINKLERGESCHÜTZTEN GEBÄUDEN

Viele Länder haben schon längst reagiert und Sprinkleranlagen für Gebäude mit hilfebedürftigen Personen vorgeschrieben. Die Vorteile liegen auf der Hand. Entsprechend einer Studie von NFPA [3] wird bei Pflegeheimen mit Sprinkleranlagen die Todesfolge bei Bränden um 87 % reduziert. Der Schaden am Gebäude wird um 72 % abgeschwächt. Ähnliche Studien gibt es aus England und Schweden. Sprinkleranlagen begrenzen den Brand, reduzieren die Rauchent-

wicklung, erlauben eine sichere Evakuierung und sichern damit die weitere Nutzung des Gebäudes. Hier einige ausgewählte Länder:

- Australien: Nach einer Brandkatastrophe wurde 2003 für neue Gebäude eine Sprinkleranlage verpflichtend vorgeschrieben. Nach einer weiteren Katastrophe wurde diese Pflicht auf bestehende Einrichtungen erweitert. Bis 2016 müssen alle „care homes“ mit einer Sprinkleranlage ausgerüstet sein.
- Finnland: Nach einer Brandkatastrophe 1999 wurden Sprinkleranlagen für neue Einrichtungen verpflichtend vorgeschrieben. Für bestehende Einrichtungen werden Risikoanalysen gefordert. Im Ergebnis der Analyse wird entschieden, ob eine Sprinkleranlage notwendig wird. Bis heute wurden 50 % der bestehenden Einrichtungen ausgerüstet.
- England: Durch eine Kostenanalyse von 2004 und 2012 wurde der Nachweis erbracht, dass Sprinkleranlagen kosteneffektiver sind. Neue „care homes“ müssen entweder mit Sprinkleranlagen oder mit selbstschließenden Türen ausgestattet werden.
- Wales: Alle Wohngebäude, also auch „care homes“, sind ab September 2013 mit Sprinkleranlagen auszurüsten
- Japan: Einrichtungen mit mehr als 275 m² Grundfläche sind seit 2007 mit Sprinkleranlagen auszurüsten.
- Kanada: Hier besteht die Pflicht zur Sprinklerung bereits seit 1998. Nachrüstungen müssen bis 2018 erfolgen.
- Neuseeland: Die Pflicht zur Sprinklerung besteht seit 1998. Sie wurde auf bestehende Einrichtungen erweitert. Heute sind nahezu 100 % der Einrichtungen sprinklergeschützt.
- Schweden: Eine Pflicht zur Sprinklerung besteht für alle neuen „care homes“.
- Norwegen: Alle Wohngebäude mit mehr als zwei Geschossen sind seit 2010 mit Sprinkleranlagen auszurüsten.
- USA: Neue „Care homes“ sind generell mit Sprinkleranlagen auszurüsten. Die Frist für Nachrüstungen endete am 13.08.2013

Auffällig ist, dass in den meisten Ländern nach Brandkatastrophen die Gesetzgebung geändert wurde und Sprinkleranlagen verpflichtend vorgeschrieben wurden. Eine wesentliche Rolle spielten dabei die Feuerwehren, die Sprinkleranlagen für diese Einrichtungen gefordert haben.

HABEN ANDERE LÄNDER IM VERGLEICH ZU DEUTSCHLAND EINEN SCHLECHTEREN BAULICHEN BRANDSCHUTZ?

Insbesondere in den nordeuropäischen Ländern und in Nordamerika ist der bauliche Brandschutz im Vergleich zu Deutschland als mindestens gleichwertig

anzusehen. In diesen Ländern werden aber neben den baulichen Maßnahmen zusätzlich automatische Löschanlagen (AFLA) wie vor beschrieben gefordert.

Die nachfolgenden Tabellen 1 bis 3 zeigen auf Basis der Masterarbeit [8] Ergebnisse eines Vergleichs der verschiedenen nationalen Anforderungen.

Tabelle 1 Mindestanforderungen an den baulichen Brandschutz eingeschossiger Einrichtungen für hilfebedürftige Personen

Land	Mindestfeuer-widerstand in [min] [1]	maximale Brand-abschnittsgröße in [m²]	maximale Gesamt-rettungsweg-länge in [m] [2]	AFLA [3]
Deutschland [4]	30 [5]	1.600	35	–
Norwegen [6]	30	5.000 [7]	25 – 55 [8]	Pflicht [9]
Schottland [10]	60	1.500 [11]	64	Pflicht [12]
Schweden [13]	30 – 90 [14]	Unbegrenzt	30 – 45 [15]	Pflicht [16]
USA[17]	0 – 240 [18]	418,05 m² bis unbegrenzt [18]	60,96 – 76,2 [18]	Pflicht [19]

[1] von tragenden Bauteilen und Konstruktionen
[2] von jedem Punkt im Gebäude bis zu einem Ausgang, der zu einem sicheren Ort (z.B. angrenzender BA, sicheren Treppenraum oder ins Freie) führt
[3] automatische Feuerlöschanlagen
[4] Musterbauordnung/ Muster-Wohnformen-Richtlinie
[5] theoretisch F0 (GK 1) bis F30 (GK 2-3)
[6] Veiledning om tekniske krav til byggverk 2011
[7] Brandlast > 400 MJ/m
[8] j e nach Auslegung der „*Brandzellen*“ und „*Brandsektionen*“ → Einzelfallentscheidung
[9] seit 01.07.2010: Nutzungsklasse 6
[10] Technical Handbooks 2011: October Non Domestic
[11] Erleichterungen der Brandabschnittsgröße durch Verwendung von AFLA in Absprache mit den zuständigen Behörden
[12] seit 01.05.2005: Pflegeeinrichtungen, betreutes Wohnen, Schulen und Wohnblöcke über 18 m Höhe
[13] Swedish Building Regulations - BBR 19 - BFS 2011:26/ Application of the European construction standards - EKS 8
[14] sofern Brandlast < 800 MJ/m² und abhängig von den Brandschutzklassen des EKS 8 (5) sowie den Gebäudeklassen des BBR 19 (3) → Einzelfallentscheidung
[15] 45 m in Nutzungsklasse 5B; 30 m in Nutzungsklasse 5C
[16] seit 2012: Nutzungsklasse 5B und 5C
[17] International Building Code 2012
[18] abhängig von der Nutzungsart (7), den Konstruktions- (5) und Konstruktionsuntertypen (2) → Einzelfallentscheidung
[19] Pflicht in Neubauten aber auch bis 13.08.2013 Nachrüstpflicht in 16.000 bestehenden CMS Einrichtungen (Centers for Medicare & Medicaid)

Tabelle 2 Mindestanforderungen an den baulichen Brandschutz eingeschossiger Einrichtungen für hilfebedürftige Personen im Vergleich zu Tabelle 1 unter der fiktiven Bedingung, dass AFLA in den jeweiligen Ländern nicht obligatorisch sind

Land	Mindestfeuer-widerstand in [min]	maximale Brandabschnitts-größe in [m²]	maximale Gesamt-rettungsweg-länge in [m]
Deutschland	30	1.600	35
Norwegen	30	800	25 – 55
Schottland	60	1.500	64
Schweden	30 - 90	2.500	30 – 45
USA	0 – 240	418,05 m² bis unbegrenzt	60,96 – 76,2

Tabelle 3 Rauchabschnittsgrößen in Einrichtungen für hilfebedürftige Personen

Land	maximale Größe des Rauchabschnittes in [m²]	AFLA
Australien [1]	500 [2]	Pflicht [3]
England [4]	400 – 750 [5]	–/Pflicht [6]
Deutschland [7]	Rauchabschnittslänge 30 m	–
Finnland [8]	400	–/Pflicht [9]
Österreich [10]	400	–
Schottland[11]	750	Pflicht [12]

1 Building Code of Australia 2010
2 in Stationsbereichen
3 seit 01.07.2003: Nutzungsklasse 9c
4 Approved Document B – Volume 2
5 abhängig von der Gebäudehöhe
6 bei mehr als einem Bett je Zimmer
7 Musterbauordnung/ Muster-Wohnformen-Richtlinie
8 National Building Code of Finland, E1 Structural fire safety in buildings
9 notwendig sofern es die strukturierte Risikoanalyse ergibt; generell erforderlich in Gebäuden mit Brandlast über 600MJ/m² und Gebäuden der Brandschutzklasse P2 mit 3 - 4 Stockwerken
10 „Technische Richtlinien Vorbeugender Brandschutz – Krankenhäuser und Pflegeheime“ - TRVB N 132
11 Technical Handbooks 2011: October Non Domestic/ NHS Scotland ‘Firecode’ Scottish Health Technical Memorandum 84
12 seit 01.05.2005: Pflegeeinrichtungen, betreutes Wohnen, Schulen und Wohnblöcke über 18m

SPRINKLERANLAGEN ALLGEMEIN

Sprinkleranlagen bekämpfen einen Brand in der Entstehungsphase. Der Sprinklerkopf, in der Regel mit einem Glasfass versehen, öffnet nur dort, wo die Wärme entsteht. Die Auslösung von mehreren Sprinklern gleichzeitig in großflächigen Bereichen ist ein Märchen und kommt nur in Filmen vor. Im Industriebereich werden ca. 80 % der Brände mit max. 4 Sprinklern bekämpft. Im Gebäudeschutz gibt es bisher wenige Statistiken; jedoch kann man davon ausgehen, dass die Anzahl der ausgelösten Sprinkler, aufgrund der geringeren Brandlast und der Kleinteiligkeit der Gebäude, viel kleiner ist. Eine Statistik aus Neuseeland für Senioreneinrichtungen bestätigt diese Annahme (Bild 3).

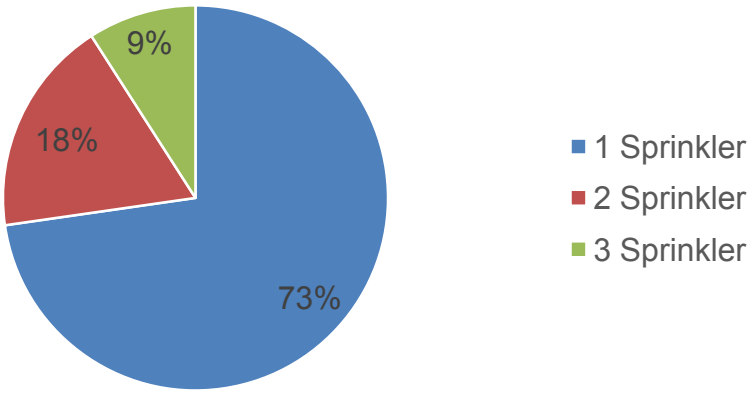


Bild 3 *Auslösung von Sprinklern bei Bränden in neuseeländischen Senioreneinrichtungen; 73 % der Brände werden mit einem Sprinkler bekämpft (New Zealand Fire Service)*

Ein wesentlicher Vorteil ist die hohe Zuverlässigkeit von Sprinkleranlagen. Der VdS bescheinigt eine Zuverlässigkeit von 98 % in Deutschland für den Gebäude- und Industrieschutz. Im internationalen Vergleich liegen ähnliche Daten vor.

Für den Schutz von Wohnbereichen mit Sprinkleranlagen gibt es international seit vielen Jahren Richtlinien, wie z. B. die NFPA 13R (USA), die INSTA 900 (für die skandinavischen Länder) oder die NZS 4515 für Australien und Neu-Seeland.

VDS RICHTLINIE FÜR SPRINKLERANLAGEN IN WOHN- UND AUFENTHALTSBEREICHEN

Für den Schutz von Gebäuden erfolgt die Auslegung bisher unter anderem nach der VdS Richtlinie CEA 4001. Am 01.07.2013 wurde nun eine neue Richtlinie speziell für den Schutz von Wohnbereichen (VdS 2896) veröffentlicht. Der VdS wird dem internationalen Trend gerecht, dass angepasste Richtlinien für kleinere Wohnbereiche, angefangen von Einfamilienhäusern bis zu mittleren Krankenhäusern nachgefragt werden. Die Richtlinie soll vor allen den Anforderungen des Personenschutzes in kleineren Gebäuden und Nutzungseinheiten

gerecht werden. Eine Sprinkleranlage gemäß dieser Richtlinie dient dazu, einen Brand bereits in der Entstehungsphase zu bekämpfen und auf einen Raum zu begrenzen, sodass eine sichere Evakuierung ermöglicht wird (Punkt 1.2. der VdS 2896).

Die Installation und Wartung der Anlagen ist durch das bewährte Modell der VdS-anerkannten Unternehmen auszuführen. Dieses sichert eine hohe Zuverlässigkeit der Anlagen.

Die VdS 2896 ist für den Schutz von Gebäuden mit geringen und mittleren Brandlasten und insbesondere für kleinere Gebäude und Nutzungseinheiten konzipiert.

Die maximalen Gebäude- bzw. Nutzungsgrößen sind:

- max. Größe von 1.500 m²,
- eine max. Raumgröße von 72 m² ohne Flure, bei größeren Räumen ändert sich die Anzahl der hydraulisch zu berücksichtigen Sprinkler,
- max. 4 Geschosse und ein Untergeschoss.

Zulässige Ausnahmen des Sprinklerschutzes in einem durch Sprinkler geschützten Gebäude bzw. einer Einrichtung sind Toiletten und Bäder bis 5 m² ohne erhöhte Brandlasten wie Waschmaschine, begehbare Kleiderschränke bis 2 m² und ungenutzte brandlastfreie Dachböden. Weitere Ausnahmen sind in der Richtlinie [1] genannt.

Für darüber hinaus gehende oder fehlende Parameter ist die VdS CEA 4001 zu nutzen.

Die Richtlinie unterscheidet drei Gebäudetypen (Tabelle 4). Der Typ 3 umfasst dabei Pflegeheime, Altersheime, Seniorenheime, Seniorenresidenzen, Kindergärten, Kinderheime, Fachkliniken, Krankenhäuser etc..

TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN EINE SPRINKLERANLAGE FÜR DIE GEBÄUDEKLASSE 3

Generell ist die Forderung einer Sprinkleranlage entsprechend der genannten Richtlinie in der Baugenehmigungsauflage zu benennen. Sprinkler geschützte und ungeschützte Bereiche sind mindestens feuerhemmend abzutrennen. Da hier nur kleinere Gebäude oder Nutzungseinheiten geschützt werden, ist die Wirkfläche (hydraulisch zu berücksichtige Sprinkleranzahl) auf die tatsächlichen Grundrisse und Größen der Räume angepasst. Das bedeutet, wenn der größte Raum in der Nutzungseinheit oder im Gebäude mit zwei Sprinklern abgedeckt wird, so werden auch nur zwei Sprinkler hydraulisch berechnet. Bei größeren Räumen bis 72 m² entsprechend mehr, jedoch beträgt die höchste Anzahl der zu berechneten Sprinkler hier 4 Stück.

Tabelle 4 Übersicht Gebäudeklassen

Gebäudetyp	Beschreibung
1	Gebäude, die nicht permanent Personen beherbergen, die zum Verlassen des Gebäudes Hilfe benötigen, und Gebäude die somit kategorisiert werden können, als: Ein- und Zweifamilien-Wohnhäuser Wohngebäude mit nicht mehr als 4 Wohnungen, bis maximal 3 Geschosse in Höhe und einem Kellergeschoss
2	Gebäude für Wohnzwecke mit maximal 4 Geschossen und einem Kellergeschoss, ausgenommen Gebäude, die permanent Personen beherbergen, die zum Verlassen des Gebäudes Hilfe benötigen
3	Wie Gebäudetyp 2, jedoch Gebäude, welche permanent Personen beherbergen, die zum Verlassen des Gebäudes Hilfe benötigen

Die Begrenzung der zu berücksichtigen Sprinkler ist eine Besonderheit und nach Meinung des Autors einer der positivsten Ansätze der Richtlinie. Die Verringerung der hydraulisch zu berücksichtigen Sprinkler bewirkt eine kleinere Wasserversorgung, Pumpen und Dimensionierung der Rohrleitungen. Es sind ausschließlich VdS-anerkannte schnellansprechende Sprinkler (RTI <50) einzusetzen.

Bild 3 Verdeckter Sprinkler

Bild 4 Sprinkler hängend

Als wesentlicher Vorteil speziell für die Nachrüstung von Sprinkleranlagen ist der Ort der Sprinklerzentrale zu benennen. Hier besteht die Möglichkeit, die Pumpenanlage in dem zu schützenden Bereich in einem separaten Raum mit feuerhemmender Abtrennung aufzustellen. Die Betriebszeit der Anlage beträgt 30 Minuten, kann jedoch aufgrund höherer Anforderungen im Brandschutzkonzept verlängert werden.

Aufgrund der reduzierten Anzahl der berechneten Sprinkler sind die Flächen für die Pumpenanlage und die Wasserversorgung sehr klein. Man kann davon ausgehen, dass in der Regel nicht mehr als 500 l/min bei der größten Wirkfläche von 4 Sprinklern benötigt werden. Demzufolge sind nur ca. 5 bis 8 m² für die Pumpenzentrale einzuplanen. Die Pumpenleistung wird zwischen 2 bis 5 kW liegen und entspricht damit der Größe des E-Anschlusses einer Waschmaschine oder Sauna. Die Mindestgröße des Zwischenbehälters beträgt 3 m³.

Bild 5 Sprinklerzentrale mit 3 m³ Zwischenbehälter

BEISPIEL EINES MUSTERPFLEGEHEIMES

Exemplarisch wird das Pflegeheim in Bild 6 betrachtet, das für ca. 20 Personen ausgelegt ist. Für ca. 400 m² Grundfläche werden ca. 58 Sprinkler benötigt. Wir gehen davon aus, dass die Sprinklerzentrale in dem geschützten Geschoss untergebracht werden kann.

Bild 6 Beispiel eines Musterpflegeheimes

Die Kosten für die gesamte Sprinkleranlage belaufen sich auf ca. 50 bis 60 TEUR für einen Neubau. Der Vorteil liegt auf der Hand: die baulichen Abtrennungen zwischen den Raumgruppen sowie die Qualitäten der Türen können reduziert werden [9]. Die oft behauptete Kostenintensität von Sprinkleranlagen ist nicht gegeben, der Quadratmeterpreis beträgt ca. 15 EUR und ist nicht höher als z. B. der Preis für Bodenbeläge.

ZUSAMMENFASSUNG

Die neue VdS Richtlinie für Wohnbereiche wird insbesondere für Gebäude mit hilfebedürftigen Personen einen erhöhten Schutz bringen. Die beschriebene Sprinkleranlage für kleinere Gebäude unterstützt das Personal sowie die Feuerwehren und Rettungskräfte im Brandfall und reduziert die Folgen des Brandes. Des Weiteren sind die geringen Kosten attraktiv für Bauherrn und Betreiber dieser Heime. Sprinkleranlagen sind ein notwendiger Schritt zum Brandschutz der Zukunft, gerade hinsichtlich der demografischen Veränderungen durch Überalterung der Gesellschaft und des fehlenden Personals. Sprinkleranlagen bieten entsprechend den Statistiken der Versicherer eine Zuverlässigkeit von 98 %. Keine andere Brandschutzmaßnahme kann diese hohe Zuverlässigkeit über die Dauer des Bestehens des Gebäudes aufweisen! Grundlagen hierfür sind die unzähligen Realbrandversuche und Erfahrungen aus vielen Jahrzehnten des Einsatzes von zugelassenen Systemen und Komponenten sowie der hohe Standard der anerkannten Errichterfirmen für Sprinkleranlagen:

SPRINKLER RETTEN LEBEN

LITERATUR

[1] VdS Richtlinie Sprinkleranlagen für Wohnbereiche 2896

[2] BRE Global Client report number 264221 2012

[3] NFPA Fire Analyses and Research Division: Facilities that care for the Aged. 2001

[4] 12. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung (Statistisches Bundesamt (2009)

[5] Auswirkungen auf Krankenhausbehandlungen und Pflegebedürftige im Bund und in den Ländern, Ausgabe 2010 (Statistische Ämter)

[6] Nowossadeck, E., Robert Koch Institut, Berlin,18.Juli 2013

[7] BauO NRW

[8] Jahn, Stefan: Brandschutz in Einrichtungen mit hilfebedürftigen Personen im internationalen Vergleich. Masterarbeit

[9] Richtlinie über bauaufsichtliche Anforderungen an den Bau und Betrieb von Einrichtungen mit Pflege- und Betreuungsleistungen Stand 17.03.2011

VORSCHRIFTEN ZUM MEHRGESCHOSSIGEN HOLZBAU IN DER SCHWEIZ

Reinhard Wiederkehr
Makiol + Wiederkehr, Beinwil am See (Schweiz)

AUSGANGSLAGE

Das moderne, mehrgeschossige Bauen mit Holz findet im urbanen Umfeld zunehmend Akzeptanz. Bauherren, Planer und Ausführende entscheiden sich vermehrt für dieses erneuerbare und ökologisch wertvolle Material.

In den vergangenen Jahren wurden neue Erkenntnisse bezüglich der Brandsicherheit von Holzbauten gewonnen. Dies hat zu einer Neubeurteilung der Holzanwendung in der Schweiz durch die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF geführt. Die aktuellen Schweizerischen Brandschutzvorschriften (seit 1. Januar 2005 in Kraft gesetzt) berücksichtigen den Baustoff Holz deutlich besser als bis anhin. Neben einer Reihe von Neuerungen für den Baustoff Holz wurde von der VKF die europäische Regelung für die Bewertung der Bauteile übernommen und eingeführt.

Diese Neuerungen machen sechsgeschossige Wohn-, Büro- und Schulbauten in Holzbauweise möglich.

GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG

Der Brandschutz im Holzbau hat in den vergangenen Jahrzehnten in der Schweiz bedeutende Entwicklungen durchgemacht. 1983 wurde die F 30-Zulassung für Stabkonstruktionen aus Holz eingeführt. Zehn Jahre später wurden Wände und Decken aus Holz als brandabschnittsbildende Bauteile mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten möglich – damals ein bedeutender Schritt für den neuzeitlichen Holzbau. Zwei- bis dreigeschossige Bauten aus Holz wurden auf der Stufe der Standardanforderungen möglich.

Die aktuellen Vorschriften bringen seit dem Jahre 2005 eine weitere Öffnung für das Holz im Bauwesen: Holzbauteile mit 60 Minuten Feuerwiderstand. Damit sind unter anderem Holzbauten bis zu sechs Geschossen in definierten Nutzungen umsetzbar. Diese Entwicklung war von einer bewussten und gelenkten Strategie und nach dem Grundsatz geprägt, eine kontrollierte Entwicklung von Holz nachhaltig zu fördern, um Marktanteile zu gewinnen. Wesentlich und unangetastet bleibt der Grundsatz, einen einwandfreien Schutz für Personen, Tiere und Sachwerte zu planen und zu erhalten. Nur so bleibt ein dauerhafter Erfolg für den neuzeitlichen Holzbau gewährleistet.

Dank der guten Kommunikation zwischen der Brandschutzbehörde (VKF, Kantonale Brandschutzbehörden) und der Holzbranche (Lignum, Holzwirtschaft Schweiz) entspannte sich in den letzten Jahren das Verhältnis zwischen der Forderung nach einem wirkungsvollen Brandschutz und jener nach Holzanwen-

dung merklich. Auf der Basis des gegenseitigen Vertrauens und der gemeinsamen Zielsetzung „Brandsicheres, mehrgeschossiges Bauen in Holzbauweise“ hat die VKF diverse Anliegen der Holzbauseite in den Brandschutzvorschriften berücksichtigt.

DAS PROGRAMM „BRANDSICHERHEIT UND HOLZBAU“

Die Grundlagen für die heutige Epoche im Themenkreis Holz und Brandschutz wurden durch das Projekt „Brandsicherheit und Holzbau“ geschaffen, das von der Lignum, Holzwirtschaft Schweiz und dem Förderprogramm holz 21 des BAFU im Jahr 2000 lanciert wurde. Antreibend war die Aussicht, durch das mehrgeschossige Bauen, das technologisch mit Holz durchaus möglich ist, die Holznachfrage zu steigern. Dem gegenüber stand die Einsicht, dass für den Eintritt in die Mehrgeschossigkeit die Brandschutzvorschriften für das Holz entscheidend sind. Die wichtigsten Absichten waren deshalb:

- Materialgerechte und schutzzielorientierte Berücksichtigung des Baustoffs Holz in den Brandschutzvorschriften 2003,
- Gewährleistung der Sicherheit durch Forschung und Entwicklung,
- Erarbeitung von Dokumenten zur Umsetzung und Ausbildung,
- Einführung einer wirkungsvollen Qualitätssicherung.

Die gesamte schweizerische Holzbranche stellte sich hinter dieses Vorhaben und war bereit,, die dafür nötige Forschung, Ausbildung, Qualitätssicherung und Kommunikation zu betreiben. Diese Tatsache war für die Zusammenarbeit zwischen Holzbauern, Planern und den Brandschutzbehörden sehr vertrauensbildend.

Das Projekt ist unterteilt in sieben Projektsegmente und rund 30 Teilprojekte. Bild 1 zeigt einen Überblick über die Projektsegmente.

Projektphase 1 fand mit der Einführung der Brandschutzvorschriften VKF 2003 per 1.1.2005 ihren Abschluss. Das Teilziel einer kontrollierten Öffnung für das Holz bei Bauteilen mit 60 Minuten Feuerwiderstand und beim Einsatz in Außenwandbekleidungen wurde erreicht. Phase 2 mit dem Schwerpunkt Forschung und Entwicklung ist praktisch abgeschlossen. Momentan laufen die Projektphasen 3 und 4, in denen die Publikation von Planungshilfen und Stand-der-Technik-Papieren sowie der diesbezügliche Wissenstransfer im Vordergrund stehen.

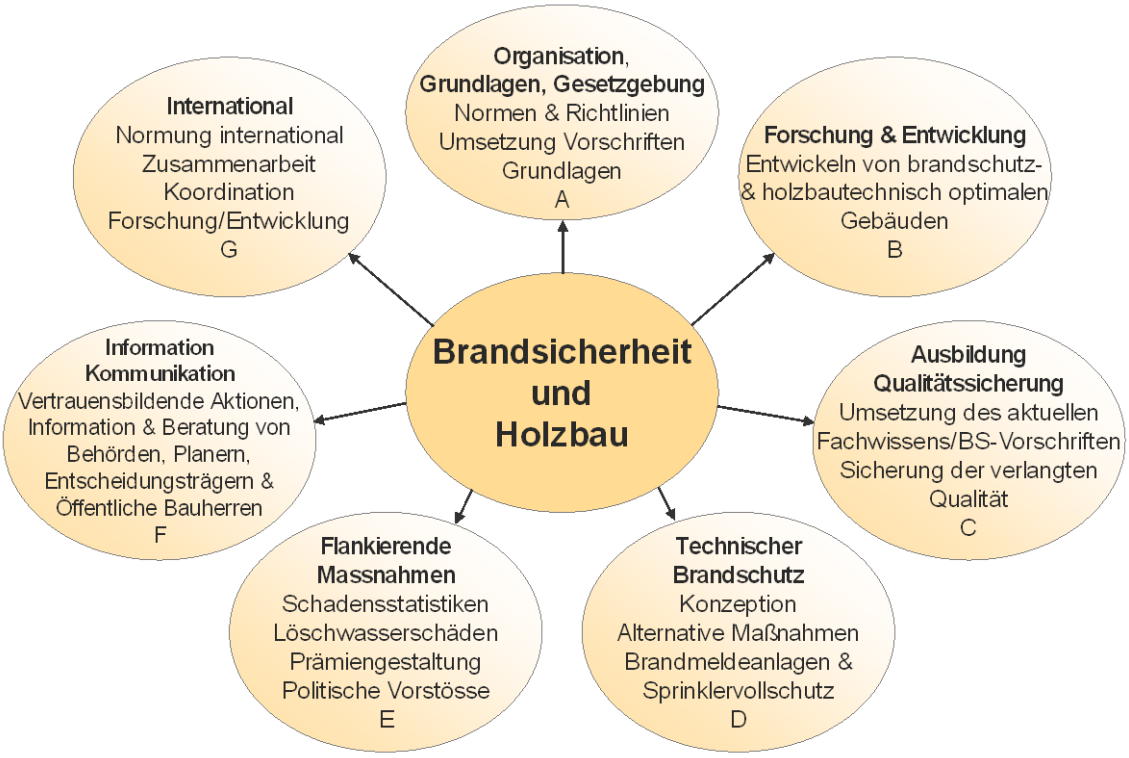


Bild 1 Die Projektsegmente des Gesamtprojekts „Brandsicherheit und Holzbau“

Das Projekt „Brandsicherheit und Holzbau“ ist breit abgestützt. Für die Durchführung zeichnet Lignum, Holzwirtschaft Schweiz verantwortlich. Wichtigster Träger ist holz 21, ein auf die Förderung der Forst- und Holzwirtschaft ausgelegtes Programm des Bundes; weiter beteiligen sich alle maßgebenden Verbände der Holzbranche und zahlreiche Firmen am Projekt. Mit der VKF wird ein intensiver Kontakt gepflegt zwecks Informationsaustausch und strategischer Ausrichtung des Projektes. In den Teilprojekten sind namhafte Institute aus dem In- und Ausland involviert. Das Interesse verschiedener Verbände aus dem Ausland am Projekt oder Teilen davon zeugt von der Vorreiterrolle und der internationalen Ausstrahlung des Projekts.

Eine Schlüsselrolle spielt der Fachausschuss „Brandschutz im Holzbau, VKF, SIA, Lignum“. Er koordiniert und begleitet die Entwicklung im Bereich Brandschutz und Holzanwendung und leitet die inhaltliche Ausrichtung des Gesamtprojektes „Brandsicherheit und Holzbau“. Hier sind Vertreter aller wichtigen Gruppen – nämlich der Holzwirtschaft, der Brandschutzbehörden und der Planer – zusammengeschlossen und in die strategische Ausrichtung eingebunden.

GRUNDLAGEN FÜR DEN ERFOLG

Als Basis für den Erfolg können folgende Punkte aufgelistet werden:

- Klare Zielsetzung bezüglich des technisch und wirtschaftlich Sinnvollen und Machbaren,
- Gesamtheitliche Koordination der Entwicklung durch eine verbandsübergreifende Dachorganisation (Lignum; Holzwirtschaft Schweiz),
- Konzentration der vorhandenen Mittel und Ressourcen auf das Wesentliche,
- Qualität kommt vor Quantität,
- Aus- und Weiterbildung auf allen Stufen,
- Zielgerichtete Forschung und Entwicklung mit direktem Bezug zur Praxis,
- Tendenz zur 2000-Watt-Gesellschaft,
- Keine Fokussierung auf den reinen Wohnbau, sondern ebenfalls auf den Schul- und Gewerbebau,
- Glaubwürdige Public Relation,
- Hohes Verantwortungsbewusstsein der planenden und ausführenden Fachleute.

Die obenstehende Aufzählung kann sicher erweitert werden und stellt keine Rangfolge oder Prioritätenliste dar.

WEITERBILDUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG

Die Weiterbildung gewinnt in zunehmendem Maße an Bedeutung. Ein von der Lignum initiiertes Weiterbildungsangebot wurde unter der Leitung der Berner-Fachhochschule Architektur, Holz und Bau zusammen mit Holzbau Schweiz und der Schweizerischen Bauschule Aarau aufgebaut und kann laufend von Planern, Konstrukteuren und Holzbauern genutzt werden (Ausbildung CAS Brandschutz-Fachleute im Holzbau; Modulkurse Brandsicherheit und Holzbau). Die zunehmende Teilnahme von Behördenvertretern an dieser Holz-Branchenweiterbildung zeigt die hohe Akzeptanz und fördert das gegenseitige Vertrauen.

Das Thema Qualitätssicherung und Brandschutz muss von Planern und Ausführenden ganz oben auf die Prioritätenliste bei der Realisierung von Holzbauten gesetzt werden. Bei 5- und 6-geschossigen Bauten mit brennbaren Tragwerken ist der Einsatz eines anerkannten Fachingenieurs als Kontrollorgan obligatorisch. Es muss jedoch bei allen Bauten dafür gesorgt werden, dass die Brandsicherheit gewährleistet ist. Brandereignisse aufgrund von Planungs- oder Ausführungsfehlern dürfen während der Bau- oder Nutzungsphase von Holzbauten nicht auftreten. Der in den letzten Jahren sorgfältig aufgebaute und gute Ruf der Holzbaubranche bei den Brandschutzbehörden könnte so rasch wieder verloren gehen.

SICHTBARES HOLZ IN DER FASSADE

Im Fassadenbereich ist es heute möglich, Holz bis zu acht Geschossen bzw. bis zur Hochhausgrenze einzusetzen. Auch hier müssen die Brandschutzvorgaben konsequent umgesetzt werden. Es ist zu beachten, dass nicht nur brandschutztechnische Regeln bestehen, sondern dass Fassaden aus Holz ab vier Geschossen nur in Absprache mit den Brandschutzbehörden möglich sind. Zudem sind die Grundregeln des Holzschutzes zu beachten. Fassaden sind Visitenkarten von Gebäuden und lösen beim Betrachter entsprechende Gefühle aus. Schnell erkennbare Fehler, die auf eine mangelhafte Materialauswahl oder fehlende Schutzmaßnahmen zurückzuführen sind, zementieren Vorurteile gegenüber dem Bau- und Werkstoff Holz.

GEDANKEN AUS DER PRAXIS FÜR DIE ZUKUNFT

Aus der Sicht der „Verwendung brennbarer Baustoffe“ und insbesondere für der Anwendung von Holz im Hochbau lassen sich folgende Wünsche für zukünftige Brandschutzvorschriften formulieren:

- Einschränkungen in der Anwendung nicht basierend auf Emotionen begründen,
- Klare und realistische Schutzziele formulieren,
- Sich bewusst sein, dass die Benutzung von Gebäuden immer das Vorhandensein von brennbaren Stoffen zu Folge hat,
- Akzeptieren, dass brennbare Baustoffe nie alleine einfach zu brennen beginnen,
- Vermehrt gesamtheitliches Denken in Brandschutzkonzepten fördern und sich nicht einfach auf die Frage: „brennbar oder nicht brennbar“ konzentrieren.

Abgeleitet aus diesen Wünschen ergibt sich vereinfachend und stichwortartig zu folgenden Themen Handlungsbedarf:

- Feuerwiderstandsklassierung von Bauteilen unabhängig der Brennbarkeit,
- Anwendungen von brennbaren Baustoffen für tragende und brandabschnittsbildende Bauteile bei mehrgeschossigen Gebäuden,
- Vereinfachung der Brandschutzrichtlinie „Verwendung brennbarer Baustoffe“,
- Praktikable Regelungen für die Anwendung von brennbaren Baustoffen in Fluchtwegen,
- Schutzabstände zwischen Gebäuden,
- Haustechnische Anlagen,

- Atrien und Doppelfassaden,
- Bedachungen,
- Verwendung brennbarer Dämmungen.

Heute zeichnet sich ab, dass bei der Überarbeitung der Schweizerischen Brandschutzvorschriften VKF (Einführung ab 2015) der Einsatz von brennbaren Stoffen gesamtheitlich diskutiert und umfassend, aber einfach geregelt wird. Der heutige Stand der Technik soll entsprechend berücksichtigt werden. Aus den Erkenntnissen der Vergangenheit kann man lernen. Moderne Vorschriften sollten aber zukünftige Bauweisen, Bauaufgaben und Nutzungen nicht mit veralteten Denkweisen verhindern.

GEÄNDERTE EINSATZMÖGLICHKEITEN

Die Einsatzmöglichkeiten von Holz haben sich massiv verbessert. Die Mehrgeschossigkeit eröffnet dem Holzbau bedeutende Marktsegmente, insbesondere bei Bürobauten und Wohnsiedlungen.

Der Schweizer Baumeisterverband hat für 2012 aus kritischer Distanz einen Anteil von 5,1 % für Tragkonstruktionen aus Holz bei neuen Mehrfamilienhäusern erhoben. Die Holzbauweise ist in diesem Bereich damit zwar noch immer ein Nischenprodukt, sie hat ihren Marktanteil seit 2005 aber fast verdoppelt. Der mehrgeschossige Holzbau befindet sich offensichtlich auf einem ausgesprochenen Wachstumspfad. Jedes Jahr entstehen in der Schweiz seit 2005 schätzungsweise mindestens 300 Mehrgeschosser mit Holz – einschließlich der verbreiteten Hybridbauten mit Holz dürften es wohl eher gegen 500 sein. Mehrfamilienhäuser haben 2011 bereits den größten Holzbedarf des Baubereichs erreicht. Nicht nur in der Konstruktion, auch im Innenausbau und in der Verwendung im Außenbereich hat die Holzverwendung nachweislich zugelegt. Im Übrigen wird Holz auch bei An- und Umbauten von Mehrfamilienhäusern immer beliebter. Sein Marktanteil an den Tragkonstruktionen liegt in diesem Feld – wiederum gemäß Zahlen des Baumeisterverbandes – mittlerweile bei einem Drittel. Damit hat er sich in den letzten sieben Jahren mehr als verdoppelt.

Neben der reinen Statistik lassen sich auch qualitative Entwicklungen beobachten, die vielleicht fast noch mehr über die Marktentwicklung beim mehrgeschossigen Bauen mit Holz aussagen. So wird bei genauerem Hinsehen ein Quantensprung beim Umfang der Bauobjekte sichtbar. Allein im Großraum Zürich wurden in den letzten zwei, drei Jahren mehrere Objekte mit 150 bis 200 Wohneinheiten realisiert. Die 2005 definierte baurechtliche Grenze von sechs Geschossen ist praktisch Standard geworden. Das nahe europäische Ausland zeigt zurzeit, dass Holzbauten durchaus auch noch höher werden können. Grundlage dieses Erfolgs sind neben der Normalisierung von Holz als Baustoff unter dem Aspekt Brandschutz eine Reihe technischer Fortschritte, von der Entwicklung moderner Holzwerkstoffe über die konsequente Anwendung der Systembauweise auf alle Gebäudeteile bis hin zur vollständig digitalisierten

Produktionskette mit maßgenauer Vorfertigung von Elementen in der Werkhalle. Der unaufhaltsame Trend zum ‹Green Building› eröffnet dem nachwachsenden Baumaterial Holz zusätzliche Chancen. Ebenso bedeutsam ist der Trend zur umfassenden Energie- und Treibhausgas-Bilanzrechnung sowie zur Lebenszyklus-Betrachtung bei Bauwerken. Konzepte wie die 2000-Watt-Gesellschaft lassen sich, pointiert gesagt, ohne Holz gar nicht vernünftig umsetzen.

Dieser positive Trend kann sich fortsetzen, falls die Branche weiterhin positive Zeichen setzt. Mit dem unter der Federführung der Lignum durchgeführten und international vernetzten Forschungsprojekt „Brandsicherheit im Holzbau“ wurden wissenschaftlich abgesicherte Grundlagen erarbeitet. Daraus entstanden hervorragende Planungsinstrumente (Lignum-Dokumentation Brandschutz), die von der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherung (VKF) als Stand der Technik anerkannt sind. Entscheidend und für die Holzbranche motivierend ist, dass die VKF klar signalisiert, die positiven Erfahrungen mit dem mehrgeschossigen Holzbau in der neuen Brandschutzvorschriftengeneration (ab 2015) zu berücksichtigen.

LITERATUR

[1] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, Brandschutzvorschriften Ausgabe 1993, (Norm und Richtlinien); VKF; Bern

[2] Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen, Schweizerische Brandschutzvorschriften VKF, gültig seit 01.01.2005; VKF; Bern; www.vkf.ch

[3] SIA/Lignum Dokumentation 83, Ausgabe 1997 „Brandschutz im Holzbau“; Lignum, Zürich

[4] Lignatec, Lignum-Dokumentation Brandschutz, Bauten in Holz – Brandschutz-Anforderungen, Lignum, 2005, Zürich; www.lignum.ch

[5] Lignum-Dokumentation Brandschutz, 4.1 Bauteile in Holz – Decken, Wände und Bekleidungen mit Feuerwiderstand, Lignum, 2007, Zürich; www.lingum.ch

[6] Lignum Dokumentation Brandschutz, Bauen mit Holz – Qualitätssicherung und Brandschutz, Lignum, 2005, Zürich; www.lignum.ch

[7] Wiederkehr R.: Holzbau-Beispiele in der Schweiz, 8. DGFH Brandschutztagung 1998 in Nürnberg, DGFH München

[8] Kotthoff I.: Brandausbreitung an Fassaden, Verwendung von Holz an der Aussenwand aus brandschutztechnischer Sicht, 9. DGfH-Brandschutztagung 2001, DGfH, München

[9] Wiederkehr R.: Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau, Brandschutzkonzepte für Holzbauten in der Schweiz, 9. DGFH Brandschutztagung 2001 in Würzburg, DGFH München

[10] Wiederkehr R., Kotthoff I.: Brandverhalten von Holzfassaden, 10. DGfH Brandschutztagung 2004 in Berlin, DGfH, München

[11] Bart B.: Brandschutz: Forschung und Entwicklung, 36. Fortbildungskurs SAH – Gebäudehüllen in Holz, SAH, Dübendorf 2004

[12] Wiederkehr R.: Brandschutzanforderungen an Holzfassaden, 36. Fortbildungskurs SAH – Gebäudehüllen in Holz, SAH, Dübendorf 2004

[13] Fontana M., Starck Ch.: Brandschutz im Holzbau – Grundlagen, Forschung und Umsetzung, 37. Fortbildungskurs SAH – Brandschutz im Holzbau, SAH, Dübendorf 2005

[14] Kolb J.: Neue Schweizerische Brandschutzvorschriften – Neuerungen und Fortschritte, 37. Fortbildungskurs SAH – Brandschutz im Holzbau, SAH, Dübendorf 2005

[15] Wiederkehr R.: Umsetzung Fassadenkonstruktionen, 37. Fortbildungskurs SAH – Brandschutz im Holzbau, SAH, Dübendorf 2005

[16] Kotthoff I., Wiederkehr R.: Brandschutz im Holzbau, Brandsichere Anwendung von Holz an der Fassade, 10.Internationales Holzbau-Forum, Garmisch-Partenkirchen, 2004, Frauenhofer Verlag, Stuttgart

[17] Furrer B., Kolb J., Wiederkehr R.: Neues für den Holzbau in den Schweizerischen Brandschutzvorschriften, im Schweizer Holzbau Ausgabe 2/2005; AG Verlag Hoch- und Tiefbau, Zürich

[18] Diverse Autoren: Berichte zu MFH Holzhausen in Steinhausen, im Schweizer Holzbau Ausgabe 9/2006, AG Verlag Hoch- und Tiefbau, Zürich

[19] Diverse Autoren: Projektdokumentation zu MFH Holzhausen in Steinhausen, Renggli AG, 2006 Sursee (CH)

[20] Makiol + Wiederkehr; Konstruieren mit Holz 1992-2012, Lignum, Zürich 2012

UNTERSUCHUNG VON BRÄNDEN AN FASSADEN IM AUFTRAG DER BAUMINISTERKONFERENZ – ERSTE ERGEBNISSE

Peter Bachmeier
Branddirektion München, München

EINLEITUNG

Spektakuläre Brandereignisse von Wärmedämmverbundsystemen aus Polystyroldämmplatten führten dazu, dass die Sicherheit dieser Systeme kritisch hinterfragt wurde.

Die Bauministerkonferenz (BMK) führte dazu im September 2012 aus [1]: „Ein weiterer Beratungspunkt befasste sich mit dem Brandverhalten von Wärmedämmverbundsystemen mit Polystyroldämmstoffen. Die Bauministerkonferenz stellt fest, dass Wärmedämmverbundsysteme mit Polystyroldämmstoffen ordnungsgemäß zertifiziert und bei der zulassungsentsprechenden Ausführung sicher sind. Gleichwohl nimmt sie die Brandereignisse mit solchen Wärmedämmverbundsystemen ernst.

Die Bauministerkonferenz beauftragt den Ausschuss für Stadtentwicklung, Bau- und Wohnungswesen unter Einbeziehung der Feuerwehr, alle relevanten Brandereignisse von Wärmedämmverbundsystemen mit Polystyroldämmstoffen unter Berücksichtigung der besonderen Umstände und Gefahren bei Montagezuständen zu untersuchen. Sofern angezeigt, sind konkrete Handlungsempfehlungen auszusprechen.“

Die daraufhin konstituierte Projektgruppe „Brandverhalten von WDVS mit Polystyroldämmplatten“ (PG WDVS) wurde mit je zwei Vertretern aus den Fachkommissionen Bautechnik und Bauaufsicht, der Feuerwehr sowie einem Vertreter des Bundes besetzt.

UNTERSUCHUNG DER BRANDEREIGNISSE

Zum Startzeitpunkt der PG WDVS lagen als Datengrundlage 18 von der Branddirektion Frankfurt im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren (AGBF) erfasste Brandfälle vor.

Zu unterscheiden sind bei der Beurteilung der jeweiligen Brandfälle die an das jeweilige WDVS gestellten Anforderungen an das Brandverhalten. So sind die Brandfälle der Gebäudeklassen 1-3 (Anforderung in der Regel normalentflammbar) getrennt von denen der Gebäudeklassen 4 und 5 (bei Standardbauten Anforderung schwerentflammbar) zu bewerten.

Zusammenstellung von Brandereignissen in Verbindung mit WDVS im Auftrag von AGBF-Hessen, AGBF-Bund, Deutscher Feuerwehrverband e.V.

Datum/ Uhrzeit	Einsatzstelle	Brandobjekt	Brandausbruch	Verletzte	Sachschäden	Bemerkungen
In den verg. 6 Jahren	2 Fassaden-brände, Gießen	keine Fotos vorhanden	Brennender Müllcontainer vor der Fassade	keine	nicht bekannt	Dämmschichtdicken 5-8 cm Brände konnten auf eine Fläche von ca. 5m² begrenzt werden
21.05.2005 01:50	Treskowstraße 33, Berlin	 Foto: Berliner Feuerwehr	Wohnungsbrand im 2. OG (Brandursache: Kerze auf Fernsehgerät)	2 Tote, 3 Verletzte	In Millionenhöhe	80 mm Polystyrol, verlorene Schalung (25mm Spanplatten) und zementgebundene Holzfaserplatten im Treppenraum, vermutl. B1 Zimmerbrand entwickelte sich innerhalb von ca. 20 Min. zum Vollbrand der Fassade mit Brandausbreitung in alle darüber liegenden Geschosse 87 Personen gerettet (u.a. Sprungretter, Schiebleiter und HöRG im Einsatz)
26.12.2005 16:41	2 Brände im gleichen Objekt, Filderstadt	 Foto: Feuerwehr Filderstadt	Wohnungsbrand im 2.OG	2 Verletzte	nicht bekannt	„Alcan-Fassade E-200" mit DIBt-Zulassungsbescheid Z-33.1-10 vom 01.12.1985, eingestuft in B1 Verlorene Schalung, 31 bzw. 38 mm Polystyrol-Hartschaumplatten, Sichtblenden aus Aluminium Wohnungsbrand zündet durch, durch geborstene Scheiben Brandausbreitung auf Loggia und über die Fassade in die Wohnung im 3.OG
und 02.05.2012		Keine Fotos erhalten	Brand auf Balkon im 5.OG	keine	nicht bekannt	Fassade auf mehrere m² weggeschmolzen, keine Brandausbreitung, da Entstehungsbrand von Bewohnerin gelöscht

Bild 1 Erfassungsübersicht der Brandfälle

In einem Fall handelt es sich um kein klassisches WDVS ohne planmäßige Hinterlüftung, so dass dieser Brandfall für die Bewertung nicht herangezogen werden kann. Auch muss der Baustellenbetrieb mit noch nicht fertig gestellten Systemen eine gesonderte Betrachtung erfahren.

Die entscheidende Fragestellung dürfte sein, ob bei den bekannten gravierenden Brandfällen die baurechtlichen Schutzziele erfüllt wurden oder ob es sich um nicht akzeptable Brände handelte. Die Schutzziele der Musterbauordnung schließen weder die Entstehung noch die Ausbreitung eines Brandes aus. Es muss lediglich der Entstehung und Ausbreitung ausreichend vorgebeugt werden und es müssen die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Lösch- und Rettungsarbeiten möglich sein. Allein hieraus kann abgeleitet werden, dass eine unterschiedliche Bewertung der einzelnen Brandereignisse nicht auszuschließen ist (zulässiges Restrisiko oder unverantwortliche Brandereignisse?).

Aber auch vermeintlich kleine Brandereignisse dürfen nicht automatisch als Bestätigung eines funktionierenden Systems herangezogen werden. Hat sich im konkreten Fall wirklich das System bewährt oder war lediglich die Feuerwehr besonders schnell vor Ort und hat weiteren Schaden verhindert (Bild 2)?

Bild 2 *Abbrand weniger Quadratmeter eines WDVS; Eintreffen der Feuerwehr deutlich unter der Hilfsfrist (hier festgelegt auf 10 Minuten)*

Aus Sicht der Feuerwehren ist besonders zu beachten, dass ein Fassadenbrand rasch zu einem Ereignis führen kann, der über dem Bemessungsereignis vieler Brandsschutzbedarfspläne liegt. Dieses Bemessungsereignis geht von einem Wohnungsbrand mit verrauchten Rettungsweg (mit möglichen Personenschäden) aus, der sich im Obergeschoss befindet und bei dem eine Nutzungseinheit direkt und weitere indirekt betroffen sind. Fassadenbrände haben jedoch vereinzelt dazu geführt, dass bereits beim Eintreffen der Feuerwehr sich der Brand auf zahlreiche Nutzungseinheiten ausgedehnt hatte und die horizontale Brandentstehung wirkungslos blieb.

SACHSTAND AUS SICHT DES VERTRETERS DER FEUERWEHR IN DER PG WDVS

1. Bei allen bisher bekannten Brandereignissen von WDVS mit Polystyroldämmplatten wird deutlich, dass bei einem intensiven Wärmeeintrag in das WDVS die Ausführung der Putzschicht und der untere Abschluss eine wesentliche Rolle spielten. Aus diesem Grund kommt den bisher bereits durchgeführten Naturbrandversuchen bei der Risikoeinschätzung eine besondere Bedeutung zu. Die Laborprüfanforderungen zum Nachweis der Schwerentflammbarkeit basieren auf Brandszenarien, die nicht dazu führen, dass das Polystyrol großflächig schmilzt. Aber genau diese Schmelze könnte die Ursache für versagende WDVS bei mehreren Brandereignissen sein.

2. Die Prüf- und Zertifizierungsanforderungen beeinflussen das Brandverhalten der WDVS natürlich stark. Das bisherige Schutzziel, dass bei schwerentflammbaren WDVS das Feuer max. in das nächste Geschoss übergreifen darf, erscheint weiterhin der Logik des Baurechts geschuldet. Es dürfen ja auch interne Verbindungen zwischen zwei Geschossen hergestellt sein, die eine Brandübertragung ermöglichen. Als Referenzbrand wird bisher ein Raumbrand betrachtet, dessen Flammen auf das WDVS schlagen (Bild 3).

3. Aus Sicht der Feuerwehr ist ergänzend der Brand von außen zu betrachten. Dies ergibt sich deutlich aus den untersuchten Brandereignissen mit kritischem Brandverlauf. Ein üblicher Müllmischcontainer aus Kunststoff mit einer Energiefreisetzung von bis zu 2,4 MW und einer Branddauer von 20 min erscheint dabei als Referenzbrand geeignet. Führt ein entsprechendes Brandereignis zur Bildung einer Polystyrolschmelze, so kann dies ein Aufbrechen der Putzschicht bewirken, was zu einer massiven Befeuerung der Brandstelle führt und zum möglichen Ausfall der Brandriegel.

4. Die Inhalte der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung müssen auf der Baustelle natürlich auch bekannt sein und vollständig umgesetzt werden. Dies sollte durch die Bauaufsicht zumindest in Stichproben überprüft werden.

5. Ein kritischer Zustand ist dann gegeben, wenn ein Gebäude mit laufender Nutzung energetisch saniert wird. Polystyroldämmplatten auf Fassaden ohne Putzschicht weißen nicht annähernd die baurechtlich geforderte Sicherheit auf, so dass für jeden Einzelfall Kompensationsmaßnahmen zu treffen sind (Bilder 4 und 5).

Der viel diskutierte spektakuläre Brand in der Abdickesallee in Frankfurt fällt in diese Kategorie. Unter den dortigen Voraussetzungen ist bei einem Brand regelmäßig eine erhebliche Gefahr für Leben und Gesundheit zu unterstellen.

Bild 3 Raumbrand mit Flammenaustritt

Bild 4 Bewohntes Gebäude während der Sanierung

Bild 5 Bewohntes Gebäude während des Sanierungszeitraumes

SICHERHEIT VON WDVS AUS POLYSTYROLDÄMMPLATTEN

Nur ein Zusammenwirken mehrere Parameter führt zu sicheren WDVS mit Polystyroldämmplatten. Die Aussagen der Bauministerkonferenz vom September 2012, dass „.... Wärmedämmverbundsysteme mit Polystyroldämmstoffen ordnungsgemäß zertifiziert und bei der zulassungsentsprechenden Ausführung sicher sind“, trifft wohl hinsichtlich der Zertifizierungsanforderungen zu und beschreibt einen hohen Sicherheitsstandard bei der Zulassung von brennbaren WDVS in Deutschland. Dennoch erscheint es notwendig ein weiteres Referenzbrandereignis zu betrachten und vor allem auch die übrigen Komponenten bei der Risikobeurteilung von WDVS aus Polystyroldämmplatten mit einzubeziehen (Bild 6).

AUSBLICK

Die Umsetzung des weiteren Referenzbrandereignisses in Prüf- und Zertifizierungsvorgaben wird derzeit von einer Betreuergruppe „FV WDVS“ aus namhaften Spezialisten in der Baustoffprüfung erarbeitet. Hierzu werden mehrere Naturbrandversuche unter wissenschaftlicher Begleitung erforderlich sein.

Brandversuche ohne definierte Rahmenbedingungen und ohne abgestimmte Referenzbrandbelastungen erscheinen nicht zielführend, finden keine Akzeptanz und fördern nur Misstrauen in die Zuverlässigkeit der Systeme.

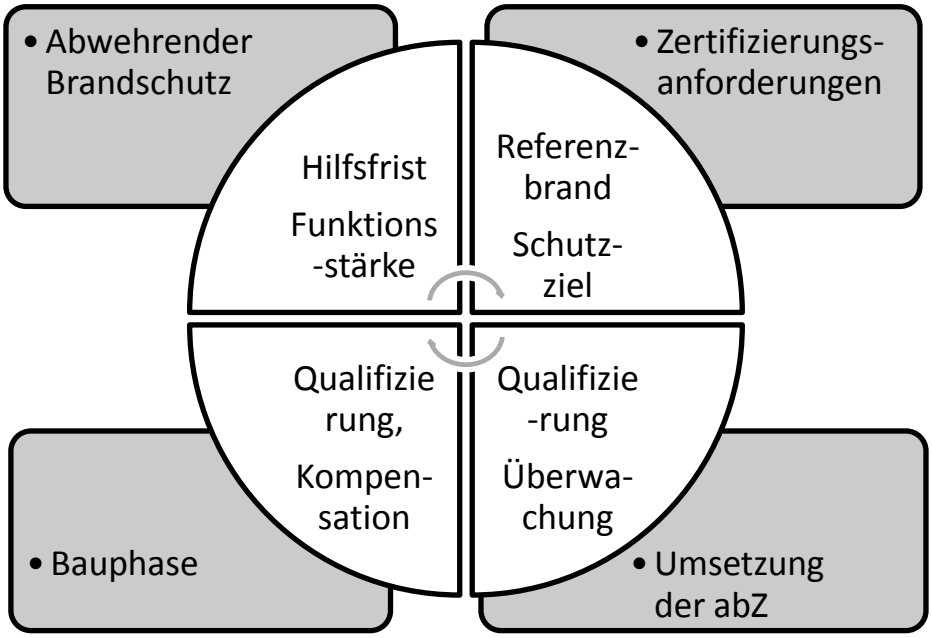


Bild 6 Einflussparameter bei der Risikobeurteilung

Wie bei allen Brandschutzmaßnahmen wäre auch hier wünschenswert, dass die Maßnahmen verifiziert werden könnten. Aufgrund der bisher fehlenden Brandschadenerfassung in Deutschland erfolgt bis auf weiteres eine Erfassung der WDVS-Brände durch die Feuerwehr Frankfurt.

Das Formblatt zum Download finden Sie auf der Homepage der AGBF/AK VBG oder der Feuerwehr Frankfurt/Projekte.

Es wird um Unterstützung bei der weiteren Erfassung gebeten. Auch Brandfälle der Vergangenheit sollten möglichst noch mit erfasst werden.

Die Bauministerkonferenz befasste sich zuletzt im März mit dem Sachstand zu WDVS aus Polystyroldämmplatten und veröffentlichte folgenden Zwischenstand [2]:

„Ein weiterer Tagesordnungspunkt der 124. (Sonder-) Bauministerkonferenz war das Brandverhalten von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) mit Polystyroldämmstoffen. Im Rahmen ihrer 123. Sitzung hatte die Bauministerkonferenz den Ausschuss für Stadtentwicklung, Bau- und Wohnungswesen (ASBW) beauftragt, unter Einbeziehung der Feuerwehr alle relevanten Brandereignisse dieser Wärmedämmverbundsysteme unter Berücksichtigung der besonderen Umstände und Gefahren bei Montagezuständen zu untersuchen. Es wurden insgesamt 18 Brandfälle untersucht, bei welchen als Brandszenarium die aus einer Wandöffnung schlagenden Flammen bei einem Wohnungsbrand zugrunde lagen. Die Analyse ergab, dass für diesen Fall die Anforderungen, die sich aus der Zulassung ergeben, für die in Frage stehenden Wärmedämmverbundsysteme hinreichend sicher sind. Aufgrund der Tatsache, dass es in der Vergangenheit auch Brandereignisse gab, die außerhalb eines Gebäudes aus-

gelöst wurden, hat die Bauministerkonferenz den ASBW beauftragt, die Versuchsreihe nun auch unter Naturbrandbedingungen zu veranlassen. „Wir erhoffen uns dadurch Aufschluss darüber zu erhalten, ob bestimmte Außenbrandszenarien, wie ein in Brand geratener Müllmischcontainer aus Kunststoff, zusätzliche Maßnahmen erfordern“, so die Vorsitzende der BMK Innenministerin Monika Bachmann. Nach Vorliegen der Untersuchungsergebnisse sollen in einem weiteren Schritt Vorschläge erarbeitet werden zur Verbesserung der Montage von Wärmedämmverbundsystemen aus Polystyrol sowie der Sicherheit auf Baustellen.“

LITERATUR

[1] Medien-Info 33/2012 der BMK

[2] Medien-Info 14/2013 der BMK

BILDNACHWEIS

Bild 1	Branddirektion Frankfurt
Bilder 2 bis 5	Branddirektion München
Bild 6	Grafik von Verfasser

SITZUNG 3

BRANDSCHUTZKONZEPTE
FÜR SONDERBAUTEN

Sitzungsleitung: H.-J. Gressmann, Abu Dhabi

BRANDSCHUTZKONZEPTE FÜR MASSENTIERHALTUNGSANLAGEN UND DEREN PRÜFUNG

Eckhard Hagen und Jens Upmeyer
Hagen Ingenieurgesellschaft für Brandschutz mbH, Kleve

EINLEITUNG - THEMENKONKRETISIERUNG

Mit der Zielsetzung der wirtschaftlichen Tierhaltung sind innerhalb der letzten Jahrzehnte die Stallgebäude und die in den Stallgebäuden enthaltenen Tierbestände deutlich gewachsen. Dadurch werden die in den Bauordnungen der einzelnen Bundesländer genannten Bezugsgrößen (10.000 m³ Gebäudevolumen oder 1.600 m² Grundfläche) in vielen Fällen kein Maßstab zur Gebäudebeurteilung mehr sein können.

Entsprechend der Gebäudeeinteilung der Musterbauordnung sind Stallgebäude in der Regel Gebäude der Gebäudeklasse 1 oder Gebäude der Gebäudeklasse 3. Als Sonderbauten sind sie dann einzustufen, wenn sie Grundflächen von mehr als 1.600 m² aufweisen.

In jedem Fall handelt es sich um Gebäude besonderer Art und Nutzung, die aufgrund des Haltens von vielen Tieren zur Tiermast oder zur Gewinnung von Tierprodukten Randbedingungen darstellen, die aufgrund der Art oder Nutzung Erleichterungen erfordern oder besondere Anforderungen zur Folge haben können.

Aus brandschutztechnischer Sicht können drei Typen der Tierhaltungsanlagen unterschieden werden:

- Tierhaltung in offenen Ställen (im Wesentlichen Kühe)
- Tiere in Käfigen (in der Regel Geflügel) und
- kleinere Tiere in Boxen für einzelne Tiere oder mehrere Tiere (Schweine)

Die unterschiedlichen Typen erfordern unterschiedliche Brandschutzkonzepte.

Im vorliegenden Beitrag wird das Hauptaugenmerk auf Anlagen zur Mast und zur Reproduktion von Schweinen gerichtet.

Diese Mastanlagen werden in unterschiedlichen Literaturstellen nach Größe unterschieden. Als große Tierhaltungsanlagen werden bspw. Tierhaltungsanlagen bezeichnet, die entsprechend dem Bundesemissionsschutzrecht als genehmigungspflichtige Anlagen eingestuft sind.

Für Tierhaltungsanlagen sind ggf. Brandschutznachweise als bautechnische Nachweise erforderlich, die wiederum unterschiedlich in den einzelnen Bundesländern einer bauaufsichtlichen Prüfung oder einer Prüfung durch Prüfingenieure oder Prüfsachverständige zu unterziehen sind.

Mit dem vorliegenden Beitrag wird die Thematik „Brandschutzkonzept für Tierhaltungsanlagen großer Ausdehnung und für sehr viele Tiere“ am Beispiel eines Schweinemastbetriebes betrachtet.

In Verbindung mit der Massentierhaltung werden aufgrund des Umgangs mit Tieren zahlreiche nicht brandschutztechnische Gesichtspunkte relevant und in der Öffentlichkeit diskutiert. Im vorliegenden Beitrag geht es ausschließlich um brandschutztechnische Aspekte.

SCHUTZZIELE - BAURECHTLICHE REGELUNGEN

Die im Zusammenhang mit großen Ställen zu erfüllenden Schutzziele hinsichtlich des Brandschutzes unterscheiden sich nicht von den Schutzzielen, die durch Brandschutzkonzepte für andere Gebäude sicherzustellen sind. Es gilt daher, der Entstehung von Brand und Ausbreitung von Feuer und Rauch vorzubeugen, die Rettung von Menschen und Tieren zu ermöglichen und wirksame Löschmaßnahmen zu ermöglichen.

Für das Erreichen der Schutzziele werden in baurechtlichen Regelwerken Maßnahmenkataloge zusammengestellt. Die sich aus einer besonderen Nutzung oder aus einer besonderen Art des Gebäudes ergebenden speziellen Maßnahmen sind für gewisse Typen von Gebäuden und für gewisse Nutzungen in Sonderbauvorschriften zusammengestellt. Derartige Sonderbauvorschriften sind für die hier betrachtete Gebäudenutzung nicht existent.

Ein üblicherweise nicht vorrangig betrachtetes Schutzziel, nämlich die Rettung von Tieren, ist in Anlagen zum Halten von Tieren und zur Aufzucht von Tieren besonders zu betrachten. Üblicherweise wird das Ermöglichen von Rettungsmaßnahmen (Selbst- oder Fremdrettung) dadurch garantiert, dass genügend Wege zum Freien in ausreichend kurzer Entfernung und ausreichender Anzahl, ggf. geschützt durch bauliche Maßnahmen, angeboten werden. Dieses Rettungsprinzip setzt voraus, dass in Verbindung mit der Selbstrettung die zu rettenden Lebewesen im Normalfall zielgerichtet die Rettungswege nutzen. Diese Voraussetzung ist bei der Rettung von Tieren in der Regel nicht gegeben.

Eine Rettung ist jedoch nicht nur durch ein Angebot von Rettungswegen zu ermöglichen. Vielmehr kann durch gewisse Maßnahmen dafür gesorgt werden, dass auch ein Verbleiben in gewissen Gebäudebereichen, die sicher sind, eine Rettung vor Gefahren durch Brand- und Rauchbeeinträchtigung bedeuten.

Im Übrigen werden derartige Konzepte auch bei der Menschenrettung verfolgt, nämlich dann, wenn aufgrund der Geometrie eines Gebäudes eine Rettung über Rettungswege nicht zielführend ist. Als Beispiele hierfür können besonders gesicherte Räume in sowohl vertikal als auch horizontal ausgedehnten Gebäuden angegeben werden. Ein weiteres Beispiel hierfür sind Sicherheitstreppenräume, mit denen regelkonform auf das Angebot eines zweiten Rettungsweges verzichtet werden kann, somit werden auch hier sichere Bereiche definiert.

Wenn auch rechtskräftig verordnete Sonderbauverordnungen oder erlassene Richtlinien für Massentierhaltungsanlagen nicht existieren, so findet man dennoch in baurechtlich weniger oder nicht verankerten Literaturquellen Hinweise und Empfehlungen für die Erarbeitungen von Brandschutzkonzepten für derartige Gebäude.

Als Beispiel hierfür seien Standards der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik aus den 1980er Jahren genannt. Hier sind Hinweise über Begriffe, bautechnischen Brandschutz und Brandlasten (TGL 10685) und spezielle Forderungen für Gebäude und Anlagen der Tierproduktion (TGL 43234) zusammengestellt.

Auch in einzelnen Bundesländern (bspw. Niedersachsen [5] und Nordrhein Westfalen [6] werden, ggf. auch auf regionaler Ebene, Diskussionen mit dem Ziel geführt, bei der Planung und Errichtung von Großstallanlagen einheitliche Bewertungsmaßstäbe zu erarbeiten.

Der Hamburger Bauordnung [7] als aktuelles baurechtliches Regelwerk ist § 35 (5) zu entnehmen, dass ins Freie führende Türen von Gebäuden, die für die Tierhaltung bestimmt sind, nach außen aufschlagen müssen und dass deren Zahl, Höhe und Breite so groß sein muss, dass die Tiere bei Gefahr ohne Schwierigkeiten ins Freie gelangen können. Hier ist offensichtlich auf eine Eigenrettung der Tiere abgezielt, was zumindest bei bestimmten Tierarten verhaltensbedingt nicht zielführend sein kann (vgl. Bild 1).

Bild 1 Boxenstall

BRANDSCHUTZKONZEPT FÜR EINEN MASTBETRIEB FÜR SCHWEINE – PRÜFUNG DES BRANDSCHUTZES

In Verbindung mit der Zusammenstellung von Brandschutzkonzepten werden für Masttieranlagen unterschiedliche Vorgehensweisen diskutiert: Von einigen Konzepterstellern wird ein Vorgehen entsprechend der Industriebaurichtlinie favorisiert, andere orientieren sich eher an der jeweiligen Landesbauordnung.

Die Orientierung an der Industriebaurichtlinie beinhaltet unbeachtet der Diskussion des Geltungsbereiches das Problem, dass bei Einsatz der Technischen Regel „Industriebaurichtlinie“ diese ganzheitlich umzusetzen ist. Die Industriebaurichtlinie ermöglicht zwar deutlich größere Brandabschnittsflächen, die in der Regel bei großen Ställen begründet werden müssen. Dieses Zugeständnis an die Brandabschnittsgröße geht aber einher mit hohen Anforderungen an anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen. Für die anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen existieren Technische Regeln. Diese 1:1 umzusetzen ist aus Kostengründen und auch aus anderen Gründen (Hygieneanforderungen mit Einschränkungen hinsichtlich der Einsetzbarkeit von Brandschutzklappen) schwierig. Darüber hinaus ist die Industriebaurichtlinie entsprechend ihrem Geltungsbereich auf Gebäude, die überwiegend offen sind, nicht anwendbar. Überwiegend offene Gebäude werden bspw. bei großen Ställen für Milchviehhaltung eingesetzt. Die Orientierung des Brandschutzkonzeptes an einer Landesbauordnung ist unter Berücksichtigung des Sonderbaucharakters i.d.R. einfacher. Falls die Grundfläche größer als 1.600 m² ist, ist das Gebäude in jedem Fall als Sonderbau einzustufen. Ansonsten ist es wegen der besonderen Nutzung als nicht geregelter Sonderbau anzusehen.

Aufgrund des Sonderbaucharakters können bspw. entsprechend § 51 MBO Erleichterungen gestattet werden, soweit es der Einhaltung von Vorschriften wegen der besonderen Art oder Nutzung oder wegen besonderer Anforderungen nicht bedarf. In keinem Bundesland ist für die diskutierte Nutzung eine Sonderbauverordnung eingeführt. Daher sind die abweichend von den Anforderungen der Landesbauordnung vorgesehenen Bauweisen und Schutzmaßnahmen in der Regel als Erleichterungen zu begründen, für die Abweichungsanträge nicht erforderlich sind.

Die Erleichterungen können sich erstrecken auf die Bauart und die Anordnung der für den Brandschutz wesentlichen Bauteile, die Verwendung von Baustoffen, Brandschutzanlagen und -einrichtungen, die Löschwasserversorgung und -rückhaltung, die Lüftung und Rauchableitung und die Anordnung und Herstellung von Rettungswegen.

Vor diesem Hintergrund wird ein spezielles Brandschutzkonzept vorgestellt, dass für einen sehr großen Schweinezuchtbetrieb erarbeitet und geprüft wurde. Die bauliche Randbedingungen und das Brandschutzkonzept bleiben im vorliegenden Beitrag anonym, da das baurechtliche Verfahren und die in diesem Zusammenhang weiteren Verfahren noch nicht abgeschlossen sind.

Bei dem betrachteten Gebäude handelt es sich um eine im Wesentlichen fertig gestellte Stallanlage für bis zu 45.000 Schweine. Insgesamt ist eine Fläche von ca. 45.000 m² überbaut worden. Die Gebäudeteile bestehen aus einem Sozialtrakt und aus in mehrere Abschnitte aufgeteilten Ställen. Die unterschiedlichen Ställe sind durch:

- einen Hauptgang, bestehend aus hochfeuerhemmenden Wänden und hochfeuerhemmender Decke,
- mehrere Zwischengänge und
- nichtbrennbare Wände unterteilt.

Der Gebäudekomplex wurde als ungeregelter Sonderbau bewertet. Es handelt sich um Gebäude der Gebäudeklasse 3.

Das Tragwerk des Stalles (Wände und Stützen) ist aus ungeschützten Stahlbauteilen errichtet worden (Bild 2).

Bild 2 Tragwerk des Stalles als ungeschützte Stahlkonstruktion

Im Wesentlichen sind die folgenden Abweichungen bzw. Erleichterungen (mit aufgezeigten Begründungen und Kompensationen) in Anspruch genommen worden:

- Tragende und aussteifende Wände und Stützen ohne Feuerwiderstandsklasse (anstelle feuerhemmender Bauweise entsprechend einem Gebäude der Gebäudeklasse 3).

Begründung: Rechnerischer Nachweis durch Brandsimulationsrechnungen einschließlich Aussagen von Temperaturen am Stahltragwerk, Brandlastermittlung.

Kompensation: Temperaturüberwachung (ohnehin erforderlich aus betrieblichen Gründen) mit Aufschaltung auf Kontrollstellen und Information von Personen über Funk, Fernalarm auf Leitstelle der Feuerwehr.

- Brandabschnitte von ca. 20.000 m² Größe

  Begründung: Brandsimulationsrechnungen und Darstellung der Verhältnisse im Brandfall, Unterteilung durch rauchdichte Wände, Brandlastbegrenzung.

  Kompensation: Rauchableitung über eine Lüftungsanlage, die in Verbindung mit einer Wasserberieselungsanlage und Anforderungen an die Temperaturstandfestigkeit dazu in der Lage ist, Vollbrandbedingungen auszuschließen.

- Rettungsweglängenüberschreitung (62 m anstelle der entsprechend Landesbauordnung vorgesehenen 35 m).

  Begründung: Aufrechterhaltung raucharmer Schichten und Bereiche über Lüftungsanlage mit Temperaturstandfestigkeit und Abluftleitungen von ca. 130.000 m³/h (30-facher Luftwechsel). Ausschließlich ortskundiges Personal. Kennzeichnung der Ausgänge mit nachleuchtenden Schildern. Temperaturüberwachung mit Alarmierung (intern und fern). Netzersatzanlage für die Lüftungsanlage.

Neben den baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen sind angeordnet worden:

- eine Löschwasserversorgung mit 192 m³/h über einen Zeitraum von 2 Stunden
- eine innere Löschwasserversorgung über eine DN 80-Leitung mit Anschlussstellen mit Absperrhähnen und C-Kupplungen und mit Druckerhaltungsanlage
- eine Löschwasserrückhaltung über die Güllebehälter unterhalb der Ställe (Betonspaltenboden s. Bild 3)
- Feuerwehrpläne und Brandschutzordnung
- äußerer Blitzschutz.

Gegenstand der Diskussionen in Verbindung mit dem Brandschutzkonzept war schwerpunktmäßig die Möglichkeit der Tierrettung. Hier wurden auch in Verbindung mit dem Prüfverfahren durch einen Prüfingenieur anlagentechnische Modifikationen an der Lüftungsanlage vorgenommen, so dass der Nachweis möglich war, dass Tiere im Brandfall im Gebäude verbleiben können, da das Brandereignis und die Rauchausbreitung auf kleine Bereiche eingeschränkt werden können. Dies stellt eine wirkungsvolle Maßnahme der Tierrettung dar, ohne im Brandfall mehrere tausend Schweine aus dem Gebäude heraus leiten zu müssen.

Bild 3 *Regelstall von innen, Boxen aus Metall, Betonspaltenboden als Verbindung zum Güllebehälter*

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden Brandschutzanforderungen an Anlagen zur Tierhaltung diskutiert. Diese Anforderungen ergeben sich aus der Berücksichtigung der speziellen Nutzungsbedingungen (geringe Brandlasten, leistungsfähige technische Anlagen und bauliche Besonderheiten). Die Anforderungen der Industriebaurichtlinie sind für derartige Anlagen schwer umsetzbar. Daher wird empfohlen, schutzzielorientierte Brandschutzkonzepte auf der Basis der Landesbauordnungen mit nutzungsbedingten Erleichterungen aufzustellen. Diese können ggf. mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes nachgewiesen werden.

LITERATUR

[1] Muster Bauordnung (MBO) in der Fassung November 2002

[2] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (M IndBauRL) in der Fassung März 2000.

[3] TGL 10685 Teile 1, 2, 6, 7, 8. Bautechnischer Brandschutz, 29.04.1982

[4] TGL 43234, Gebäude und Anlagen der Tierproduktion, Forderungen des bautechnischen Brandschutzes, 03.07.1985

[5] NLT Niedersächsischer Landkreistag: Arbeitspapier für den vorbeugenden und abwehrenden Brandschutz bei Nutztierhaltungsanlagen, Stand 12.09.2011

[6] Kleiböhmer, Dirk (Bezirksregierung Münster, Dezernat 22 – Feuerschutz, Rettungswesen, Zivile Verteidigung): Brandschutz in der Landwirtschaft – Erfahrungsberichte der Feuerwehr. Brandschutz-Tagung 2013 der Ingenieurakademie West e.V., 2013

[7] Hamburgische Bauordnung (HBauO), 14. Dezember 2005

[8] Golchert, M.: Erarbeitung und Zusammenstellung von Brandschutzanforderungen an Masttieranlagen an einem Praxisbeispiel. Bachelorarbeit an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Hochschule Magdeburg-Stendal, 2013

BRAND- UND DENKMALSCHUTZ AUF AUGENHÖHE – SPANNENDE DETAILS BEI BRANDSCHUTZKONZEPTEN FÜR BAUDENKMALE

Gerd Geburtig
Planungsgruppe Geburtig, Weimar

EINLEITUNG

Die aktuellen Anforderungen des Brandschutzes verträglich in Baudenkmalen durchzusetzen ist eine Herausforderung, die den Planenden zwingt, die konkurrierenden Schutzinteressen gleichermaßen zu würdigen. Demzufolge muss ein Abwägungsprozess vorgenommen werden, der die in der gesellschaftlichen Akzeptanz zunächst gleichwertigen Interessen anhand der konkret sich daraus entwickelnden brandschutztechnischen Schutzziele auf Basis der denkmalpflegerischen Axiologie [1] vereinbart, sozusagen „auf Augenhöhe“. Dies kann in der Regel nur geschehen, wenn von Standardlösungen abgewichen wird und die Bereitschaft für individuelle, schutzzielorientierte Konzepte vorhanden ist. Ziel sollte es bei Baudenkmalen jedoch sein, nur möglichst wenige, aber notwendige Eingriffe konsequent zu verwirklichen und die überlieferte, historisch wertvolle Substanz weitgehend unverändert zu belassen.

DENKMALSCHUTZ UND NOTWENDIGE SICHERHEIT

Welche „Sicherheitsansprüche“ sind zunächst bei einem in Funktion und Gefüge weitgehend unveränderten denkmalgeschützten Gebäude als planerische Grundlage anzusetzen? Bei jedem Brandfall kann eine Brand- bzw. Rauchausbreitung sowohl zur Gefährdung von Personen als auch zu erheblichen Schäden an der geschützten Bausubstanz führen. Daher verfolgt ein angemessener Brandschutz auch das grundlegende Ziel der Denkmalpflege, denn unter dem Begriff „Denkmalpflege“ kann man sämtliche Bestrebungen verstehen, die auf die Erhaltung von Erzeugnissen vergangener Kulturepochen, der Gegenwart und Zukunft gerichtet sind, d. h. „Kulturdenkmale als Quellen und Zeugnisse menschlicher Geschichte und erdgeschichtlicher Entwicklung zu schützen und zu erhalten“ [2].

Um bei historischen Bauwerken sowohl Denkmal- als auch Brandschutz sinnvoll miteinander vereinbaren zu können, sind beide gleichrangig zu behandeln. Häufig treten dabei in der Praxis für den konkreten Einzelfall die folgenden grundlegenden Fragen auf:

- Welche Änderungen gefährden grundlegend den Denkmalschutz?
- Inwieweit sind denkmalpflegerische Beeinträchtigungen zulässig?
- Welche vorhandenen Mängel sind als wesentlich einzuschätzen?
- Wie löse ich das jeweilige Detail einer Nachrüstung bzw. Ertüchtigung?

- Wie gehe ich mit abweichenden Rahmenbedingungen gegenüber Normen, Verwendbarkeitsnachweisen oder Herstellerrichtlinien um?

Beim Baudenkmal ist zwischen Schutzmaßnahmen zu unterscheiden, die das Brandereignis an sich verhindern und solchen, die das Ausmaß der Schädigung behindern. Diese Unterscheidung ist geeignet, den Maßstab zwischen einer alltäglichen Sanierung und einer denkmalpflegerischen Behandlung zu differenzieren. Während bei einer Sanierung durchaus die Belange des Brandschutzes im Vordergrund zu stehen haben und das Beseitigen konkreter Gefahrenquellen im Vordergrund zu stehen hat, gesellt sich beim Baudenkmal immer die weitgehende Begrenzung baulicher – und damit ausmaßbegrenzender – Maßnahmen beim Umgang mit dem Brandschutz dazu, damit dessen Identität gewahrt bleibt.

Gültige Verordnungen zum Brandschutz sind sinnvoll, indem sie einen hohen Sicherheitsstandard festlegen. Wenn deren konsequente Durchsetzung jedoch zu erheblichen Beeinträchtigungen der schützenswerten Bausubstanz bis zur Zerstörung von Kulturdenkmalen führt, wurde das gleichwertige Schutzziel der Denkmalpflege verfehlt. Eine absolute Sicherheit vor Bränden ist ohnehin undenkbar; sie würde die Freiheit des Menschen einengen und wäre wirtschaftlich untragbar [3]. Diese Erkenntnis sollte die Basis aller Bestrebungen einer Brandschutzplanung beim Baudenkmal sein.

Baudenkmale genießen zunächst stets Bestandsschutz. Dennoch haben diese – insbesondere bei einer geplanten Umnutzung – einer aus brandschutztechnischer Sicht vorzunehmenden Analyse realer Gefahren standzuhalten. Zwischen einer Bausanierung und einer denkmalpflegerischen Behandlung gibt es entscheidende Unterschiede, die im Grundlagenband „Brandschutz im Baudenkmal“ ausführlicher diskutiert werden. [4] Fest steht jedoch, dass bei für Menschen und Tiere bzw. für die im Brandfall erforderlichen Rettungs- und Löscharbeiten festgestellten Gefahren zu handeln ist. Somit gilt trotz des Bestandsschutzes für Baudenkmale stets auch aus denkmalpflegerischer Sicht: „Bestandsschutz hört spätestens dort auf, wo Gefahren für Leben und Gesundheit bestehen“ (Bilder 1 und 2) [5].

BEURTEILUNG DES BESTANDES UND NUTZUNGSÄNDERUNGEN

Notwendige Untersuchungen

Bei der brandschutztechnischen Beurteilung von Baudenkmalen ist im Vorfeld einer denkmalpflegerischen Behandlung die denkmalpflegerische Analyse (historische, axiologische, Schadens- und Mangelanalyse) unerlässlich. Die vorhandene bauliche Situation entspricht nur selten den abstrakten Forderungen des Brandschutzes. Häufig kann zudem die bauliche Bestandssituation den zunächst erforderlichen Brandschutzmaßnahmen nicht angepasst werden, sondern vielmehr ist zu fordern, dass die Brandschutzmaßnahmen Rücksicht auf den Bestand nehmen müssen. Aus Angst vor Fehleinschätzungen wegen feh-

lender (nicht finanzierter) Analyseschritte oder aus Unkenntnis werden historische Konstruktionen unzutreffend eingeschätzt, was entweder zu unnötigen, unwirtschaftlichen und sogar komplizierten Maßnahmen oder zu einer mangelhaften Risikobeurteilung führt. Die Konsequenzen sind erschwerte Verwirklichungen und Qualitätsprobleme. Es entstehen Vorschläge, die bei denkmalgeschützten Konstruktionen im Widerspruch zur denkmalpflegerischen Zielstellung stehen und sich als nicht durchführbar erweisen.

Um den notwendigen Handlungsbedarf in brandschutztechnischer Hinsicht konkret feststellen zu können, ist eine detaillierte Analyse der tatsächlich vorhandenen Brandsicherheit erforderlich (Bild 3).

Bild 1 Nicht jede Abweichung zieht eine konkrete Gefährdung nach sich.

Bild 2 Rettungswege müssen auch in Baudenkmalen hinreichend sicher sein.

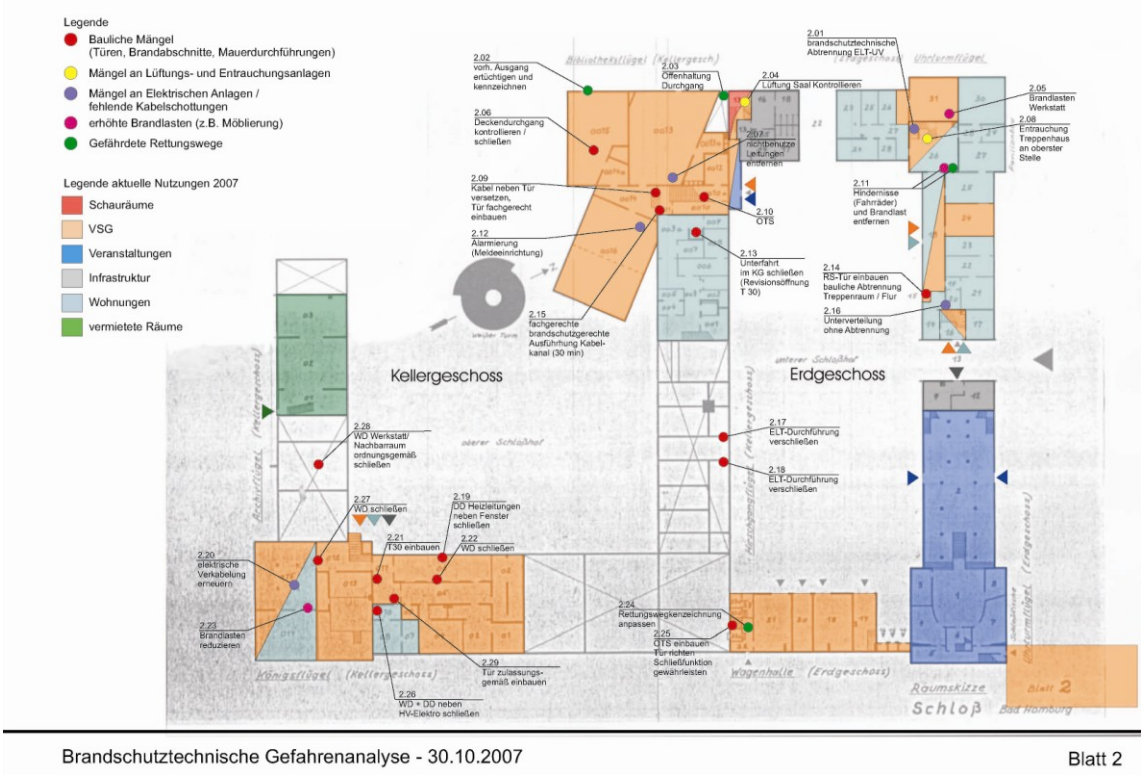


Bild 3 Eine brandschutztechnische Bestandsanalyse ist unerlässlich.

Als wichtige zu beurteilende Komponenten der Brandsicherheit bei denkmalgeschützten Gebäuden sind u. a. die folgenden zu benennen:

- Lage und Umfeld der baulichen Anlagen
- Gliederung der Gebäude
- Rettungswegesituation
- Branderkennung und Alarmierung
- Vorhandene besondere Brandlasten oder Brandgefahren
- Brandentstehungsrisiko, z. B. aufgrund nachträglicher Installationen
- Organisatorische Voraussetzungen
- Wirksamkeit der jeweiligen Feuerwehr, z. B. Möglichkeit der Anleiterung.

Nach dem Feststellen der jeweiligen im Einzelfall angetroffenen Mängel an einem historischen Gebäude ist die konkrete Risikoanalyse vorzunehmen. Die Mängel haben im Detail oft eine sehr unterschiedliche Wirkung, wobei häufig zu attestieren ist, dass ein scheinbar bedeutender Mangel, wie ein von der heutigen Vorschrift abweichender Feuerwiderstand, gar nicht derartig ins Gewicht fällt, während beinah vergessene, unsachgemäß nachträglich verlegte Elektro- oder Datenleitungen mit ihren Brandlasten bzw. wegen der Gefahr einer möglichen Brandweiterleitung die Rettungswege erheblich mehr beeinträchtigen.

Für eine angemessene Risikobeurteilung ist es zunächst wichtig zu überprüfen, welche sicherheitstechnischen Anforderungen zur Errichtungszeit des Gebäudes galten, denn einen Bestandsschutz kann ein Gebäude natürlich nur haben, wenn das zur Bauzeit geforderte Sicherheitsniveau auch erreicht wurde. Ein bauzeitlicher „Pfusch“ ist nicht im Nachhinein zu legitimieren. Das gilt bei Baudenkmalen, insbesondere für im Nachhinein vorgenommene technische Nachrüstungen oder bauliche Ausbesserungen. Parallel dazu gilt es zu ergründen, welchen Sinn die heutige Neubauvorschrift hat. So ist es möglich, das Abweichungspotenzial zu bestimmen und festzustellen, welche Gefährdungslage überhaupt konkret vorliegt. Erfahrungsgemäß bestimmen drei wesentliche Themen jegliche Risikobeurteilung:

a) Situation und Sicherheit der Rettungswege
b) Mögliche Rauchableitung aus Treppenräumen
c) Nachträglich vorgenommene Installationen.

Bei der Einschätzung des Feuerwiderstandes von bestehenden Bauteilen sind folgende Kriterien, unabhängig von der materialtechnischen Beschaffenheit, von grundlegender Bedeutung:

- Materialbestandteile und -qualitäten
- Einbausituationen (freiliegend, vollständig oder teilweise bekleidet)
- Tatsächliche statische Auslastung einer vorhandenen Tragkonstruktion
- Vorhandene Auflagerungen und Einspannungen
- Verbindungsmittel
- Überdeckungen und Beschichtungen, z. B. von Beton- oder Stahlkonstruktionen.

Für die genaue Diskussion des festgestellten Abweichungspotenzials ist es erforderlich, die konkrete Leistungsfähigkeit der vorhandenen Bauteile zu beurteilen. Dies kann anhand zur Errichtungszeit gültiger Vorschriften, Zulassungen oder Prüfzeugnisse, mittels vergleichender Untersuchungen, durch die Auswertung von Brandereignissen, bei denen ähnliche Konstruktionen belastet wurden, aber auch mit konkreten Materialuntersuchungen und nachträglichen ingenieurgemäßen Berechnungsmethoden erfolgen. Auf jeden Fall müssen brandschutztechnische Eigenschaften, wie die Feuerwiderstandsdauer, stets im Zusammenhang mit der Tragwerksplanung betrachtet werden. Leider ist die fehlende Korrespondenz der jeweiligen Fachplanungen untereinander immer wieder eine Quelle für mangelhafte Planungen.

Die Voraussetzung für vernünftige Abläufe ist das „Hineindenken“ in die Erfordernisse der jeweils scheinbar einander gegenüberstehenden handelnden Seite. Es bedarf des gegenseitigen Verständnisses, dann wird die Suche nach

dem einvernehmlichen Brandschutzkonzept erfolgreich sein, das sich nicht an starren Standardregelungen orientiert.

Probleme durch Nutzungsänderungen

Wenn sich die Nutzung eines Baudenkmals ändert, ist grundsätzlich damit zu rechnen, dass dadurch nunmehr einem höheren brandschutztechnischen Standard entsprochen werden muss, da prinzipiell eine Anpassung an die neue Nutzung geboten ist (Bild 4).

Bild 4 *Zu einer Schule umgewidmetes Wohngebäude.*

Weil die bauordnungsrechtlichen Vorschriften für die neue Nutzung häufig restriktivere Vorgaben als zur Errichtungszeit des denkmalgeschützten Gebäudes enthalten, ist der Umfang der gewollten Änderung und die Widersprüchlichkeit gegenüber den neuen Anforderungen genau zu analysieren (Bild 5).

Bild 5 *Notwendige Brandschutzmaßnahmen wegen einer Nutzungsänderung: Löschanlage, Brandmelde- und Alarmierungsanlage, Rettungswegkennzeichnung.*

Zu einem eventuellen behördlichen Anpassungsverlangen wurde bereits im Jahre 1919 in dem vom preußischen Staatskommissar für das Wohnungswesen erlassenen Entwurf einer Bauordnung im § 35 zu vorhandenen baulichen Anlagen wie folgt ausgeführt:

(1) „Auf bauliche Anlagen, die zur Zeit ihrer Errichtung den damals gültigen baupolizeilichen Bestimmungen entsprachen, und auf Bauten, die auf Grund genehmigter Bauentwürfe bereits begonnen sind, findet die nachträgliche Durchführung nicht etwa beobachteter Bestimmung dieser Bauordnung nur dann statt, wenn polizeiliche Gründe, insbesondere solche der öffentlichen Sicherheit, es notwendig machen."

(2) „Für bauliche Arbeiten, welche einzeln oder zusammengenommen eine erhebliche Veränderung eines Gebäudes oder Gebäudeteils darstellen, kann die Baugenehmigung auch davon abhängig gemacht werden, daß gleichzeitig die durch den Entwurf an sich nicht berührten Gebäude und Gebäudeteile, soweit sie den Vorschriften dieser Bauordnung widersprechen, mit dieser in Übereinstimmung gebracht werden" [6].

Weiterführende Anmerkungen von F. W. Fischer zur detaillierten Auslegung dieses historischen Textes können dem Band Brandschutz im Baudenkmal – Wohn- und Bürobauten entnommen werden [7].

Hinsichtlich der Rechtmäßigkeit eines bauordnungsrechtlichen Anpassungsverlangens ist vor allem die heutige Formulierung des § 84 Abs. 2 der Bauordnung für Berlin von Bedeutung, die lautet: „Rechtmäßig bestehende bauliche Anlagen sind, soweit sie nicht den Vorschriften dieses Gesetzes oder den auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Vorschriften genügen, mindestens in dem Zustand zu erhalten, der den bei ihrer Errichtung geltenden Vorschriften entspricht" [8]. Damit wurde – ganz im Sinn des historischen Vorbilds – prinzipiell klargestellt, dass zunächst für alle rechtmäßig bestehenden baulichen Anlagen – und davon ist bei einem Baudenkmal regelmäßig auszugehen – der Bestandsschutz gilt und es auf die bauzeitlichen Vorschriften ankommt. Daher ist es auch generell sinnvoll, sich mit den zur Errichtungszeit geltenden Regelungen zu beschäftigen und die brandschutztechnische Beurteilung auf diese zurückzuführen.

BRANDSCHUTZNACHWEISE FÜR BAUDENKMALE

Grundlagen

Für Baudenkmale ist es selten möglich, im Abgleich zwischen den konkret formulierten Bauteilanforderungen in der jeweiligen Landesbauordnung bzw. den geltenden Sonderbauvorschriften, eine erfolgreiche Brandschutzplanung zu betreiben. Es wird stattdessen ein Sicherheitsnachweis auf der Grundlage eines auf das betreffende Baudenkmal zugeschnittenen schutzzielorientierten Brandschutzkonzeptes benötigt, der auch mit abweichenden Inhalten ein gegenüber

den konkreten Bauteilanforderungen vergleichbares Sicherheitsniveau bietet. Es handelt sich dabei um Nachweise, die auf den individuellen Einzelfall eines Bauwerkes bezogen, verschiedene Szenarien simulieren. Das kann von ingenieurgemäßen Nachweisen unterstützt werden. Damit können eine Vielzahl denkmalgeschützter Bauteile, anstelle vernichtet und unsinnigerweise durch neue ersetzt zu werden, erhalten bleiben und die denkmalpflegerische Anforderung nach weitgehender Nichtbeeinträchtigung wertvoller Substanz erfüllt werden.

Die konkreten brandschutztechnischen Schutzziele basieren auf den Eigenschaften der vorhandenen Bausubstanz und auf den geplanten Nutzungen. In dem darauf abgestimmten Brandschutzkonzept werden ohne Standardvorgaben die für den Einzelfall erforderlichen Brandschutzmaßnahmen festgelegt. Außerdem sind die Maßnahmen des vorbeugenden, abwehrenden und organisatorischen Brandschutzes im direkten Zusammenhang miteinander festzulegen – ein besonders wichtiger Aspekt bei der Einschätzung des wirklichen Gefahrenpotenzials.

Angemessene Brandschutzplanung für ein Baudenkmal

Stets ist im Vorfeld der Festlegung brandschutztechnischer Maßnahmen nach den tatsächlichen, angeblich nicht zu gewährleistenden Eigenschaften eines Bauwerkes zu fragen. Ein Vergleich derselben mit denen für Neubauten geforderten ermöglicht Aussagen zur tatsächlich erforderlichen Brandsicherheit. Geschieht das, dann kann analysiert werden, ob und warum Defizite des Brandschutzes ohne Ausgleich, d. h. auf dem Wege der Abweichung, ohne weitere Maßnahmen, oder durch Einsatz von zusätzlichen Maßnahmen zu tolerieren sind.

In den Fällen, bei denen die tatsächlich notwendigen Anforderungen bei Baudenkmalen nicht befolgt werden können, sind zur gleichrangigen Erfüllung der betreffenden Forderungen „Ersatzmaßnahmen“ zu konzipieren. Bei der Baudenkmalpflege ist bei dieser Tätigkeit der sensible Umgang mit brandschutztechnischen Maßnahmen von entscheidender Bedeutung. Die auszuwählenden Maßnahmen sollen die Authentizität der Überlieferung eines Baudenkmals nicht stören und die schützenswerte Substanz so wenig wie möglich beeinträchtigen.

Die Basis der Anwendung geeigneter Brandschutzmaßnahmen bei einer denkmalpflegerischen Behandlung von Bauwerken ist das gebäudeorientierte Brandschutzkonzept, das in den architektonischen Planungsphasen weiter fortzuschreiben ist und letztendlich in einem für die genehmigende Behörde vollständig nachvollziehbaren Brandschutznachweis – in einigen Landesbauordnungen auch als „Brandschutzkonzept“ tituliert – mündet. Es muss eine kritische Überprüfung von Annahmen durch eine systematische Untersuchung mit dem Ziel der Erarbeitung einer Brandgefährdungsanalyse erfolgen, da mit dem Brandschutznachweis die behördliche Zustimmung erlangt werden soll. Die Voraussetzung für die Abläufe der geeigneten Brandschutzplanung ist das jeweilige erforderliche „Hineinversetzen“ in die Denkweise der scheinbar einander gegenüberstehenden, handelnden Seite. Es bedarf des gegenseitigen Ver-

ständnisses; dann wird die Suche nach dem einvernehmlichen Brandschutzkonzept erfolgreich sein, ohne notwendiges Vertrauen auf zweifelsohne für Standardbauten bewährte Regeln (Bild 6). „Der Brandschutz bestimmt somit, was geschehen muss, und der Denkmalschutz, wie das geschehen darf.“ [9]

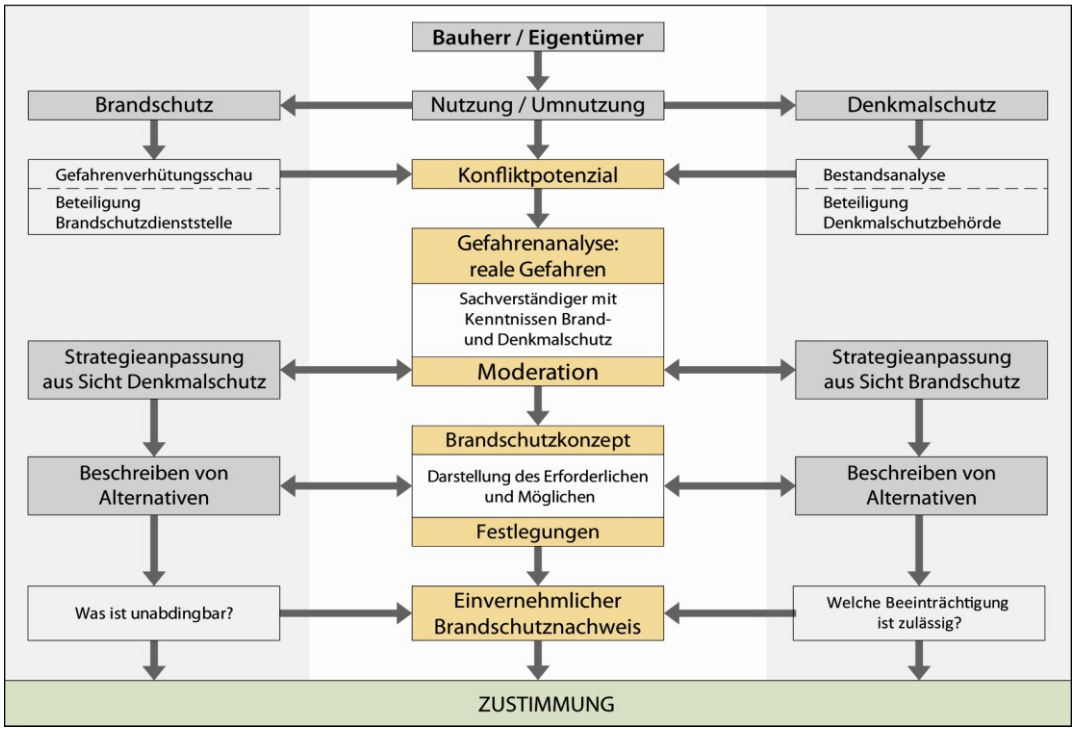


Bild 6 Korrekter Ablauf der Brandschutzplanung beim Baudenkmal. [10]

Anwendung ingenieurgemäßer Nachweise

Bereits seit längerer Zeit besteht zudem die Möglichkeit, die Dienlichkeit ausgleichender Maßnahmen mit Hilfe von Methoden des Brandschutzingenieurwesens nachzuweisen. So können mittels anerkannter Verfahren Nachweise erfolgen, dass für vorgegebene bzw. erforderliche Zeiträume die vorhandenen Rettungswege ausreichend benutzbar bzw. wirksame Löscharbeiten möglich sind oder die Standsicherheit ausgewählter Bauteile gewährleistet ist.

Die in den sicherheitstechnisch erforderlichen Zeiträumen einzuhaltenden Sicherheitskriterien, die entweder der Begründung einer Abweichung oder dem Nachweis der geeigneten Maßnahme dienen können, sind aufgrund anerkannter Kriterien des Brandschutzes objekt- und schutzzielbezogen festzulegen. Sie können u. a. folgende Kriterien betreffen:

- Einhaltung einer im Brandschutzkonzept vorgegebenen raucharmen Schicht
- Einhaltung der Tragfähigkeit unter den ermittelten Temperaturbelastungen für einzelne Bauteile und die gesamte Tragkonstruktion
- Einhaltung erforderlicher Evakuierungszeiten.

Als Methoden des Brandschutzingenieurwesens kommen derzeit insbesondere

- Brandsimulationen als allgemeine Bemessungsbrände, anstelle normgerechter Prüfungen,
- Brand- und Rauchversuche,
- Beurteilung des Brandverhaltens von Bauteilen und Tragwerken,
- Personenstromanalysen

infrage, die jeweils zum Nachweis der ausreichenden Brandsicherheit des aufgestellten Brandschutzkonzeptes genutzt werden (Bilder 7 und 8).

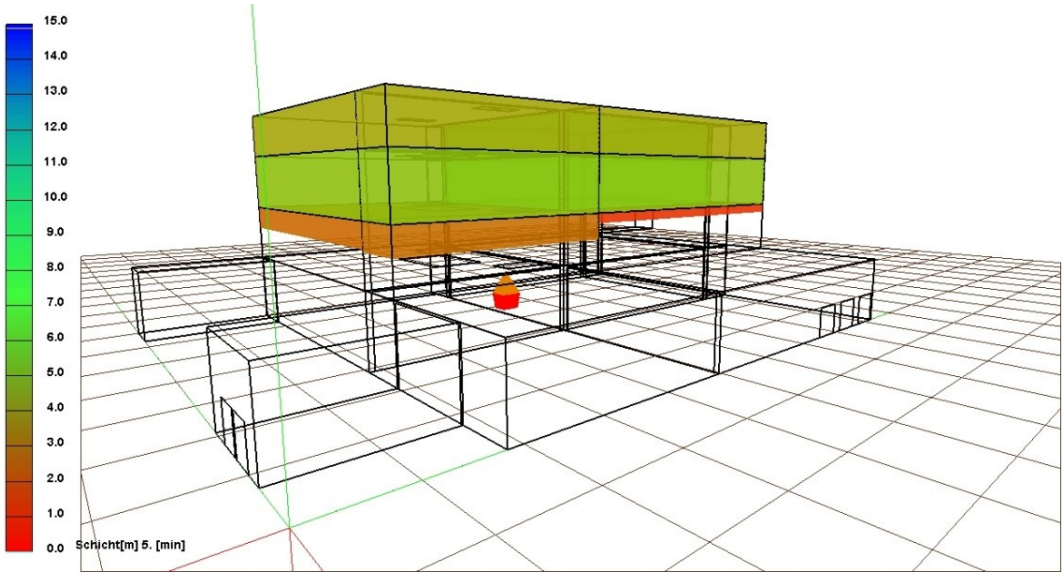


Bild 7 Ergebnis innerhalb einer Simulation zur Rauchableitung.

Bild 8 Anfangsszenario für eine Personenstromanalyse.

Um die bauaufsichtliche Akzeptanz der Anwendung von ingenieurgemäßen Nachweisen für den Nachweis der Brandsicherheit verbessern zu können, ist es seitens des Deutschen Institutes für Normung e. V. (DIN) vorgesehen, die Grundsätze für die Aufstellung von Nachweisen mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens zukünftig normativ in DIN 18009 zu definieren [11]. Explizit sollen diese Regelungen auch für bestehende Gebäude und Baudenkmale gelten. Das Ziel ist es dabei, sich vom Erfüllen fest vorgegebener Bauteilanforderungen zu lösen und anstelle dieses ingenieurgemäße, schutzzielorientierte Nachweise treten zu lassen. Es soll dabei weniger darum gehen, wiederum starre Anforderungen zu definieren, sondern stattdessen die richtige und angemessene Vorgehensweise zu beschreiben und zu regeln, mit der folgerichtig eine vertretbare Brandsicherheit ermittelt und nachgewiesen werden kann.

PRAKTISCHE DETAILLÖSUNGEN

Bauliche Nachrüstungen

Auch wenn sämtliche Eingriffe in eine denkmalpflegerisch geschützte Substanz, die „das materielle Substrat des Denkmals, den Träger des Wertes“ [12] verkörpert, aus der Sicht des denkmalpflegerischen Schutzinteresses regelmäßig weitmöglich zu vermeiden sind, kommt einer behutsamen Nachrüstung oftmals eine entscheidende Rolle zu. Für den Einzelfall geeignete bauliche Brandschutzmaßnahmen bei denkmalgeschützten Gebäuden sind z. B.:

- Nachrüsten vorhandener Türen zu notwendigen Treppenräumen mit Dichtungen und Türschließern oder Abgrenzung des Treppenraumes mit einer Rauch- bzw. Feuerschutzschutzverglasung (Bilder 9 und 10)
- Abschottungen von Räumen mit erhöhter Brandgefahr
- Dämmschichtbildende Anstriche auf Stahl- und Gusskonstruktionen
- Anbau einer temporären Treppe oder einer Notleiter mit Rückenschutz
- Ein- oder Anbau eines zusätzlichen baulichen Rettungsweges
- Alternative Rettungsausbildung, z. B. mittels einer Bypassausweisung oder eines Personen-Rettungsschlauches (Bild 11).

Im Vordergrund der Bewertung von Lösungen, die dem heutigen Bauordnungsrecht widersprechen, sollte dabei immer stehen, dass ein, wenn auch als nicht idealer, baulicher Rettungsweg besser ist, als ein Rettung über Rettungsgeräte der Feuerwehr.

Bild 9 *Ehemalige Dienertür wird Bestandteil des 2. Rettungsweges.*

Bild 10 *Dem historischen Bestand angepasste Feuerschutzverglasung.*

Bild 11 *Der Turm wird zukünftig mit einem Personenrettungsschlauch ausgestattet (2. Rettungsweg).*

Ausgleichende Anlagentechnik

Wenn sich bauliche Maßnahmen aus denkmalpflegerischer Sicht entweder als gänzlich nicht durchführbar erweisen oder eine zu starke Beeinträchtigung der zu schützenden historischen Substanz mit sich bringen würden, kann bei Erfordernis auf ausgleichende anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen – sogenannte Kompensationsmaßnahmen – zurückgegriffen werden. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass nicht automatisch jede abweichende Situation gegenüber heute geltenden Vorschriften des Brandschutzes ausgeglichen werden muss, sondern nur jene, die eine reale Gefahr nach sich ziehen können. In anlagentechnischer Hinsicht ist z. B. der Einsatz folgender ausgewählter Maßnahmen in Baudenkmalen möglich:

- Geeignete Brandmelde- bzw. Hausalarmanlagen (Bild 12)
- Selbstleuchtende Rettungswegkennzeichen, ggf. mit Brandfallsteuerung
- Natürliche oder maschinelle Rauchabzüge, Überdruck-Lüftungsanlagen für notwendige Treppenräume (Bild 13)
- Rauch- oder Feuerschutzvorhänge
- Gas- oder Wassernebellöschanlagen.

Im Vordergrund bei der Anwendung anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen sollte stehen, dass nur so viel wie nötig und nicht so viel wie möglich derartiger eingesetzt werden. Es ist zu bedenken, dass trotz aller Fürsorglichkeit jede Anlagentechnik versagen kann und der Einsatz der Technik wartungstechnische Aufwendungen nach sich zieht; eine Tatsache, die nur allzu gern beim Erstellen einer brandschutztechnischen Planung in den Hintergrund rückt und im Nachhinein nicht selten ein unschönes Erwachen bei den anfallenden Wartungskosten mit sich bringt. Die Richtschnur in dieser Hinsicht sollte deswegen immer sein, nur so viel einzubauen, wie sicherheitstechnisch unverzichtbar ist, d. h., der Schwerpunkt hat auf der Sicherung des Rettungswegsystems zu liegen.

Erwähnt werden soll zudem, dass sich moderne Löscheinrichtungen, wie Gas- oder Wassernebellöschanlagen, die kein oder außerordentlich wenig Wasser für ihren Betrieb benötigen, für einen erforderlichen Kulturgutschutz für Gemälde, Bücher und andere brennbare Gegenstände sowie im Einzelfall zur Sicherung der Rettungswege eignen (Bild 14).

Bild 12 Ästhetisch anspruchsvolle Brandmeldetechnik.

Bild 13 Bewusst gezeigte Überdruckbelüftung in einem Treppenraum.

Bild 14 Löschdüse (Wassernebel) in einem Treppenraum eines Schlossgebäudes.

Organisatorische Regelungen

Dem Brandschutzmanagement kommt in einem Baudenkmal eine besondere Rolle zu. Zum einen werden mit diesem Brandgefährdungen während der Nutzung weitgehend verhindert, zum anderen können Maßnahmen des organisatorischen Brandschutzes Defizite der historischen Substanz ausgleichen helfen, um im Einzelfall beeinträchtigende Maßnahmen zu vermeiden, wie z. B. das Austauschen wertvoller Türen. Die Grundlage für die wirksame Befolgung des organisatorischen Brandschutzes sollte heutzutage eine nach der DIN 14096 [13] aufgestellte Brandschutzordnung sein. Während in Baudenkmalen mit Sonderbaunutzungen zumindest die Teile A und B der Brandschutzordnung zur Verfügung stehen sollten, ist für Museen insbesondere auch der Teil C für Personen mit besonderen Aufgaben von Bedeutung. Damit können für den Einzelfall spezielle Aufgaben hinsichtlich der Bergung und des Schutzes von Kulturgut geregelt werden. Bei historischen Versammlungsstätten kommt den Teilen B und C eine wesentliche Rolle zu, weil Nutzungsbeschränkungen und Verantwortlichkeiten für kompensatorische Maßnahmen, wie z. B. temporäre Beleuchtungen oder Rettungswegkennzeichnungen oder das rechtzeitige Öffnen von Türen im Verlauf von Rettungswegen, im Gefahrenfall usw. zu klären sind [14].

FAZIT

Es ist möglich, den Spagat zwischen den beiden beleuchteten sich im Detail häufig widersprechenden Schutzinteressen zu erreichen. Die Voraussetzung dafür ist das gegenseitige Verständnis für die jeweiligen Schutzziele und die Erkenntnis, dass diese gleichrangig sind. Innovative wie konservative Brandschutzkonzepte können dabei für das jeweilige Gebäude der richtige Weg sein; an einer Stelle ist eine bauliche Schottung unumgänglich und vielleicht sogar der Historie entlehnt, an der anderen kann auf eine Brandschutzmaßnahme verzichtet werden, weil über Jahrhunderte nachgewiesen werden kann, dass es organisatorisch funktioniert (Bild 15).

Bild 15 *Einer der schönsten Sammelplätze Europas auf dem Dach des Mailänder Doms …*

LITERATUR

[1] Wirth, H., Denkmalpflegerische Axiologie, in: Beiträge zur Denkmalpflege, Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Universität, Weimar 1995, Ausg. 1 - 2, S. 83 – 87, hier: S. 85 f.

[2] Thüringer Gesetz zur Pflege und zum Schutz der Kulturdenkmale (Thüringer Denkmalschutzgesetz - ThürDSchG -) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. April 2004 (GVBl 2004, 465, Glied.-Nr.: 224-1) zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 20. Dezember 2007 (GVBl. S. 267, 269), hier § 1 (1)

[3] Brandschutz bei Baudenkmälern [Baudenkmalen], hrsg. v. d. Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland (Beratung Karl-Reinhard Seehausen, Marburg), Arbeitsblatt 13, Aachen 1997, S. 1; Anmerkung: Es ist derzeit durch den Arbeitskreis Bautechnik der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland vorgesehen, dieses Merkblatt grundlegend zu überarbeiten.

[4] Geburtig, G., Brandschutz im Baudenkmal – Grundlagen, Berlin 2009

[5] Brandschutzleitfaden für Gebäude besonderer Art oder Nutzung, hrsg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin November 1998[2], S. 15

[6] Baltz-Fischer, Preußisches Baupolizeirecht, Neu herausgegeben von Geh. Regierungsrat F.W. Fischer, Sechste, vermehrte und neubearbeitete Auflage, Berlin 1934, Unveränderter Nachdruck 1954, Berlin 1954, S. 273 ff.

[7] Geburtig, G., Brandschutz im Baudenkmal – Wohn- und Bürobauten, Berlin 2010, hier Kap. 2.4

[8] Bauordnung für Berlin (BauO Bln) vom 29. September 2005, zuletzt geändert am 7. Juni 2007, § 84 (1)

[9] Geburtig. G., Brandschutz bei der Sanierung und bei der denkmalpflegerischen Behandlung von Gebäuden mit hölzernen Trag- und Ausbaukonstruktionen, Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur, Weimar 2008, S. 179

[10] Geburtig, G., Brandschutz …, wie Anm. 4

[11] DIN 18009-1: Brandschutz-Ingenieurwesen – Grundsätze und Regeln für die Anwendung, NABau 005-52 beim DIN, zurzeit in Bearbeitung

[12] Wirth, H., Denkmalpflegerische …, wie Anm. 1, hier S. 85

[13] DIN 14096, Brandschutzordnung, 3 Teile, Berlin 01/2000

[14] Geburtig, G., Brandschutz im Baudenkmal – Museen, Veranstaltungsräume, Gaststätten und Hotels, Berlin 2010

BRANDSCHUTZ BEIM NEUBAU MESSE BASEL - PLANUNG, AUSFÜHRUNG UND INBETRIEBNAHME

Jörg Kasburg und Ralf Schnetgöke
Gruner AG, Basel und Zürich

EINLEITUNG

Die Stadt Basel ist der wichtigste Messestandort der Schweiz und gleichzeitig einer der bedeutendsten Europas. Bekannt ist der Messestandort unter anderem durch die "ART BASEL" sowie die weltweit größte Uhren- und Schmuckmesse "BASELWORLD".

Um die Bedeutung des Messestandorts auch zukünftig zu erhalten respektive auszubauen, wurden insgesamt 430 Millionen Schweizer Franken in das Projekt "Neubau Messe Basel" - einen vom Basler Architekturbüro Herzog & de Meuron entworfenen Hallenkomplex - mit einer nutzbaren Fläche für Ausstellungs-, Gastronomie und Eventzwecke von ca. 38.000 m^2 investiert. Die gesamte Ausstellungsfläche beträgt somit ca. 141.000 m^2.

Nach rund 6 Jahren Projektentwicklung begannen im Juni 2012 die Bauarbeiten zur ersten von insgesamt drei Bauetappen - teilweise unter laufendem Messebetrieb. Hierbei wurden zunächst bestehende Hallenbaukörper zurückgebaut, ehe sie durch den Neubau ersetzt wurden, welcher nach einer reinen Bauzeit von nur 22 Monaten im März 2013 termingerecht in Betrieb genommen werden konnte.

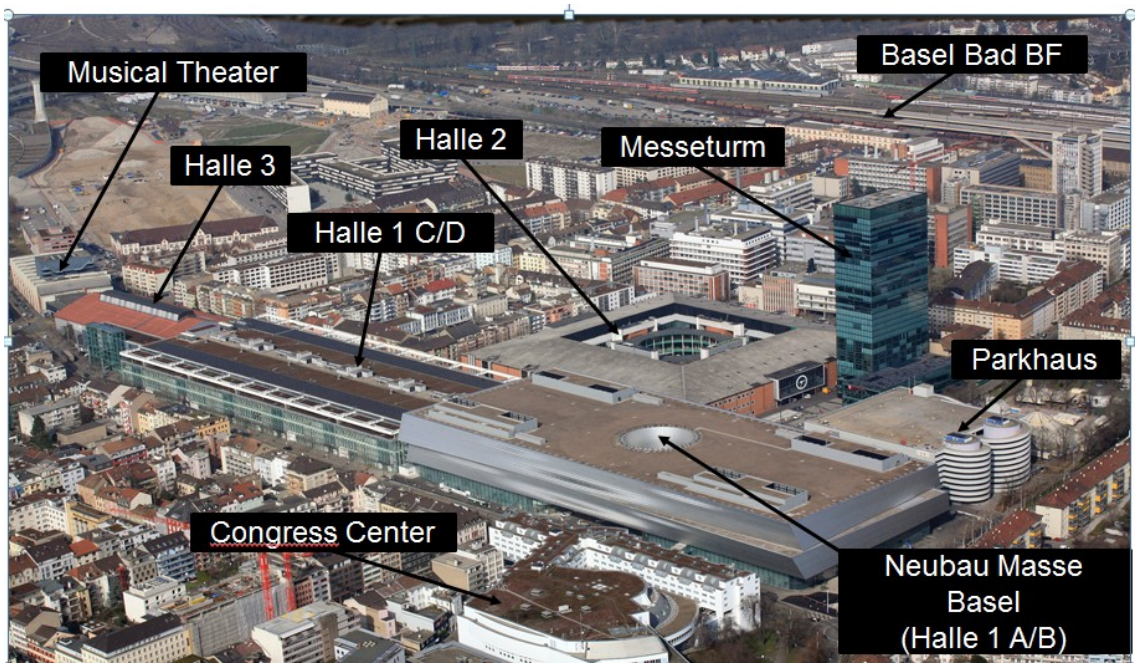


Bild 1 Luftaufnahme Messezentrum Basel (Quelle: www.mch-group.com)

Dieser Beitrag stellt nach einer kurzen Projektbeschreibung das Brandschutzkonzept (brandschutztechnische Begleitung der Planung) des Neubaus Messe Basel und die Umsetzung des Brandschutzkonzeptes (brandschutztechnische Begleitung der Ausführung) dar. Abschließend wird die Inbetriebnahme in ihrer vollen Komplexität erläutert.

PROJEKTBESCHREIBUNG

Der Neubau Messe Basel besteht aus einem Untergeschoss und drei übereinander liegenden Hallenbaukörpern mit einer nutzbaren Höhe von rund 10 m im Erdgeschoss sowie 8 m in den Obergeschossen. Diese überspannen einen Teilbereich des ursprünglich noch komplett unter freiem Himmel gelegenen Messeplatzes, welcher neu als "City-Lounge" bezeichnet wird. Für eine ausreichende natürliche Belichtung der "City-Lounge" sorgt eine runde Gebäudeaussparung als zentrales architektonisches Element des Neubaus mit einem Durchmesser von 28,5 m. Die Obergeschosse sind um das Zentrum dieser Öffnung leicht verdreht angeordnet und allseitig gegenüber dem Erdgeschoss auskragend. Die Traufkante des Daches liegt etwa 32 m über der Geländeoberfläche. Die größte Ausdehnung des Hallenkomplexes beträgt bei einer Breite von rund 84 m in Längsrichtung rund 227 m. Durch die offene Anbindung an die bestehende Halle 1 C/D entsteht im 1. Obergeschoss eine durchgehende Messehalle mit einer Länge von rund 400 m.

Bild 2 Luftaufnahme Neubau Messe Basel (Quelle: www.mch-group.com)

Die Tragkonstruktion des Baukörpers besteht aus Stahlbeton und Stahl. Den äußeren Raumabschluss bildet im Erdgeschoss eine Fassade mit raumhohen, weitestgehend transparent gehaltenen Verglasungen. Die Obergeschosse werden hingegen von einer lammellenartigen Aluminiumfassade nahezu opak umschlossen.

Der Neubau wird mit entsprechenden Technik- und Anlieferungsflächen im Untergeschoss sowie den Ausstellungsflächen in den 3 Hallengeschossen in erster Linie für Messezwecke genutzt. Aus brandschutztechnischer Sicht ist hierbei unter anderem den mehrgeschossigen, großflächig gedeckten Standbauten, die im Zuge der Uhren und Schmuckmesse "BASELWORLD" möglich sein müssen besondere Bedeutung zu schenken. Mit diesen, auf bis zu drei Geschossen, teilweise mehre 1.000 m^2 umfassenden Standbauten wird sozusagen eine "Haus in Haus" Situation geschaffen.

Im Bereich der öffentlich zugänglichen "City-Lounge" ist neben dem Publikums-, Straßenbahn- und Busverkehr mit Verkaufs- und Messeständen sowie Fahrgeschäften während der "Herbstmesse" (Kirmesveranstaltung) zu rechnen.

Bild 3 Standbauten zur "BASEL WORLD" (Quelle: "BASELWORLD")

Die während des Messebetriebes anzunehmende Personenbelegung wurde basierend auf Besucherstatistiken mit 0,35 Personen / m^2 Bruttoausstellungsfläche festgelegt, sodass in den Ausstellungsgeschossen jeweils mit rund 5.000 Besuchern zu rechnen ist.

Im Erdgeschoss befindet sich eine multifunktionale Eventhalle, welche mittels eines mobilen Trennwandsystems unterteilt wird und sowohl für Ausstellungszwecke als auch für Events mit bis zu 2.500 Besuchern genutzt werden kann. Weiter befinden sich in den Randzonen der "City Lounge" die Eingangsfoyers Nord und Süd, jeweils mit Galerieebene, sowie direkt von außen zugängliche Drittnutzungen, welche für Gastronomie und Verkaufszwecke fremdvermietet werden.

BEURTEILUNGSGRUNDLAGEN

Dem Brandschutzkonzept liegen in erster Linie die Vorschriften der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) in den jeweils gültigen Fassungen zu Grunde. In [1] wurde bereits ausführlich über dieses Schweizer Vorschriftenwerk – bestehend aus der Brandschutznorm (BSN) [2], den Brandschutzrichtlinien (BSR) [3] und den Brandschutzerläuterungen (BSE) [4] – berichtet.

Weitere Beurteilungsgrundlagen sind neben der Brandschutzverordnung der Stadt Basel [5] die Wegleitung zur Verordnung 3 und 4 zum Arbeitsgesetz [6] sowie die SES-Richtlinien über die Planung und Errichtung von Brandmelde- und Sprinkleranlagen [7], [8].

Darüber hinaus muss vergleichbar mit Deutschland auch in der Schweiz für die richtige Brandschutzplanung der einzelnen baulichen und technischen Komponenten eine ganze Reihe weiterer, in der Schweiz eingeführter EN-Normen sowie ergänzend DIN-Normen Beachtung geschenkt werden.

PLANUNG – BRANDSCHUTZKONZEPT ZUM NEUBAU MESSE BASEL

Im Folgenden wird kurz auf die wesentlichen Aspekte des Brandschutzkonzepts eingegangen, welches im engen Dialog mit dem Betreiber der MCH Messe Schweiz AG Basel sowie der zuständigen Brandschutzbehörde entwickelt wurde. Anschließend wird auf eine Auswahl der hier zahlreich zur Anwendung gelangten Sonderlösungen eingegangen.

Schutzziele

Dem Neubau Messe Basel liegen die im Artikel 9 der BSN formulierten Schutzziele zu Grunde, welche sich an folgender Priorisierung orientieren:

Priorität 1 Schutz von Personen und Tieren im Sinne der Selbstrettung,

Priorität 2 Interventionsschutz
(Fremdrettung und wirksame Brandbekämpfung)

Priorität 3 Gebäudeschutz

Durch die Bauherrschaft wurden keine über das gesetzliche Minimum hinausgehenden Schutzziele (z.B. Aufrechterhaltung des Betriebes) vorgegeben.

Im Rahmen der ingenieurgemäßen Nachweise (Entrauchungssimulation und Evakuierungssimulation) sind weitere quantifizierte Schutzziele festgelegt, um eine ausreichende Personensicherheit im Brandfall nachweisen zu können.

Gebäudekategorie

Der Neubau Messe Basel ist gemäß BSN Art. 12 als bauliche Anlage mit Räumen mit großer Personenbelegung zu beurteilen. Von einer zusätzlichen Einstufung in die Kategorie "Hochhaus" konnte im Einvernehmen mit der zuständigen Brandschutzbehörde abgesehen werden. Dabei wurde vorausgesetzt, dass sich die Oberkante des Fußbodens des obersten Hallengeschosses nicht mehr als 22 m über der Geländeoberfläche befindet.

Baulicher Brandschutz

Im Sinne einer robusten Komponente des Brandschutzkonzepts wurden neben einer überwiegend nichtbrennbaren Materialisierung auch an die tragenden und brandabschnittbildenden Bauteile erhöhte Anforderungen gestellt.

Baukörper, Fassade und Dämmstoffe weisen eine Brandkennziffer (BKZ) 6.3 (nicht brennbar, nbb) oder BKZ 6.3q (quasi nichtbrennbar) auf oder verfügen über ein vergleichbares europäisches Zertifikat wie z. B. Baustoffklasse A bzw. A1 (= BKZ 6.3) resp. A2-s1.d0 (≈ BKZ 6.3q) nach EN 13501-1 / EN 1182 / EN 1716 / DIN 4102 resp. zweitem auch EN 13823.

Die tragenden und brandabschnittsbildenden Bauteile unterliegen dem Anspruch REI 90 (nbb), bewegliche Elemente (Klappen, Türen und Tore) bis auf wenige Ausnahmen EI 30.

Die Ausstellungsflächen wurden jeweils als zusammenhängende Brandabschnitte mit Grundflächen von bis zu 14.500 m^2 realisiert.

Die beiden Foyers Nord und Süd bilden jeweils zusammen mit den angrenzenden Drittnutzungen sowie den leicht zurückversetzten Galerieebenen je einen gemeinsamen Brandabschnitt. Auf eine Brandabschnittsbildung zur "City-Lounge" konnte schutzzielorientiert (s.u.) verzichtet werden. Somit war es im Interesse einer architektonisch ansprechenden und wirtschaftlich optimierten Lösung möglich, die bis zu 10 m hohen, gewölbten Verglasungen zur "City-Lounge" und zu den Drittnutzungen ohne klassifizierten Feuerwiderstand auszuführen.

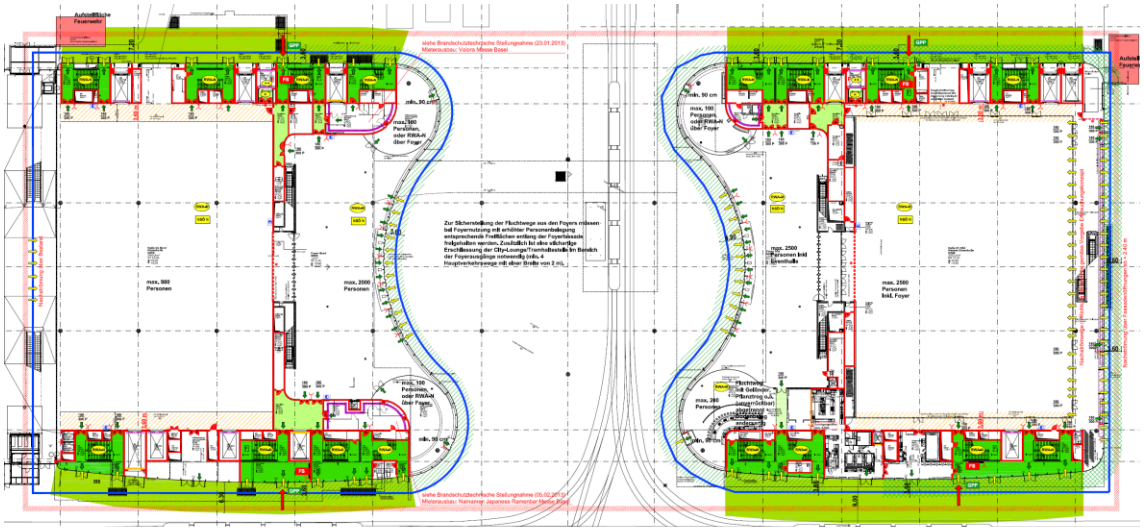


Bild 4 Brandschutzplan vom Erdgeschoss

Die großflächigen Anlieferungsbereiche im Untergeschoss wurden in zwei Brandabschnitte bzw. die Bereiche "Nord" und "Süd" unterteilt.

Die Abtrennung zum nördlich angrenzenden Bestand wurde in den einzelnen Geschossen wie folgt realisiert:

- UG: Brandfallgesteuerte EI 60-Tore im Bereich der Anlieferungszonen,
- EG: Offene Anbindung an die bestehende Ausstellungsfläche (entspricht der ursprünglichen Situation - vor dem Rückbau),
- 1. OG: Brandfallgesteuerte EI 60-Tore im Bereich der Ausstellungflächen.

Um einer möglichen Brandausbreitung vom Außenbereich (z. B. LKW-Brand oder Brand eines Verkaufsstandes) auf die Obergeschosse des Gebäudes in ausreichendem Maß vorzubeugen, wurde die Fassade im Bereich der Auskragungen sowie im Bereich des Lichthofs von außen nach innen in der Qualität EI 90 (nbb) ausgeführt.

Die weitere Festlegung von Brandabschnitten erfolgte auf Basis der BSR – sie betrifft einzelne Geschosse, Korridore, Treppenanlagen, Vertikalverbindungen wie Aufzugs-, Lüftungs-, Installations-, Abwurfschächte, technische Räume, Räume unterschiedlicher Nutzung, insbesondere bei unterschiedlicher Brandgefahr.

Die Evakuierung des Gebäudes erfolgt direkt oder über entsprechend ausgebildete Korridore (DE: notwendige Flure) und / oder Treppenhäuser (DE: Treppenraum) ins Freie. Um dort einen kontinuierlichen Abfluss von Personen in öffentlichen Verkehrsflächen zu ermöglichen, bzw. um Staubildungen im Bereich der Notausgänge vorzubeugen, wurden im Aussenbereich Flächen definiert, die je nach Betriebszustand auf entsprechend vorgegebener Breite frei begehbar zu halten sind. Für die Evakuierung der Hallenobergeschosse stehen 28 als

Schachteltreppen ausgeführte Treppenanlagen zur Verfügung. Diese stehen innerhalb eines Treppenhauskerns in offener Verbindung zueinander. Die Treppenhauskerne werden teilweise im Erdgeschoss miteinander verbunden, sodass insgesamt betrachtet 12 voneinander unabhängige Treppenhauskerne mit 28 Treppenanlagen zur Verfügung stehen.

Mit den geplanten Notausgängen können aus den Aufenthaltsbereichen die gemäß VKF zulässigen Fluchtwegdistanzen aus dem Raum von 20 resp. 35 m (ein resp. zwei Ausgänge aus dem Raum) bis in gesicherte Fluchtkorridore / Treppenanlagen oder ins Freie bis auf wenige behördlich abgestimmte Ausnahmen und ohne Berücksichtigung der Standbauten eingehalten werden. Die Berücksichtigung der Standbauten erforderte diesbezüglich eine besondere Betrachtungsweise (s.u.).

Die Ausgangsbreiten wurden im Einklang mit der VKF-Brandschutzrichtlinie "Flucht- und Rettungswege" so festgelegt, dass eine etappenweise Evakuierung der einzelnen Hallen in ausreichender Breite möglich ist. Im Gegensatz zu Deutschland [9], dürfen in der Schweiz die Treppenanlagen unabhängig von der Personenbelegung mehreren Geschossen zugeordnet werden. Dieser Vorteil relativiert sich wieder, da in der Schweiz aus den Obergeschossen einem 1,2 m breiten Ausgang nur 120 Personen zugewiesen werden dürfen – dies sind im Vergleich zu Deutschland [9] 80 Personen weniger.

Technischer Brandschutz

Der Neubau Messe Basel verfügt über eine Sprinkleranlage (Vollschutz nach SES [8]) sowie eine flächendeckende Brandmeldeanlage (Vollüberwachung nach SES [7]). Unter bestimmten Voraussetzungen müssen auch temporäre Messestände mit mobilen Brandmeldern, welche dann auf eine separate Brandmelderzentrale aufgeschaltet sind, ausgerüstet werden. Eine Sprinklerung der Standbauten ist nicht vorgesehen (s.u.).

Für eine frühzeitige Alarmierung der anwesenden Personen sowie die Unterstützung einer etappenweisen Evakuierung ist eine entsprechend zonierte Beschallungsanlage gemäß EN 60849 [10] installiert.

Darüber hinaus werden die Anlieferungszonen im Untergeschoss, die Ausstellungsflächen einschließlich Eventhalle und Foyers im Erdgeschoss, sowie die Drittnutzungen mit mehr als 100 Personen mechanisch entraucht. Die Nachströmung von Ersatzluft erfolgt in allen Bereichen natürlich, über entsprechend im Brandfall angesteuerte Türen, Fenster und Klappen. Diesem Grundsatz folgend, wurden auch in das mobile Trennwandsystem der Eventhalle entsprechende Klappen integriert. Die Brandgasventilatoren befinden sich in den vier Technikzentralen auf dem Dach (siehe Bild 2, dort die Dachaufbauten). Sie versorgen über ein Kanalsystem mit entsprechender Klappensteuerung alle zu entrauchenden Bereiche mit der benötigten Absaugleistung von bis 480.000 m^3/h. Die Wirksamkeit der Entrauchungsanlagen wurde mittels umfangreicher rechnerischer Brandsimulationen nachgewiesen (s.u.).

Die Stromversorgung der sicherheitsstromberechtigten Anlagen erfolgt über Installationen mit 90-minütigem Funktionserhalt sowie eine gesicherte zweite Einspeisung gemäß BSR „Kennzeichnung von Fluchtwegen, Sicherheitsbeleuchtung, Sicherheitsstromversorgung“ [3], ergänzt durch Akkumulatoren, welche unter anderem für eine unterbrechungsfreie Stromversorgung der Brandmeldetechnik sowie der hinterleuchteten Rettungszeichen sorgen.

Brandfallsteuerungen

Das richtige Zusammenspiel der brandsicherheitsrelevanten Anlagen im Brandfall bedurfte einer umfassenden Planung. Aufgrund der Komplexität bei solchen Bauvorhaben werden die Grundlagen und die Philosophie der Brandfallsteuerungen in einem Konzept Brandfallsteuerungen dokumentiert. Die zugehörige, umfassende Brandfallsteuerungsmatrix dient als Grundlage für die weitere Programmierung.

Entsprechend dem Wunsch des Betreibers, den laufenden Messebetrieb bei Auslösung eines Brandalarms so wenig wie möglich zu beeinträchtigen, wurden 132 einzelne Auslösezonen und ca. 950 Ansteuerungen vorgesehen.

Neben der Betrachtung des Neubaus wurden auch Schnittstellen zu benachbarten Gebäuden analysiert, bereinigt und entsprechend in die Dokumentation aufgenommen.

Organisatorischer Brandschutz

Das Technische Gebäudemanagement der MCH Messe Schweiz (Basel) AG ist für den organisatorischen Brandschutz der gesamten Messe Basel verantwortlich. Um dieser Verantwortung gerecht werden zu können, gibt es neben einer 24 Stunden besetzten Messezentrale einen Brandschutzbeauftragten. Die Aufgaben des Brandschutzbeauftragten sind in einem Pflichtenheft beschrieben, welches im Zuge des Neubaus entsprechend den projektspezifischen Anforderungen fortgeschrieben wurde. So ist zum Beispiel mit entsprechend geschulten Stockwerksbeauftragten organisatorisch sicherzustellen, dass flüchtende Personen, die einmal die Messehalle verlassen haben, nicht wieder zurückkehren und sich im Freien auch vom Gebäude entfernen und nicht einfach vor dem Ausgang stehen bleiben, was die Flucht von folgenden Personen behindern würde.

Damit die behördliche Zeitvorgabe für die Gesamtevakuierungsdauer einer Halle eingehalten werden kann, ist während der Messen durch das Betriebsregime organisatorisch zu gewährleisten, dass spätestens 3 Minuten nach Ansprechen des ersten Brandmelders die Evakuierung ausgelöst werden kann. In dem Wissen, dass diese Anforderung einen hohen Anspruch an das Betriebsregime stellt, wurden in einem separaten Konzept entsprechende Abläufe, Hilfsmittel und Personalressourcen definiert.

Hinsichtlich der öffentlich nutzbaren Flächen im Bereich der "City-Lounge" wurde im Zuge des Neubaus seitens der zuständigen Brandschutzbehörde vorgegeben, dass die Betreiber von Fahrgeschäften über die besondere Situation im Bereich der "City-Lounge" (obligatorisch) zu schulen sind. Die Fahrgeschäfte mit höheren Aufenthaltsebenen (z. B. Krake) müssen im Brandfall unverzüglich in die Ausgangsposition gefahren werden, um den Nutzern eine sichere Flucht aus dem überdachten Bereich zu gewährleisten.

Abwehrender Brandschutz

Das Gebäude kann von den hier zuständigen Einsatzkräften der Berufsfeuerwehr Basel-Stadt von allen vier Seiten angefahren werden. Im süd- und nordöstlichen Außenbereich befinden sich zwei Aufstellflächen für die Fahrzeuge der Feuerwehr, wobei der Zugang in das Gebäudeinnere über vier, jeweils in den Eckbereichen des Neubaus angeordnete Feuerwehrhauptzugänge sowie zwei an der östlichen Gebäudeseite angeordneten Feuerwehrlifte gewährleistet wird.

Die Löschwasserversorgung erfolgt über die bestehenden Hydranten im öffentlichen Straßenland. Im Gebäude können über Innenhydranten bei einem Fließdruck von 3 bar mindestens 300 Liter Löschwasser pro Minute entnommen werden.

Als technische Einrichtungen werden im Bereich der jeweils großzügig gestalteten Hauptzugänge zwei Fernsignalisationstableaus (eines davon für die Standbauten) sowie eine Bedienstelle Entrauchung (s.u.) angeordnet. Weiter wird für die gebäudeinterne Kommunikation der Einsatzkräfte der Feuerwehr, Polizei und Sanität ein digitales Sicherheitsfunknetz auf Basis Polycom bereit gestellt.

Standbauten

Um sicherzustellen, dass die Standbauten, insbesondere die großflächigen und mehrgeschossigen Standbauten der "BASELWORLD" (siehe Bild 3) im Einklang mit den Maßnahmen der übergeordneten Brandschutzplanung stehen, mussten im Brandschutzkonzept entsprechende Vorgaben an die Layoutplanung der Standbauten bzw. die mindestens freizuhaltenden Fluchtwege und deren Breite sowie die Abstandsflächen zu Nachströmöffnungen der Entrauchungsanlagen gemacht werden.

Zudem wurden Regeln für die bauliche Ausbildung der Standbauten festgelegt, welche später auch in die Standbaurichtlinien der Messe Basel eingeflossen sind [11]. Unter Berücksichtigung dieser Regeln ist es möglich, auch die großflächigen und mehrgeschossigen Standbauten ohne Sprinkleranlage auszuführen. Diese, auch vor dem ausführungspraktischen Hintergrund, sinnvolle Ausnahme wurde von der zuständigen Brandschutzbehörde unter Berücksichtigung des Gesamtkonzepts und des leistungsstarken organisatorischen und abwehrenden Brandschutzes bewilligt.

"City-Lounge"

Der überwiegende Teil "City-Lounge" grenzt an den geschlossen Baukörper. Vor diesem Hintergrund kann die "City-Lounge" trotz Außenklima aus brandschutztechnischer Sicht nicht ohne weiteres als Außenraum beurteilt werden.

Ein erster Abgleich mit den Beurteilungsgrundlagen hat ergeben, dass die "City-Lounge" ohne besonderen Nachweis in den Überwachungsumfang der Brandmeldeanlage sowie den Schutzumfang der Sprinkleranlage einbezogen werden müsste. Gleichzeitig müssten die rund 10 m hohen und gewölbten Verglasungen zu den angrenzenden Foyers und Drittnutzungen als Brandschutzverglasung ausgeführt werden. Dies hätte wiederum zur Folge gehabt, dass die Fluchtwege aus den Foyers und Drittnutzungen nicht über die "City-Lounge" hätten geführt werden dürfen, da in der Schweiz gemäß aktueller Vorschriftenlage nicht über andere Brandabschnitte geflüchtet werden darf.

Die normative Auslegung der "City-Lounge"-Situation hätte somit zu einer wirtschaftlich und ästhetisch unbefriedigenden Lösung geführt. Daher wurde eine optimierte Auslegung dieser Situation mit Hilfe von Brand- und Evakuierungssimulationen angestrebt. Hierbei wurde als maßgebender Bemessungsbrand der Brand eines LKWs an verschiedenen Orten der "City Lounge" simuliert. Gleichzeitig wurde mittels Evakuierungssimulationen abgeschätzt, wie lange die Evakuierung der relevanten Bereiche dauert.

Im Verlauf dieser Untersuchungen konnte aufgezeigt werden, dass die Personen auch im ungünstigsten Brandfall ausreichend lange die Möglichkeit haben, sich in mindestens zwei voneinander unabhängigen Richtungen in Sicherheit zu bringen. Dabei ist es zu vertreten, sowohl auf die Sprinklerung der "City-Lounge" als auch auf die Brandabschnittsbildung zu den angrenzenden Foyers und Drittnutzungen zu verzichten. Wichtige Voraussetzungen für diese Erleichterung waren zum einen, dass ein bestimmter Anteil der Fluchtwege aus den Foyers unabhängig von der "City-Lounge" ins Freie geführt wird. Zum anderen muss die frühzeitige Detektion hochenergetischer Brände im überdachten Außenbereich möglich sein – dies wird heute mittels Wärmemeldekabeln gewährleistet.

Evakuierungssimulationen

Gemäß der behördlichen Vorgabe darf die Gesamtevakuierungsdauer (siehe Bild 7) einer Messehalle einschließlich Standbauten ab Detektion des Brandes maximal 10 Minuten betragen. Dabei muss spätestens 3 Minuten nach Ansprechen des ersten Brandmelders die Evakuierung ausgelöst werden können (Quittierung Alarm, Erkundung und Auslösung Evakuierung ≤ 3 Minuten). Alle Benutzer des betroffenen Brandabschnitts müssen damit im Ereignisfall das Gebäude innerhalb von 7 Minuten nach Alarmierung verlassen haben (Reaktionszeit + Evakuierungsdauer ≤ 7 Minuten) um die vorgegebene Gesamtevakuierungsdauer einhalten zu können.

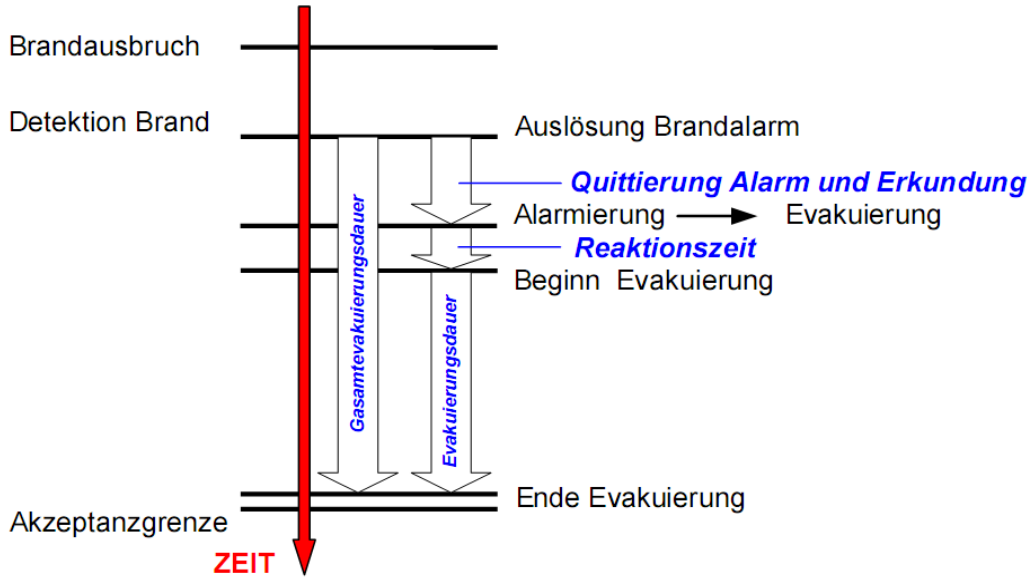


Bild 7 Schema Gesamtevakuierungsdauer Neubau Messe Basel

Der Nachweis wurde mit dem Simulationsprogramm ASERI [12], Version 4.7 geführt. ASERI beschreibt die individuellen Bewegungen aller Personen, wobei wesentliche Verhaltensaspekte (wie z.B. Reaktions- und Verzögerungszeiten, Wahl des Fluchtweges, Verhalten bei Staubildung) durch probabilistische Ansätze beschrieben werden. ASERI wurde bereits für eine Vielzahl von Projekten mit großen Personenbelegungen (z.B. Messehallen, Großbahnhöfe oder Fußballstadien) erfolgreich eingesetzt und wird somit als validiert angesehen [13].

Im Simulationsmodell wurden alle, für den Ablauf der Evakuierung wichtigen geometrischen Details des Projektes berücksichtigt.

Im Sinne eines konservativen Ansatzes wurde die zu erwartende Personenbelegung auf 5.200 aufgerundet. Die Verzögerungszeit bzw. Reaktionszeit wurde unter Berücksichtigung der Evakuierungsanlage sowie des leistungsstarken Betriebsregimes den Personen zwischen 0 und 60 Sekunden zufallsverteilt aufgeprägt.

Bei der Türmodellierung kann ASERI zwischen sogenannten "Standardtüren" und "Ausgangstüren" unterscheiden. Während die "Standardtür" die Rückkehr einer Person in einen bereits verlassenen Raum zulässt, ist dies bei einer "Ausgangstür" nicht mehr möglich [12]. Unter Berücksichtigung der vorstehend beschriebenen organisatorischen Anforderungen wurde ausschließlich mit "Ausgangstüren" gerechnet. Dabei wurde die Option "dynamische Ausgangswahl" [12] gewählt, sodass Personen bei einer Stauung an einem Ausgang die Möglichkeit haben einen anderen, freien Ausgang zu wählen. Weitere Eingabeparameter wie Gehgeschwindigkeit und Körpermaße wurden im Einklang mit der RIMEA-Richtlinie [13] festgelegt. Um möglichst viele Betriebszustände abdecken zu können wurde der Nachweis sowohl für die leeren Messehallen sowie ein repräsentatives Standbaulayout geführt.

Da die errechneten Evakuierungszeiten in starkem Maße von den gewählten Randbedingungen, wie Gehgeschwindigkeiten oder Verzögerungsdauern abhängig sind, wurde für ausgewählte Szenarien die Sensitivität für einzelne Randbedingungen geprüft. Um hinsichtlich der zufallsverteilten Randbedingungen eine statistisch belastbare Aussage über die zu ermittelnden Evakuierungszeiten erhalten zu können, wurden entsprechend den Empfehlungen in [12] und [13] pro Szenario 10 Berechnungsläufe durchgeführt.

Das Bild 8 zeigt ein Zwischenergebnis zur Simulation der Messehalle im 2. Obergeschoss ohne Standbauten. Zum dargestellten Zeitpunkt stauen sich die Personen erwartungsgemäß bereits vor den Ausgängen. Gut erkennbar ist hierbei die ungleichmäßige Frequentierung der einzelnen Treppenhäuser, bzw. die erhöhte Belastung der Treppenhäuser nahe der "City-Lounge". Dies ist der Beleg für eine nicht ganz ideale Verteilung der erforderlichen Treppenhäuser. Dies ist der Vorgabe geschuldet, dass keine Treppenhauskerne in der "City-Lounge" herabgeführt werden dürfen.

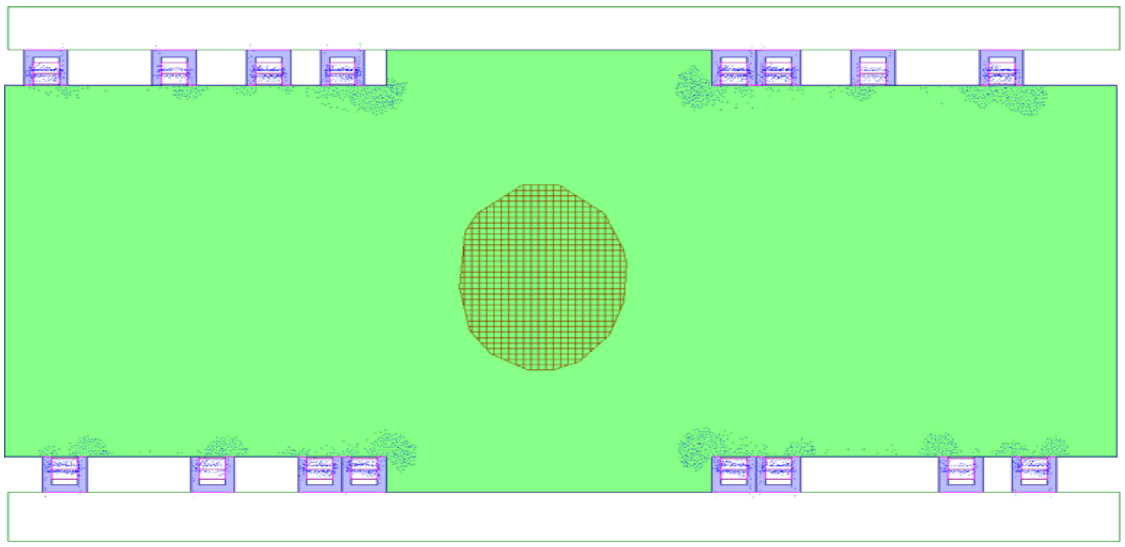


Bild 8 Halle ohne Standbauten, Personenverteilung 90 s nach Simulationsbeginn

Im Ergebnis lassen die durchgeführten Evakuierungssimulationen die Schlussfolgerung zu, dass:

- die Evakuierungsdauer einer Messehalle ohne Standbauten 4 min 50 s betragen kann,
- die Evakuierungsdauer einer Messehalle mit Standbauten im Mittel 6 min 14 s betragen kann und
- die Zeit nach Evakuierungsbeginn bis sich alle Personen in einem gesicherten Treppenhaus befinden rund 3,5 min (ohne Standbauten) bis 5 min (mit Standbauten) betragen kann.

Demzufolge ist der Einfluss der Standbauten auf die Evakuierungsdauer eher als gering einzustufen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Nachteil der längeren Wege zum Teil durch die gute Kanalisierung der Personenströme infolge der zwischen den Standbauten vorgegebenen Wege wieder aufgewogen wird.

Zusammenfassend gilt es festzuhalten, dass die behördliche Vorgabe einer Gesamtevakuierungsdauer von maximal 10 Minuten unter den gegebenen Randbedingungen eingehalten werden kann. Hierbei wird bewusst die Formulierung "kann" gewählt, da die Ergebnisse von Evakuierungssimulationen natürlich nicht exakt vorhersagen können, wie eine Evakuierung in Realität ablaufen wird. Sie sind im Sinne einer Entscheidungshilfe jedoch dazu geeignet neben dem theoretischen Nachweis der Gesamtevakuierungsdauer eine Bewertung der zu erwartenden Personenströme, Staupunkte sowie die Durchlässigkeit des Systems vorzunehmen.

Die abschließende Bewertung, ob eine ausreichende Personensicherheit im Brandfall gegeben ist, erfolgte im Abgleich mit den Ergebnissen der Brandsimulationen.

Brandsimulationen

Im Folgenden wird das Entrauchungskonzept der beiden Hallenobergeschosse am Beispiel der Messehalle im 2. OG vorgestellt und über den durchgeführten Nachweis mittels rechnerischen Brandsimulationen berichtet.

Die Messehalle im 2. OG wird in Analogie zur Halle im 1. OG mechanisch mit einer Absaugleistung von 480.000 m^3/h als zusammenhängender Rauchabschnitt entraucht. Je Längsseite befinden sich hierbei 52 Absaugöffnungen in Deckennähe. Die Nachströmung von Ersatzluft erfolgt hierbei bodennah über brandfallgesteuerte Öffnungen in der Fassade mit einem aerodynamisch wirksamen Querschnitt von insgesamt rund 50 m^2.

Erste Überlegungen, die Hallen mittels Schürzen in Rauchabschnitte zu unterteilen wurden schnell wieder verworfen, da neben dem hohen Installationsgrad im deckennahen Bereich seitens des Betreibers der Anspruch besteht, auch mehrgeschossige Standbauten mit maximaler Flexibilität anordnen zu können. Erste Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass es nicht sinnvoll wäre, im Brandfall die Entrauchungsleistung über die gesamte Hallenlänge bereitzustellen. Sollte es in einem Hallenende brennen, würde auf Grund der Großflächigkeit am gegenüberliegenden Ende wahrscheinlich während des beurteilungsrelevanten Zeitraums kein Rauch sondern nicht kontaminierte Frischluft angesaugt werden. Vor diesem Hintergrund wurde ein Konzept mit brandortabhängiger Entrauchung favorisiert. D.h., in Abhängigkeit des detektierten Brandorts wird über eine entsprechende Klappensteuerung gewährleistet, dass die Absaugleistung dort konzentriert bereitgestellt wird, wo der Rauch auch wirksam erfasst werden kann.

Der Nachweis der Wirksamkeit des Entrauchungskonzepts erfolgte unter Verwendung der Simulationsprogramme FDS [14] und STAR-CCM+ [15]. Bei beiden Programmen handelt es ich um Feldmodelle oder im internationalen Begriff CFD - Programme (Computational Fluid Dynamics). Bei Feldmodellberechnungen wird das Raumvolumen in eine finite Anzahl numerischer Gitterzellen, sog. "Kontrollvolumina", unterteilt. Für diese wurden nun in sehr kurzen Zeitschritten jeweils aufwendige strömungsmechanische Berechnungen am Gesamtsystem durchgeführt. Die zugrunde liegenden nichtlinearen partiellen Differentialgleichungssysteme leiten sich aus der Grundlage der Strömungsmechanik und den Kontinuitätsgesetzen für Masse-, Energie- und Impulserhaltung ab.

Als Brandort wurde der Brand eines gedeckten Messestandes untersucht, da dieser im Vergleich zu einem ungedeckten Messestand im Brandfall eine deutlich größere Rauchgasdurchmischung und somit auch ein größeres, abzuführendes Rauchgasvolumen hervorrufen wird (siehe Bild 9). Der Standbau wurde hierbei an allen vier Seiten offen modelliert.

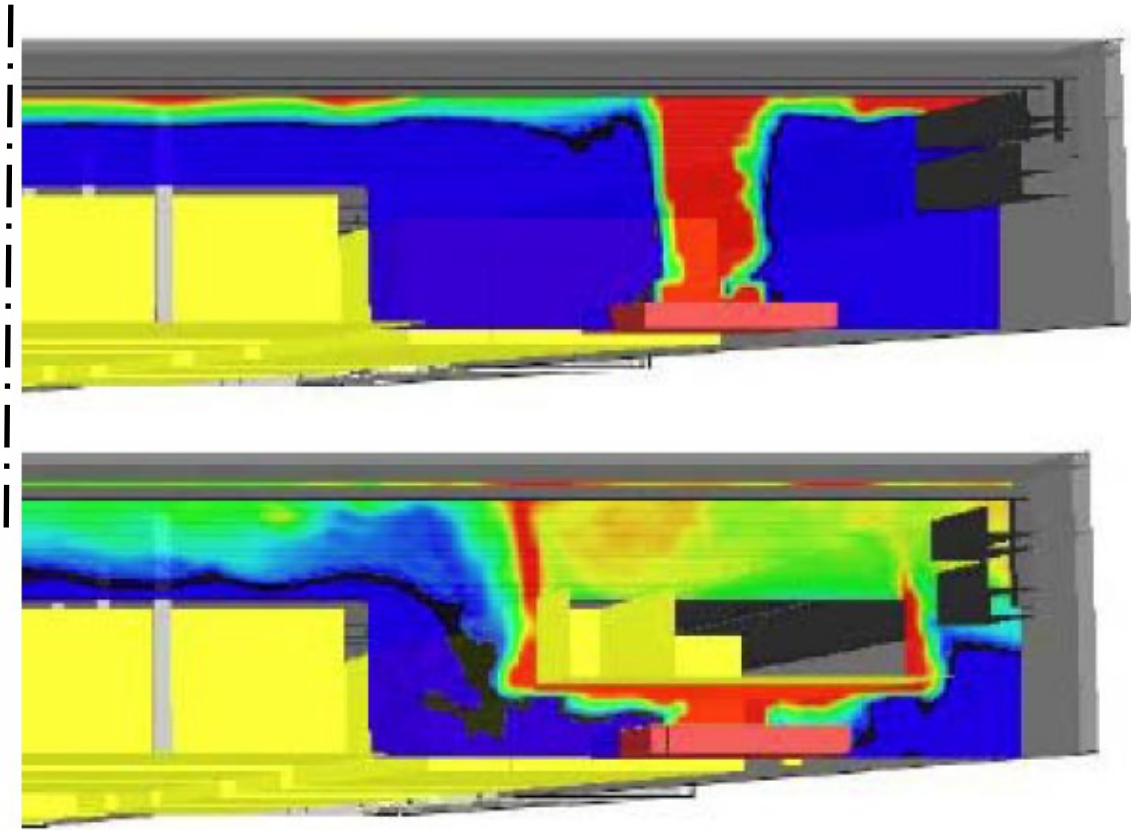


Bild 9 *Ergebnis von Voruntersuchungen zur Ermittlung des maßgebenden Brandszenarios - Gegenüberstellung der Rauchgasverteilung bei einem Brand eines gedeckten und eines ungedeckten Standbaus.*

Um die Messenutzung nicht einschränken zu müssen, wurden die weiteren Eingangsgrößen im Sinne eines konservativen Ansatzes nach [16] wie folgt festgelegt:

- schnelle Brandentwicklung α = 0,047 kW/s^2 für "fast"
- spez. Energiefreisetzungsrate 500 kW/m^2
- stark rußendes Brandgut Polyurethan

Untersucht wurden sowohl niedrig- als auch hochenergetische Brandszenarien. Die niedrigenergetischen Brände (konstante Energiefreisetzung von 150 kW ab der 5. Brandminute) wurden bis zum Beginn wirksamer Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr untersucht - welcher hier mit 15 Minuten nach Brandbeginn angesetzt werden durfte. Maßgebend war jedoch der hochenergetische Brand, welcher unter der Annahme, dass der Standbau stehen bleibt, nach dem α-t2-Ansatz bis zum abgeschätzten Auslösezeitpunkt der Sprinkleranlage - etwa 500 s nach Brandbeginn - untersucht wurde. Zu diesem Zeitpunkt hat der Brand eine Fläche von 23,5 m^2 und eine maximale Energiefreisetzung von 11,75 MW erreicht. Der Gegebenheit, dass über den Zeitpunkt der Sprinklerauslösung hinaus keine belastbaren Ergebnisse zur Verteilung des Wasserdampf-Rauchgasgemischs im Brandraum erzielt werden können, wurde durch eine entsprechende Bewertung der Ergebnisse zum Sprinklerauslösezeitpunkt begegnet.

Als nachweisführender Kenngröße wurde neben der Temperatur T [C°] der Extinktionskoeffiezient K [m^{-1}] herangezogen. Bereiche mit T ≤ 50 °C und K ≤ 0,15 m-1 wurden hierbei als raucharm bewertet, wobei K im vorliegenden Fall stets maßgebend war.

Tabelle 2 Nachweisführende Kenngrößen beim Entrauchungsnachweis

Nachweisführender Parameter	Raucharme Schicht	Rauchgasschicht
Extinktionskoeffizient K [m-1]	≤ 0,15	> 0,15
Temperatur T [°C]	≤ 50	≤ 200

Das Bild 10 zeigt die Verteilung des Extinktionskoeffizienten 500 Sekunden nach Brandbeginn. Die Grenzschicht K = 0,15 m-1 wurde zwecks einer eindeutigen Zuordnung hierbei schwarz markiert. Aus dem Längsschnitt geht neben der gut erkennbaren Rauchgasschichtung hervor, dass sich die Rauchgase im betrachteten Zeitraum gerade mal bis zur Hallenmitte ausgebreitet haben, bzw. weite Teile der Halle noch rauchfrei sind. Zu diesem Zeitpunkt können gemäß den Evakuierungssimulationen bereits alle Personen ein gesichertes Treppenhaus erreicht haben. Selbst wenn ein Treppenhaus brandortbedingt nicht begehbar sein sollte, besteht die Möglichkeit, sich innerhalb der Halle auf ausreichend raucharmen Wegen in mindestens zwei voneinander unabhängige Richtungen vom Brandgeschehen zu entfernen und über ein sicher begehbares Treppenhaus ins Freie zu flüchten.

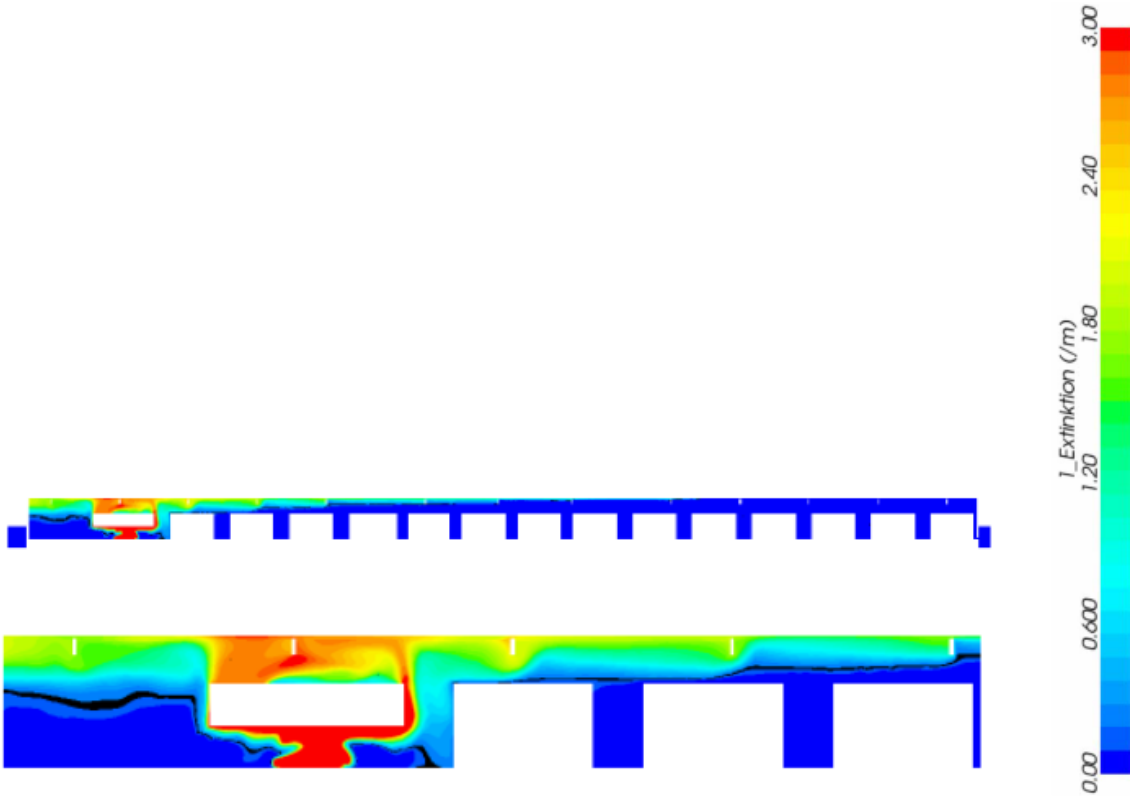


Bild 10 *Verrauchungsverhältnisse 500 s nach Brandbeginn im Längsschnitt und ausschnittsweise vergrößert (unten)*

Vor diesem Hintergrund konnte im Einvernehmen mit der zuständigen Brandschutzbehörde hergestellt werden, dass eine ausreichende Sicherheit der Personen in den Hallenobergeschossen im Brandfall gegeben ist. Die Interventionsmöglichkeiten konnten auf Grund der positiven Ergebnisse sowie den verschiedenen voneinander unabhängigen Angriffsmöglichkeiten ebenfalls als ausreichend bewertet werden.

Feuerwehr-Bedienstellen Entrauchung

Auf Grund der bereits beschriebenen, komplexen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen bestand die Herausforderung, deren Bedienung für die Interventionskräfte der Feuerwehr so einfach und überschaubar wie möglich zu gestalten.

Daher wurde – basierend auf den Erfahrungen vergangener Projekte ähnlicher Komplexität – in enger Absprache mit Betreiber, der Berufsfeuerwehr Basel-Stadt sowie der Gebäudeversicherung des Kantons Basel-Stadt, eine auf Touchpanels basierende Bedienstelle entwickelt. Diese Bedienstelle, welche an jedem Feuerwehrzugang installiert ist, gibt den intervenierenden Einsatzkräften einerseits einen schnellen Überblick über die bereits brandfallgesteuert aktivierten Anlagen und erlaubt andererseits deren Übersteuerung bzw. die Aktivierung zusätzlicher Anlagen (Bild 11).

In dem zum Teil offen an den Neubau angrenzende Halle 1 C/D wurden im Sinne eines einheitlichen Bedienkonzepts vergleichbare Bedienstellen nachgerüstet.

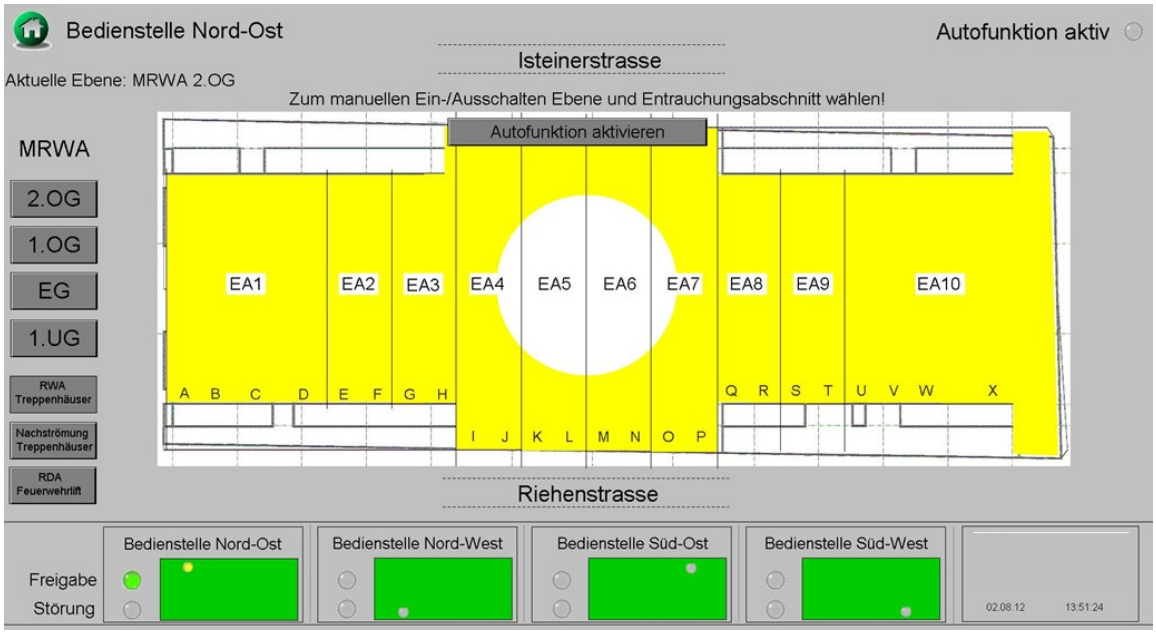


BILD 11 Screenshot Feuerwehr-Bedienstelle Entrauchung

Fassade - eine besondere Nachströmsituation

Die Nachströmöffnungen der Hallengeschosse befinden sich hinter der Lamellenfassade, wobei die Lamellen unterschiedlich weit geöffnet sind. In den größtmöglich geöffneten Bereichen wäre die Einschätzung wahrscheinlich noch ohne besonderen Nachweis möglich, ob die Lamellen einen nennenswerten Einfluss auf die aerodynamische Wirksamkeit der Nachströmöffnungen haben oder nicht. Da sich jedoch ein großer Anteil der Nachströmöffnungen hinter den nahezu geschlossenen Lamellen befindet, war ein besonderer Nachweis notwendig. Im vorliegenden Fall wurde eine Untersuchung mittels CFD (hier: Star-CCM+ [15]) durchgeführt (Bild 12). Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Lamellenfasse die aerodynamische Wirksamkeit einschränkt und die Nachströmöffnungen rund 10% größer ausgeführt werden mussten.

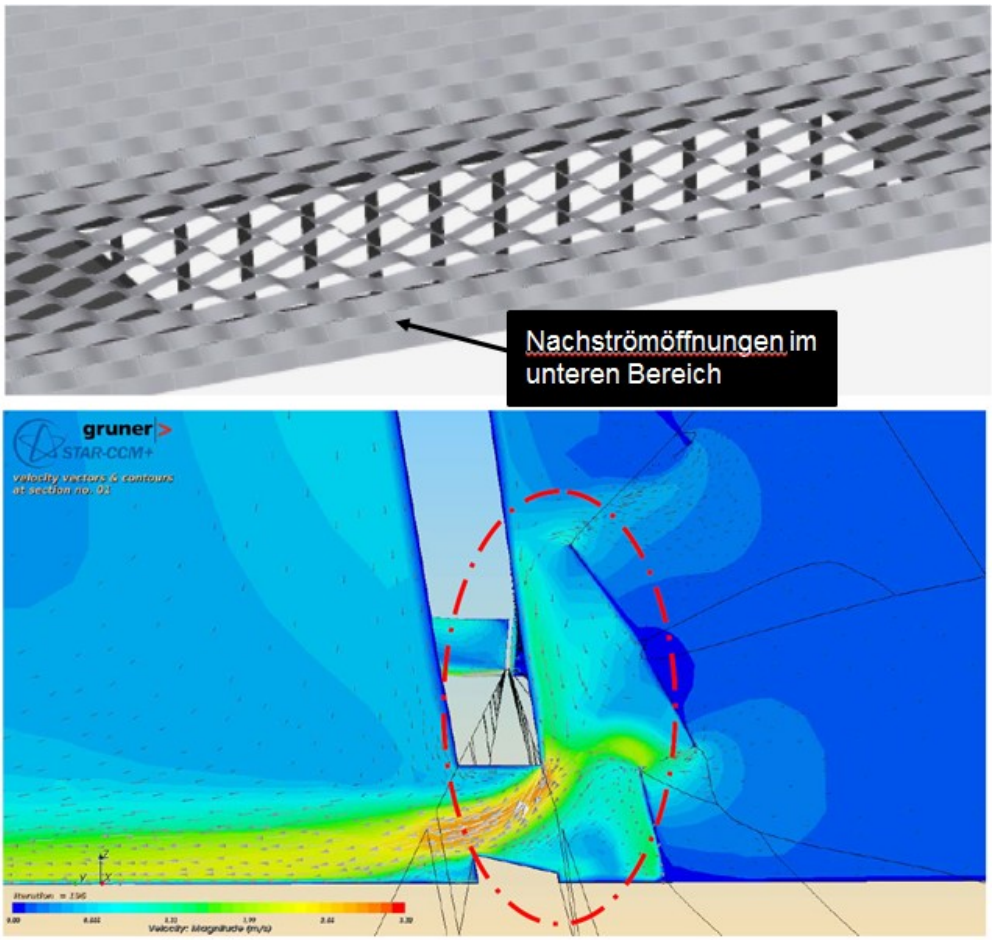


Bild 12 Ausschnitt CFD-Modell (oben) und -Ergebnisschnitt Lamellenfassade (unten)

Rauchfreihaltung der Treppenhäuser

Ab einer personenbedingten Treppenbreite von 3,6 m müssen die Treppenhäuser in der Schweiz mit besonderen Maßnahmen vor Raucheintritt geschützt werden. In der Regel erfolgt dies mit Hilfe von Rauchschutzdruckanlagen nach SN EN 12101-6. Auf Grund der großen Anzahl der zu schützenden Treppenhäuser wurde dieser übliche Ansatz hinterfragt und der folgend beschriebene optimierte Konzeptansatz verfolgt, welcher Synergien mit den leistungsstarken Entrauchungslagen zulässt. Vor diesem Hintergrund öffnen auf Erdgeschossebene in den Treppenhäusern brandfallgesteuert Klappen in der Fassade. Sollte es in einem der Hallengeschosse brennen, wird gleichzeitig brandortabhängig die entsprechende Entrauchungsanlage aktiviert, wodurch die vom Brand betroffene Halle gegenüber den Treppenhäusern in Unterdruck gesetzt wird und somit der Rauchgaseintritt wirksam verhindert wird. Diese Aussagen wurden mit Hilfe von aerodynamischen Untersuchungen bestätigt (CFD Simulationen), da im Hallengeschoss mit Inbetriebnahme der Entrauchungsanlage ja grundsätzlich auch die Möglichkeit besteht, dass der Druckausgleich vollständig über die Nachströmöffnungen erfolgt.

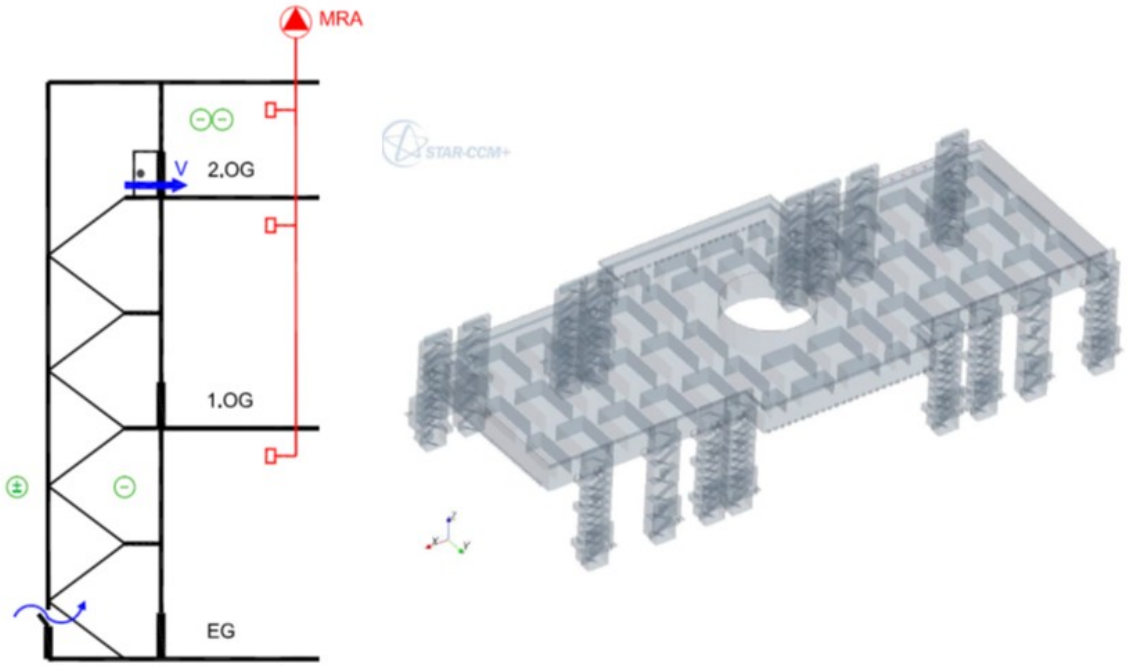


Bild 13 Konzeptansatz zur Rauchfreihaltung der Treppenräume (links) und CFD-Modell (rechts)

Das Bild 14 zeigt in diesem Zusammenhang eine Auswertung der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Treppenhaustüren und Nachströmöffnungen als Beleg dafür, dass der vorstehend erläuterte Konzeptansatz funktioniert.

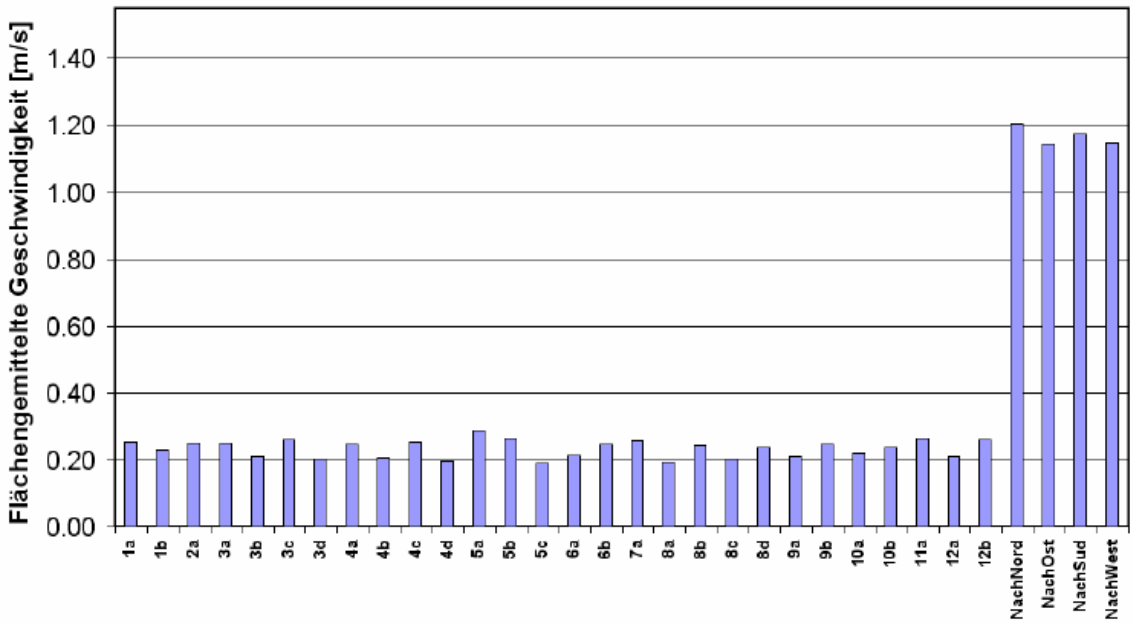


Bild 14 Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Treppenhaustüren und Nachströmöffnungen

Schutzzielorientierte Nachweise beim Tragwerk

Im Rahmen dieses Beitrages werden kurz zwei Punkte zur Tragkonstruktion des Neubaus Messe Basel näher beleuchtet. Die Tragkonstruktion besteht aus einer Mischkonstruktion aus Stahlbeton, Stahl-Beton-Verbund und einer reinen Stahlkonstruktion.

Der erste Punkt ist die Tragkonstruktion des Dachtragwerkes. Dieses wird ohne Feuerwiderstand ausgeführt. Dabei darf das Dachtragwerk nur sich selber tragen und im Versagensfall nicht dazu führen, dass die Integrität der Brandabschnittsbildung angrenzender Brandabschnitte (Fluchtwege, darunter liegende Geschosse) gefährdet wird. Weiter sind die Teile des Dachtragwerkes zu schützen, die zur Stabilisierung von tragenden Elementen der darunter liegenden Geschosse dienen. Ebenso ist das Dachtragwerk im Bereich der aufgesetzten Technikzentralen zu schützen. Diese Aufgabenstellung wurde konstruktiv gelöst. Die ungeschützte Dachkonstruktion wurde so ausgebildet, dass sich eine kinematische Kette ausbildet, ein Versagen der Konstruktion auf den Brandnahbereich beschränkt bleibt und die geschützten Teile des Dachtragwerkes intakt bleiben.

Grundsätzlich ist für die abgehängte Deckenkonstruktion über der "City-Lounge" der Feuerwiderstand EI 90 (nbb) vorzusehen. Die Anforderung EI 90 bedingt, dass das in Stahl geplante Tragwerk bzw. die Abhänger der Unterdeckenkonstruktion in R 90 (nbb) ausgeführt werden müssen. Auf Grund der großen Anzahl der Abhänger erfolgte hier ein schutzzielorientierter Nachweis auf Grundlage einer Tragwerksbemessung im Brandfall ("heiße Bemessung"). Es wird die positive Gegebenheit genutzt, dass in dem Deckenhohlraum planmäßig und dauerhaft mit einer begrenzten Brandlast in Form von Installationen zu rechnen ist. Hierdurch und auf Grund des im Deckenhohlraum zu erwartenden ventilationsgesteuerten Brandszenarios muss das Tragwerk im Vergleich zum Normbrand voraussichtlich geringeren Temperaturen standhalten.

In der Brandsimulation wurden die Temperaturen für eine Zeitdauer von maximal 90 Minuten ermittelt. Die maximale Temperatur diente dem Tragwerksplaner als Grundlage für die Dimensionierung seiner Konstruktion. Hinsichtlich der Befestigung der Unterkonstruktion an der Betondecke sowie der Unterdecke an der Unterkonstruktion, wurden Konstruktionen in Anlehnung an bisher zugelassene Bauteile (Schrauben, Dübel etc.) gewählt.

AUSFÜHRUNG – UMSETZUNG DES BRANDSCHUTZKONZEPTES

Der Neubau Messe Basel wurde in drei Bauetappen realisiert, wobei die einzelnen Bauetappen jeweils pünktlich zur "BASELWORLD" abgeschlossen waren. Die dritte Bauetappe war hierbei terminlich betrachtet am anspruchsvollsten – in nur 9 Monaten Bauzeit wurden der Abriss von zwei Bestandgebäuden sowie die Fertigstellung des Neubaus realisiert.

Qualitätssicherungsperson Brandschutz

Gemäß Auflagen der zuständigen Brandschutzbehörde musste die fachgerechte Umsetzung des Brandschutzkonzepts durch eine Qualitätsicherungsperson Brandschutz (QS-Person BS) begleitet werden. Auszug aus der Baubewilligung:

"Die QS-Person BS koordiniert den Kontakt mit der Brandschutzbehörde und ist für die ausführenden Firmen erster Ansprechpartner für brandschutztechnische Fragen. Die QS-Person BS stellt sicher, dass von allen Beteiligten geeignete Maßnahmen getroffen werden, um den durch den Bauvorgang erhöhten Brand- und Explosionsgefahr wirksam zu begegnen. Diese Aufgabe kann auch durch einen von der Bauleitung delegierten Sicherheitsbeauftragten wahrgenommen werden. Die QS-Person BS stellt sicher, dass die Endkontrolle der Ausführungsplanung korrekt durchgeführt und ein Protokoll zu Händen der Brandschutzbehörde und der Bauherrschaft erstellt wird. Bei der Endkontrolle wird die Vollständigkeit der Ausführungsplanung und mittels Stichproben die Richtigkeit der Arbeiten überprüft.

Die QS-Person BS achtet bei der Kontrolle insbesondere auf:

- *Konformität mit den gültigen Normen und Richtlinien*
- *Übereinstimmung mit dem ursprünglichen Projekt und dem entsprechenden Brandschutzkonzept*
- *Einhaltung und Umsetzung der Brandschutzauflagen*
- *Realisierbarkeit der geplanten Details*

Die QS-Person BS stellt sicher, dass nach der erfolgreich abgeschlossenen Endkontrolle der Ausführungsplanung die Freigabe zur Ausführung erfolgt.

Die QS-Person BS stellt sicher, dass die Rohbaukontrollen (insbesondere den Einbau von Brandschutzklappen in lufttechnischen Anlagen, den Einbau von Brandschutztüren, das Abschotten von Öffnungen in brandabschnittsbildenden Bauteilen, das richtige Installieren von Komponenten der Brandfallsteuerung etc.) korrekt durchgeführt und ein Protokoll zu Händen der Brandschutzbehörde und der Bauherrschaft erstellt wird.

Die QS-Person BS stellt sicher, dass die Endkontrolle korrekt durchgeführt und ein Protokoll zu Händen der Brandschutzbehörde und der Bauherrschaft erstellt wird.

Die QS-Person BS stellt sicher, dass die integralen Funktionstests aller Brandfallsteuerungen vor Betriebsaufnahme erfolgreich beendet sind."

Eine weitere Erläuterung zu dieser Auflage ist in [17] zu finden. Unabhängig von dieser Auflage stand bereits frühzeitig fest, dass das anspruchsvolle Terminprogramm im Zuge der 3. Bauetappe im Grunde keinen Spielraum für schwer korrigierbare Brandschutzmängel ließ. Somit wurde frühzeitig der Entschluss gefasst, die richtige Umsetzung des Brandschutzes nicht dem Zufall zu überlas-

sen sondern ein entsprechendes umfassendes Brandschutz-QS-Mandat zu beauftragen.

Mängelprävention

Die Zeit zwischen den einzelnen Bauetappen wurde für mängelpräventive Maßnahmen genutzt. So wurden z. B. die Haustechnikplaner dafür sensibilisiert, die Haustechnikinstallationen auch hinsichtlich Brandschutz entsprechend zu koordinieren und so zu optimieren, dass später auch eine fachgerechte Abschottung im Bereich der brandabschnittsbildenden Wände und Decken möglich ist. Bereichsweise konnten so bereits auf dem Plan Situationen identifiziert und im Dialog mit der zuständigen Brandschutzbehörde bereinigt werden, die voraussichtlich nicht zulassungskonform hätten abgeschottet werden können und deren Korrektur auf der Baustelle viel Zeit gekostet hätte.

Parallel zur Sensibilisierung der Haustechnikplaner wurde ein Ausführungsleitfaden mit projektspezifischen Brandschutzdetails und Sonderlösungen erarbeitet. Dieser Leitfaden diente später als Grundlage für diverse Ausschreibungen sowie als nützliches Nachschlagewerk auf der Baustelle.

Als weitere mängelpräventive Maßnahme wurden vor Baubeginn die Bauleiter, Fachbauleiter und Unternehmer ausgewählter Gewerke hinsichtlich der projektspezifischen Belange des Brandschutzes geschult.

Baustellen QS

Die stichprobenartige Kontrolle der fachgerechten Ausführung der baulichen Brandschutzmaßnahmen erfolgte wie in [18] beschrieben in regelmäßigen Abständen sowie bei besonderem Bedarf unter Einsatz der speziell für Brandschutzbegehungen entwickelten Softwarelösung THEMIS – installiert auf einem Tablet-PC. Die Brandschutzpläne zum Neubau Messe Basel wurden in THEMIS digital hinterlegt und die einzelnen Beobachtungen (Mängel) darin festgehalten. Die Fotos der Digitalkamera wurden dabei nach der Aufnahme drahtlos und automatisch zu einer Beobachtung hinzugefügt. Nach Abschluss der Begehung konnte automatisch ein Protokoll generiert werden und nach kurzer Nachbearbeitungszeit in Form einer Excel Tabelle mit allen erfassten Daten (Beschreibungen, Termine, Fotos, etc.) sowie PDF-Plänen inkl. der eingetragenen Beobachtungen ausgegeben werden.

Dank der mängelpräventiven Maßnahmen (s. o.) wurde aus brandschutztechnischer Sicht eine erstaunlich gute Ausführungsqualität ohne schwerwiegende Mängel erreicht. Somit war der Aufwand für das Baustellen-QS im Verhältnis zur Projektgröße eher gering.

Nach Fertigstellung mussten die Unternehmer brandschutzrelevanter Gewerke die zulassungskonforme Umsetzung im Rahmen einer Unternehmererklärung schriftlich bestätigen.

Integration Mieterausbauten

Im Zuge der 3. Bauetappe mussten auch die Mieterausbauten der Drittnutzungen in die übergeordnete Brandschutzplanung integriert werden. Dem entsprechend wurden auch die vereinfachten Baubegehren, die Ausführungsplanung, Realisierung und Inbetriebnahme der Mieterausbauten brandschutztechnisch begleitet.

Dabei wurden auch gebäudetechnische Anlagen innerhalb der jeweiligen Mietflächen erfasst und sofern nötig in die übergeordnete Brandfallsteuerungsmatrix aufgenommen.

INBETRIEBNAHME – EINE INTEGRALE AUFGABE

Auf Grund der anstehenden Aufbauarbeiten für die Uhren- und Schmuckmesse "BASELWORLD“ war der Übergabetermin des Neubaus Mitte Februar 2013 für alle beteiligten Fachfirmen und insbesondere für die beauftragte Totalunternehmerin (DE: Generalübernehmer) ein unverrückbarer Meilenstein. Eine der größten Herausforderungen bestand darin, pünktlich zu diesem Termin die behördliche Bezugsfreigabe zu erlangen.

In diesem Zusammenhang war neben der baulichen Fertigstellung eine Reihe behördlicher Abnahmen notwendig, welche im Vorfeld dieses Termins ablaufen mussten.

Eine der wichtigsten dieser Abnahmen stellten die in der VKF-Brandschutzerläuterung "Gewährleistung der Betriebsbereitschaft von Brandfallsteuerungen (BFS)" [4] geforderten integralen Tests der Brandfallsteuerungen dar. Ziel dieser Tests ist es, das richtige Zusammenspiel der einzelnen automatisch angesteuerten Brandschutzanlagen zu testen und somit die korrekte Umsetzung der Brandfallsteuerungsmatrix zu überprüfen.

Die Termine, Verantwortlichkeiten, Abläufe sowie weitere Rahmenbedingungen für diese Tests wurden frühzeitig im Basis-Drehbuch für Integrale Tests Brandfallsteuerungen festgehalten und mit allen beteiligten Fachfirmen abgestimmt.

Auf Grund der Erfahrungen in vergangenen Projekten wurden hier seitens Gruner von Anfang an dreistufige Vor-, Haupt- und Nachtests eingeplant, welche jeweils durch einen definierten Zeitraum zur Mängelbehebung voneinander getrennt sein sollten.

Die integralen Vortests Brandfallsteuerungen sollten hierbei als Generalprobe für die Haupttests dienen, welche in Anwesenheit der Brandschutzbehörde durchgeführt werden. Sofern im Rahmen dieser Haupttests noch Mängel festgestellt werden, die einer Bezugsfreigabe im Wege stehen, wären diese im Rahmen der Nachtests erfolgreich nachzutesten.

Als Voraussetzung für die Durchführung von integralen Tests Brandfallsteuerungen müssen der Baukörper fertiggestellt und die einzelnen ansteuernden und angesteuerten Anlagen und Objekte vollständig in Betrieb genommen sein. Des Weiteren ist im Rahmen von Linientests die Kommunikation zwischen Brandmeldeanlage und angesteuerten Objekten zu überprüfen und zu bestätigen.

Mit Hinblick auf den oben beschriebenen engen Terminplan, wurden die Bedürfnisse und Anforderungen an die integralen Tests Brandfallsteuerungen bereits frühzeitig ins Projekt eingebracht. Des Weiteren wurde kurz vor Beginn der Integralen Tests Brandfallsteuerungen ein Workshop durchgeführt, um allen Beteiligten sowohl die wichtigsten Abläufe als auch Aspekte der Baustellensicherheit zu vermitteln.

Auf Grund der laufend erforderlichen Fortschreibung der Brandfallsteuerungsmatrix war die detaillierte Vorbereitung einzelner Testtage erst unmittelbar vor dem jeweiligen Test möglich. Das Testprogramm mit Kontrolllisten konnte hierbei mit Hilfe einer selbstentwickelten Softwarelösung innerhalb kürzester Zeit generiert werden. Zeitgleich wurden Pläne der brandfallgesteuerten Objekte erarbeitet, um den späteren Testpersonen einen Überblick über die knapp 1000 brandfallgesteuerten Objekte zu geben.

Durch eine intensive fachtechnische Begleitung mit einem Team bestehend aus einem Testleiter und 10 weiteren Testpersonen konnte in enger Zusammenarbeit mit der Totalunternehmerin, den Fachplanern sowie den Fachunternehmern die Testbereitschaft der Anlagen innerhalb weniger Tage von 20-25 % auf 90-95 % erhöht werden. Spezielle Checklisten erlaubten hierbei ein effizientes Mängelmanagement.

Parallel zu den Tests wurde in regelmäßigen Abständen Rückmeldungen an die zuständige Brandschutzbehörde sowie die Bauherrschaft gegeben, um auf eventuelle Einsprüche bzw. Forderungen zeitnah gezielt reagieren zu können.

Im Zuge der Integralen Tests war gemäß behördlicher Vorgabe ebenfalls die Wirksamkeit der installierten und im Vorfeld mittels rechnerischer Brandsimulation dimensionierten Entrauchungsanlagen sowie das Konzept zur Rauchfreihaltung der Treppenhäuser mittels Warmrauchversuchen zu bestätigen.

Die Versuche wurden mit der kalibrierten Rauchversuchseinrichtung durchgeführt (Bild 17). Mit dieser auf Grundlage von [19] und [20] ausgelegten und konstruierten sowie beim IBMB der TU Braunschweig vermessenen Versuchseinrichtung [21] können Brandszenarien unterschiedlicher Größe skaliert dargestellt werden. Zur Erzeugung der thermisch induzierten, nach oben gerichteten Rauchgassäule wird die Rauchgasquelle mit Hilfe einer künstlichen Brandquelle erhitzt. Hierbei ermöglichen drei übereinander angeordnete Gasbrennerringe als Wärmequelle eine stufenweise und gleichmäßige Wärmefreisetzungsrate die auf das jeweilige, zu simulierende Brandszenario eingestellt werden kann.

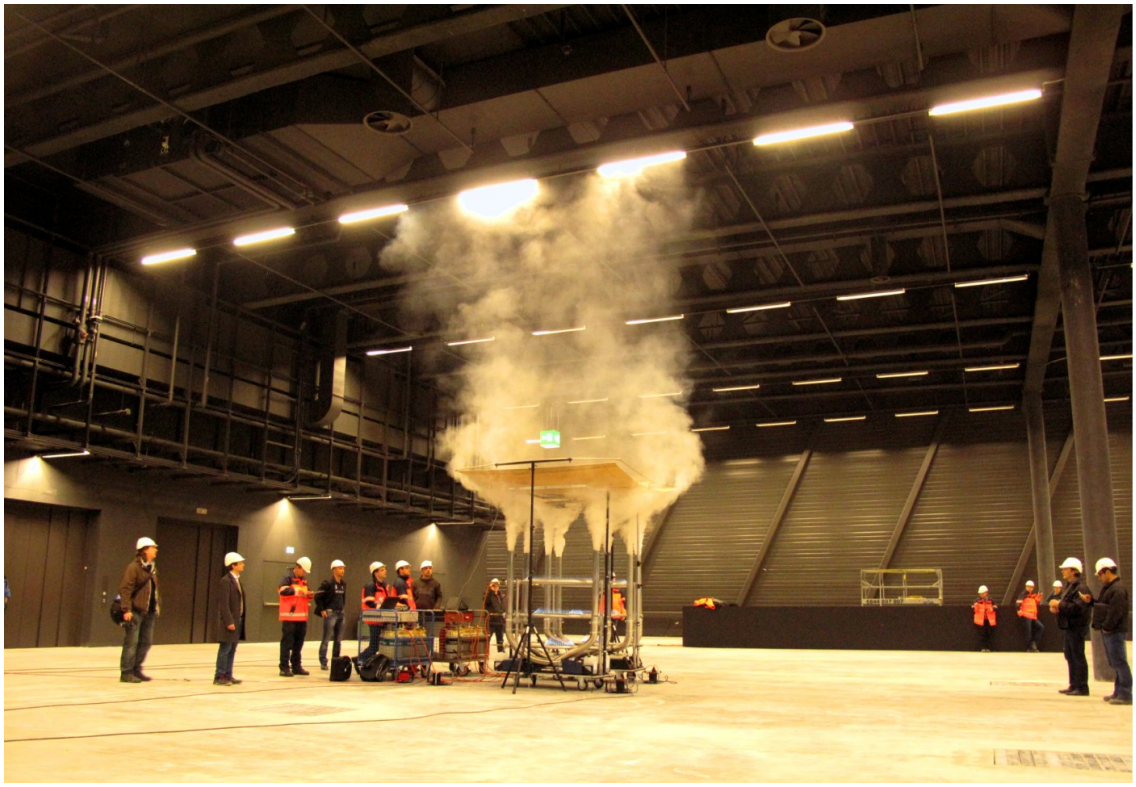


Bild 17 Warmrauchversuch in einem Hallenobergeschoss

Mit Hilfe von Ähnlichkeitsgesetzen ist eine Übertragbarkeit auf reale Brandszenarien möglich. Für die Nachbildung des simulierten Brandes eines gedeckten Messestandes, bzw. um den Effekt der erhöhten Rauchgasdurchmischung im Bereich der umströmten Deckenkante nachbilden zu können, wurde über der Versuchseinrichtung ein Baldachin aufgeständert.

Im Ergebnis der durchgeführten Versuche konnten die Wirksamkeit der Entrachungsanlagen sowie das Konzept zur Rauchfreihaltung der Treppennräume bestätigt werden.

Auf Basis der Bauüberwachung, umfangreichen integralen Tests und Warmrauchversuchen konnte schließlich im Rahmen einer Konformitätserklärung die fachgerechte Umsetzung des gesamten Brandschutzkonzeptes - ohne wesentliche Mängel - bestätigt werden. Hierauf gestützt wurde seitens der Behörden die provisorische Bezugsfreigabe pünktlich an die MCH Messe Schweiz AG erteilt, sodass auch die neuen Standbauten für die Uhren- und Schmuckmesse "BASELWORLD" 2013 termingerecht fertiggestellt werden konnten.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Messestandort Basel wurde um einen neuen, vom Basler Architekturbüro Herzog & de Meuron entworfenen Hallenkomplex erweitert.

Das Brandschutzkonzept zum "Neubau Messe Basel" gliedert sich in bauliche, technische, organisatorische und abwehrende Maßnahmen. Eine Besonderheit stellen dabei die nutzungsbedingt zu berücksichtigenden Standbauten sowie die zahlreich zum Tragen gekommen Sonderlösungen und zur Anwendung gelangten Ingenieurmethoden des Brandschutzes dar.

Die Umsetzung der Brandschutzmaßnahmen sowie die Inbetriebnahme mussten durch eine behördlich geforderte Qualitätssicherungsperson Brandschutz begleitet werden. In der Ausführungsphase wurden neben den mängelpräventiven Maßnahmen wie Bauleiterschulungen stichprobenartige Kontrollen vor Ort durchgeführt. Zur Inbetriebnahme wurde mit der Planung und Begleitung der integralen Brandfallsteuerungstests sowie den Warmrauchversuchen ein wertvoller Beitrag geleistet, um die Projektziele betreffend Brandschutz zu erreichen.

Schließlich konnte gegenüber der zuständigen Brandschutzbehörde die fachgerechte Umsetzung des Brandschutzkonzepts im Rahmen einer Konformitätserklärung bestätigt werden und der "Neubau Messe Basel" pünktlich in Betrieb genommen werden.

FAZIT – TEAMARBEIT UND UMFASSENDE BEGLEITUNG ALS ERFOLGSFAKTOR

Mit dem Projekt "Neubau Messe Basel" wurde einmal mehr die Erfahrung aus vergleichbaren Projekten bestätigt, dass der Aufwand und Anspruch an die Umsetzung eines hochkomplexen Brandschutzkonzeptes im Zuge der Ausführung in Richtung Inbetriebnahme exponentiell steigt.

Ein dynamisch, laufend dem Projektanspruch angepasstes Brandschutzteam hat es hierbei ermöglicht, auch in intensiven Zeiten die Übersicht über die komplexe Brandschutzplanung zu behalten und mitzuhelfen, die richtigen Prioritäten zu setzen.

Der Vorteil, dass die kurzen Bauetappen keine rollende Planung duldeten, sondern wirklich erst geplant und ausgeschrieben ehe gebaut wurde, konnte zu Gunsten einer hohen Ausführungsqualität der brandschutztechnischen Maßnahmen genutzt werden. Dabei war es entscheidend, dass alle Beteiligten Fachplaner, Bauleiter und Unternehmer Ihre Verantwortung für den Brandschutz ernst genommen und die durchgeführten Maßnahmen zur Mängelprävention als Hilfestellung wahrgenommen haben.

Ein weiterer Erfolgsfaktor bestand darin, dass im vorliegenden Fall eine umfassende Begleitung des richtigen integralen Zusammenspiels der brandschutzrelevanten Maßnahmen durch ein Team von Brandschutzingenieuren stattfinden durfte.

LITERATUR

[1] Schnetgöke, R.: Sicherheit für einen neuen Zürcher Stadtteil - Brandschutz bei Hochhausprojekten. In: Braunschweiger Brandschutz-tage `11: 25. Fachtagung Brandschutz - Forschung und Praxis. 27.9. und 28.9.2011 in Braunschweig; Kurzreferate. Braunschweig iBMB, 2005, Heft 214.

[2] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner A (rot) daraus: Brandschutznorm, Bern, 01.01.2005.

[3] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner A (rot) daraus: Brandschutzrichtlinien, Bern, 01.01.2005.

[4] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner B (blau) daraus: Brandschutzarbeitserläuterungen, Bern, 01.01.2005.

[5] Verordnung über den Brandschutz, Basel-Stadt, 2004.

[6] Wegleitungen zu den Verordnungen 3 und 4 zum Arbeitsgesetz, SECO – Direktion für Arbeit, Bern 1995.

[7] SES Richtlinie Brandmeldeanlagen - Planung, Einbau und Betrieb, Verband Schweizerischer Errichter von Sicherheitsanlagen (SES) Ausgabe 01.06.2011, Bern.

[8] SES Richtlinie Sprinkleranlagen - Planung, Einbau und Betrieb, Verband Schweizerischer Errichter von Sicherheitsanlagen (SES) Ausgabe 29.10.2012, Bern.

[9] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten, (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV) Fassung Juni 2005 (zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Februar 2010).

[10] "Elektroakustische Notfallwarnsysteme“ SN EN 60849:1998 (D), Herausgeber: Electrosuisse SEV Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik, Fehraltorf.

[11] BASELWORLD - MCH Messe Schweiz (Basel), Schweiz, Standbau- und Gestaltungsrichtlinien, 2013.

[12] Schneider, V., Könnecke, R.: Referenzbuch Aseri 4.8. Frankfurt/Main: IST GmbH, 2007.

[13] RIMEA, Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version 2.0.2, 22, Juni 2007.

[14] McGrattan, K. et al.: Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, NIST, Washington, USA 2010.

[15] http://www.cd-adapco.com/products/star-ccm-plus.

[16] Kasburg, J., Bucher, K., Eng, R., Mülli, L.: SSI-Spezial, Sonderausgabe zum Thema "Brandsimulationen im Hochbau" 1/09, CFD-Brandsimulatio-

nen im Hochbau, Aktuelle Auslegeordnung, Simulationsgrundlagen, Best Practice, SSI, Schweizerische Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater, Küsnacht, Januar 2009.

[17] Wohlrab, T.: Notwendigkeit, Umfang, Inhalt und Bedeutung einer Konformitätserklärung Brandschutz in SSI (Schweizerische Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater) Fachtagung Brandschutz: Qualitätssicherung bei Neu- und Umbauten. Zürich 2011.

[18] Schnetgöke, R.: Meilensteine der Brandschutz-QS und ihre Bedeutung für die Baustelle. In SSI (Schweizerische Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater) Fachtagung Brandschutz: Qualitätssicherung bei Neu- und Umbauten. Zürich 2011.

[19] VFDB – IG BS-Ing „Interessengemeinschaft Brandschutzingenieure“, Grundsätze für Rauchversuche in Gebäuden, 26.09.2000.

[20] VDI- Richtlinienausschuss 6019 Blatt 1 und 2, Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden, Düsseldorf, Mai 2006 und Juli 2009.

[21] IBMB TU Braunschweig, Untersuchungsbericht Nr. 6348/6003 - Vermessung einer Brandsimulationseinheit, Braunschweig, 30.07.2007 (unveröffentlicht).

BRANDSCHUTZ IM PALAISQUARTIER FRANKFURT/MAIN: REPRÄSENTATIV UND ZUKUNFTSWEISEND

Karsten Foth
hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Niederlassung Hamburg, Hamburg

EINLEITUNG

Mit dem PalaisQuartier wurde in Frankfurt am Main eines der größten deutschen Innenstadt-Projekte realisiert und in diesem Jahr zum Abschluss gebracht.

Das Stadtquartier in der Frankfurter City (Bild 1) bietet Möglichkeiten zum Arbeiten, Einkaufen, Entspannen und Wohnen. Mehr als 50 Jahre nutzte die Post das Gelände zwischen der Einkaufsstraße Zeil und der Großen Eschenheimer Straße als Bürostandort. Nun wurden auf dem rund 1,7 Hektar großen Areal vier neue Gebäude realisiert: ein Büroturm, ein Hotel, ein Shoppingcenter sowie das – nach historischem Vorbild rekonstruierte – Thurn und Taxis Palais. Zu dem Komplex, der insgesamt rund 230.000 Quadratmeter Bruttogeschossfläche umfasst, gehört auch eine – im wahrsten Sinne des Wortes – Tiefgarage mit 1.390 Stellplätzen, wobei das unterste Geschoss sich ca. 21.10 m unter der Geländeoberfläche befindet. Die Anlieferung für den Gesamtkomplex wird im 1. Untergeschoss realisiert.

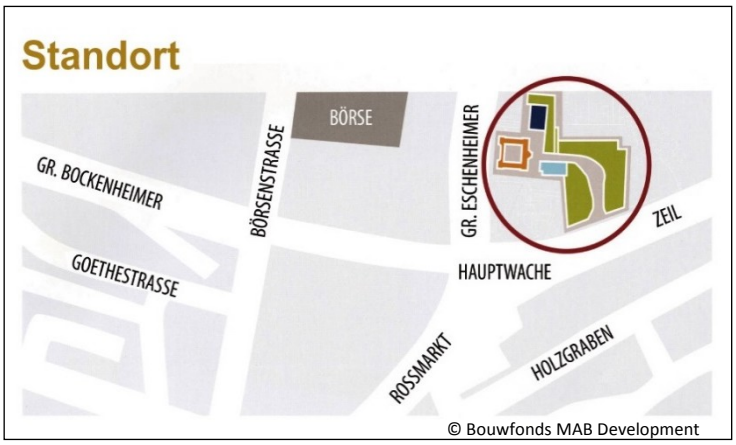


Bild 1 Das PalaisQuartier entsteht direkt an der Zeil – Frankfurts beliebter Shoppingmeile.

Das PalaisQuartier ist ein Joint Venture von Bouwfonds Property Development B.V. und Meyer Bergman Ltd.. Realisiert wurde der Komplex von der PalaisQuartier GmbH & Co. KG – einer Projektgesellschaft der Bouwfonds MAB Development GmbH (BMD). Der Fokus der BMD liegt in der Planung und Realisierung großflächiger und multifunktionaler Objekte im innerstädtischen Bereich in Deutschland, Österreich und der Schweiz.

Das architektonische Gesamtkonzept des PalaisQuartiers stammt vom renommierten Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann aus Frankfurt; der Entwurf für das Shopping- und Erlebniszentrum von MfuksasArch aus Rom.

Der Gesamtkomplex mit seinen fünf Bauteilen wurde gemeinsam parallel geplant und genehmigt und wurde in der Mitte 2004 gestarteten Bauphase aufeinander ebenfalls parallel mit einem Gesamtbudget von rund 960 Millionen Euro realisiert.

Das Shopping- und Erlebniszentrum BT D wurde gemeinsam mit der Tiefgarage (BT T) im Frühjahr 2009 eröffnet, die Büro- (BT B) und Hoteltürme (BT C) wurden Ende 2009 und 2010 in Betrieb genommen. Das nach historischem Vorbild rekonstruierte – Thurn und Taxis Palais (BT A) wurde 2011 einer Nutzung zugeführt.

ANGABEN ZU DEN GEBÄUDEN

Shopping-Center „MyZeil“ (BT D)

Das Schopping-Center „MyZeil“ ist eine moderne Einkaufs- und Erlebniswelt. Auf rund 77.000 Quadratmetern und acht Stockwerken werden Geschäfte, Freizeit- und Gastronomieeinrichtungen unter einem besonderen Dach vereint. Das Bauteil besteht oberirdisch aus einem viergeschossigen Hauptkörper über dem drei Bauteile als freistehende Volumen angeordnet sind, die von einem organisch geformten Glasdach gefasst werden (Bild 2).

Neben der markanten Dachlandschaft beherbergt das „MyZeil“ die längste freitagende Rolltreppe Europas: Die „Expressrolltreppe“ fährt mit einer Gesamtlänge von 46 m ohne Zwischenhalt direkt vom Erdgeschoss in das vierte Obergeschoss, dem obersten Mallgeschoss.

Bild 2 *Die gläserne Fassade des Shopping-Centers unterstreicht die Transparenz des architektonischen Entwurfs*

Die Ladenstraße, die sich über alle acht Ebenen erstreckt, wird durch einen Dachtrichter durchzogen. Dieser setzt mit dem „Loch“ in der Zeilfassade das Herzstück des sich aus 3.200 dreieckigen Glasplatten (unterschiedlicher Größe) bestehenden Gewölbes des Shoppingcenters.

Im Februar 2008 wurde der Rohbau des Shopping-Centers fertig gestellt und mit dem Innenausbau begonnen. Zu diesem Zeitpunkt war bereits der größte Teil der insgesamt ca. 90 Läden vermietet. Eröffnung war Ende Februar 2009.

Turm am Thurn-und-Taxis-Platz (BT B)

Der Turm am Thurn-und-Taxis-Platz ist als Bürogebäude konzipiert. Das Hochhaus mit 34 Geschossen und 135 Metern Höhe wird sich ab 2009 harmonisch in die Skyline der Frankfurter Wolkenkratzer einfügen.

Bild 3 *Ansicht des Thurn und Taxis Palais mit dem Bürohochhaus (BT B) und dem Hotelhochaus (BT C) im Hintergrund*

Das Bürohochhaus besteht aus einem in vier vertikale, unterschiedlich hohe Segmente gegliederten 32-geschossigen Turm zzgl. Dachtechnikzentrale sowie einem viergeschossigen, breit gelagerten Sockel (Bild 3).

Der architektonische Entwurf stammt vom Frankfurter Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann. Das skulpturale Gebäude soll ein markantes Zeichen in der Frankfurter Skyline setzen – als zusätzliches Highlight sind begehbare Dachgärten in 90 Metern Höhe vorgesehen. In der vierten Etage wird die Verbindung zum Shopping-Center geschlossen – hier wird es einen direkten Zugang zum Gastronomiebereich geben.

Die Arbeiten an dem Rohbau haben im August 2007 begonnen. Die Eröffnung des Büroturms wurde 2010 vollzogen.

Hotel am Thurn-und-Taxis-Platz (BT C)

Neben dem Büroturm wird ein kleineres Hochhaus – mit 22 Geschossen und 96 Metern Höhe – entstehen. Das Gebäude ist als Vier-bis-Fünf-Sterne-Hotel geplant. Der architektonische Entwurf stammt vom Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann und ist an die skulpturale Form des benachbarten Büroturms angelehnt. Die konsequent glatte Glasfassade bildet einen interessanten architektonischen Kontrast zum historischen Charakter des Thurn und Taxis Palais.

Mit dem Hochbau des Hotels wurde Ende Januar 2008 begonnen, die Eröffnung erfolgte Ende 2010.

Thurn und Taxis Palais (BT A)

Das Thurn und Taxis Palais wurde nach historischem Vorbild wieder aufgebaut. Dieses Herzstück des PalaisQuartiers plante das Architekturbüro KSP Engel und Zimmermann. Ursprünglich zwischen 1731 und 1741 errichtet, wurde das barocke Stadtschloss im Zweiten Weltkrieg größtenteils zerstört. Nun soll die Originalfassade in das neue Gebäude integriert werden. Als Grundlage für die detailgetreue Nachbildung dienen die originalen Baupläne des französischen Hofarchitekten Robert de Cotte sowie historische Fotografien.

Das Thurn und Taxis Palais besteht aus einem denkmalgeschützten Portal und den beiden zweigeschossigen Pavillons an der Großen Eschenheimer Straße, dem zweigeschossigen Hauptbau mit Kuppelsaal im Osten sowie den zweigeschossigen Verbindungsbauten.

Im Inneren sind ein Multifunktionssaal für 1.000 Personen im UG sowie Flächen für Einzelhandel, Gastronomie und Büros vorgesehen.

Tiefgarage (BT T)

Die fünf Untergeschosse des sogenannten Loses T – Tiefgarage – verbinden den Gesamtkomplex mit dem Anlieferhof im 1. Untergeschoss sowie den vier darunter liegenden Parkgeschossen.

PLANUNGSGRUNDSÄTZE

Die vier Bauteile des PalaisQuartiers sind sowohl in ihrer baurechtlichen Einstufung als auch in ihrer Art und Nutzung völlig unterschiedlich. Demzufolge unterscheiden sich auch die Anforderungen an den Brandschutz stark voneinander. Das Hotel, der Büroturm und das Einkaufs- und Freizeitzentrum sind direkt miteinander verbunden – die Tiefgarage unter dem Gebäudeensemble erstreckt sich über alle vier Bauteile. Für ein ganzheitliches Sicherheitskonzept für das multifunktionale Gebäudeensemble galt es nun, jedes Bauteil separat zu betrachten, ein individuelles Brandschutzkonzept zu erstellen und die Einzelkonzepte durch ein umfassendes Gesamtkonzept zu verbinden.

Die Rettung der Personen wurde grundsätzlich innerhalb der Realteile eigenständig und ohne Interaktion sichergestellt. In Einzelfällen war es dennoch notwendig und sinnvoll die Rettung über ein benachbartes Bauteil zu realisieren. Dies erfolgte dann unter Einhaltung der maximalen Rettungsweglängen und unter Beachtung der verschiedenen Nutzungen.

Für die vertikale Rettung besteht im Bereich der Hochhäuser (BT B, C, D) das Grundprinzip, dass alle Treppenanlagen, die von unten nach oben führen (Treppen des Bauteils T) und die Treppenanlagen, die von oben nach unten führen (Treppen der Bauteile B, C und D), jeweils durch eigene baulich getrennte Ausgänge über Fluchttunnel, die im EG oder ZWG liegen, ins Freie führen (Bild 4). Für das Bauteil D gilt im 1. UG die Besonderheit, dass dieses wegen der gleichen Nutzung über die oberirdischen Treppenräume mit erschlossen wird.

Das Zwischengeschoss unter dem Bauteil D dient als Entfluchtungsgeschoss für die Verkaufsbereiche aber auch für die Garage, wobei die Fluchtwege der Verkaufsbereiche (1. UG, EG und Obergeschosse) baulich getrennt von denen der Garage (2. UG bis 5. UG) geführt werden.

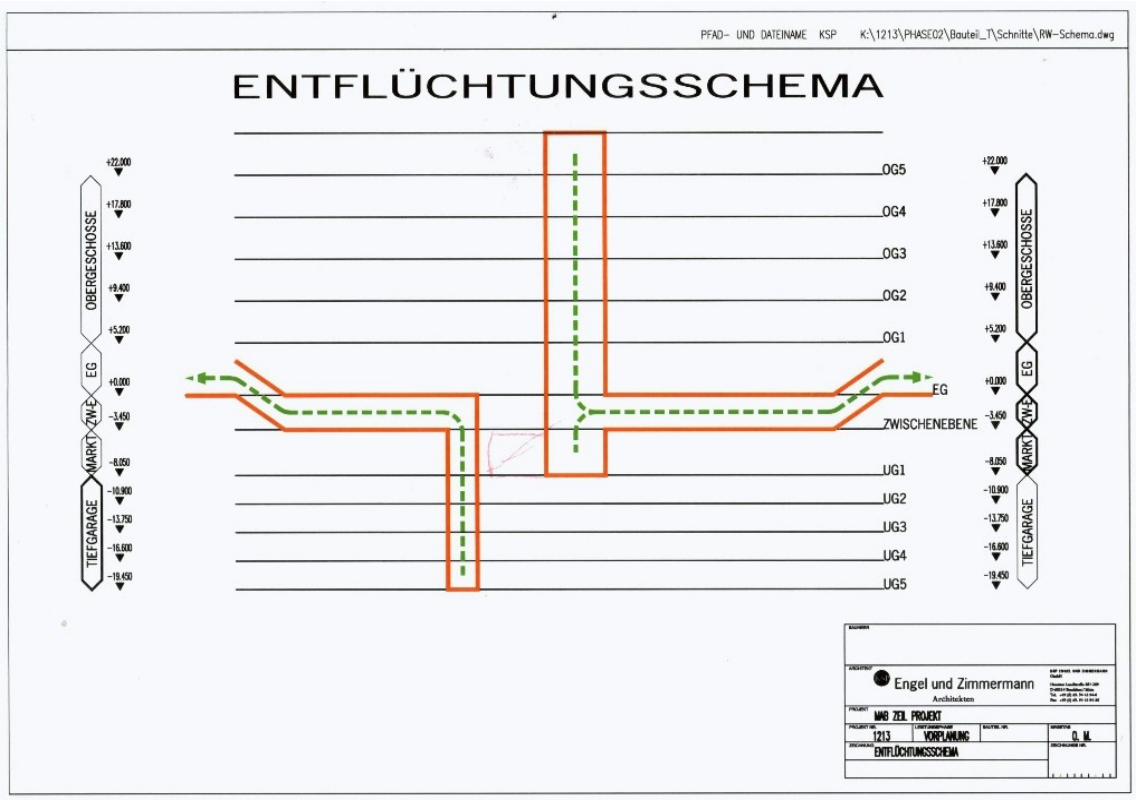


Bild 4 Trennung der Entfluchtungsströme im Zwischengeschoss

Des Weiteren ist für die Erstellung der Rettungskonzepte der einzelnen Bauteile nicht von der Gleichzeitigkeit mehrerer Ereignisse in den unterschiedlichen Realteilen und Nachbargebäuden auszugehen. Die Planungen basieren auf der

Annahme, dass für den Gesamtkomplex und für die anliegenden Nachbargebäude maximal ein Brandszenario in einem der o. g. Bauteile auftritt.

Die größte Herausforderung bei der Planung der Brandschutzmaßnahmen stellte das Shopping-Center mit seiner ungewöhnlichen Architektur dar. Unkonventionell mussten auch die Lösungsansätze sein. Durch die Anwendung von Ingenieurmethoden – speziell von Evakuierungs- und Rauchgassimulationen gelang es, ein maßgeschneidertes Brandschutzkonzept für das Einkaufs- und Erlebniszentrum zu entwickeln.

Brandschutzmaßnahmen für das Shopping-Center

Brandschutztechnische Herausforderungen verbindet das Einkaufs- und Freizeitzentrum in vielerlei Hinsicht: Mit einer Höhe von 39,35 Metern (Oberkante des Fußbodens im höchstgelegenen Aufenthaltsraum) fällt das Gebäude in den Bereich der Hochhäuser. Hinzu kommt, dass verschiedene Nutzungsarten (nämlich Verkaufs- und Versammlungsstätte) unter einem Dach vereint werden.

In den Abstimmungen mit der Bauaufsicht und der Feuerwehr wurden für das gesamte Bauteil D folgenden Bewertungsgrundsätze vereinbart:

- Das Bauteil D ist bezüglich der tragenden Bauteile und der Erschließung bis zu den Nutzungen (bis zum Eintritt in die jeweilige Geschossnutzung) nach der HHR [2] zu bewerten. In den Nutzungen selbst sind die entsprechenden Verordnungen MVkVO [4] und MVStättV [5] anzuwenden.
- Hinsichtlich der Rettungsweglängen und –breiten sind die MVkVO [4] bzw. die MVStättV [5] maßgebend. Diesbezüglich können die Angaben der HHR [2] als untergeordnet angesehen werden.
- Die Stichflurregelung der HHR [2] muss im Bauteil D nicht angewendet werden.

Für die Planung der Brandschutzmaßnahmen hieß das: Standardisierte Regelwerke können nicht durchgehend und nur mit zahlreichen Schnittstellen zu Grunde gelegt werden. Daher galt es, ein schutzzielorientiertes Brandschutzkonzept zu entwickeln, das speziell auf die individuellen Erfordernisse des Shopping-Centers zugeschnitten ist.

In diesem Zusammenhang wurden vom Planungsteam zahlreiche Simulationen durchgeführt und ein großes Spektrum der Ingenieurmethoden angewendet. Die Entwicklung unterschiedlicher Brandherde und der damit verbundenen Rauchentwicklung wurde ebenso berechnet (vom Büro AFC Air Flow Consulting AG aus Zürich) wie das Verhalten des Dachtragwerks unter Brandbeanspruchung bzw. Hitzeeinwirkung. Außerdem spielte man diverse Szenarien für eine mögliche Evakuierung und die Bewegung der Personenströme auf der Expressrolltreppe durch (Büro IST aus Frankfurt).

Besonderheiten des Evakuierungskonzeptes

Aufgrund der Grundstückstiefe von ca. 120 m und den Anschlüssen an öffentliches Straßenland waren bzgl. der Entfluchtung des Gesamtkomplexes von Beginn an große Herausforderungen gegeben, so dass in einer frühen Planungsphase klar wurde, dass zum Nachweis einer funktionierenden Rettung eine Evakuierungsstudie erforderlich würde.

Eine derartige Evakuierungsstudie als Nachweis der Selbstrettung ist bei Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Rettungswegbreiten und –längen nicht erforderlich, da mit diesen gesetzlichen Vorgaben – in Verbindung mit der Landesbauordnung bzw. der jeweils anzuwendenden Sonderbauvorschrift – das tolerierte Restrisiko des Gesetzgebers beschrieben wird.

Dem Konzept der Landesbauordnung mit den entsprechenden Sonderbauvorschriften liegt die Annahme zu Grunde, dass eine Personenrettung nur durch die beschriebenen baulichen Maßnahmen (Anforderungen an die Rettungswege) sichergestellt werden kann. So wird beispielsweise in der MVkVO [4] kein Nachweis für die Einhaltung einer maximalen Evakuierungszeit aus der Mall gefordert, da auch ein Ausfall der Mall und damit eines Rettungsweges vom Gesetzgeber – wie bei Treppenräumen auch – akzeptiert wird, bzw. die – nichtbenannte – maximale Zeit bei Einhaltung der RW-Länge auf der Mall (35 m) automatisch eingehalten werden.

Im vorliegenden Bauvorhaben sind innenliegende Treppenräume in der Mall vorhanden, die ihren Ausgang anstatt ins Freie in die Mall haben. Da dies nicht den gesetzlichen Anforderungen entspricht, ist für diese Treppenräume nachzuweisen, dass trotz der Ausführung die öffentliche Sicherheit und Ordnung nach § 3 der Landesbauordnung nicht gefährdet ist. Dieser Nachweis wird im vorliegenden Bauvorhaben dadurch geführt, dass ein raucharmes EG über einen unendlichen Zeitraum nachgewiesen wird.

Da im 4. OG im Bauteil D die Rettungsweglängen grundsätzlich eingehalten werden, muss dem Konzept der MVkVO [4] folgend kein Nachweis erbracht werden, dass die Mall (speziell das 4. OG) nicht verraucht, bzw. erst dann verraucht, wenn die Personen sich nicht mehr auf dieser Ebene (speziell in der Mall) befinden. Der durchgeführten Evakuierungsstudie kann jedoch im Zusammenhang mit der durchgeführten CFD-Entrauchungssimulation entnommen werden, dass es zu einem Ausfall der Mall im 4. OG erst nach Abschluss der Selbstrettung kommt (Bild 5).

Beim nord-östlichen Ausgang (Lysonecke) werden Rettungswege einer Gesamtbreite von 9,80 m ins Freie geführt (Tiefgarage $1 \times 1{,}00$ m, Shopping BT D $2 \times 2{,}00$ m aus den nördlichen Verkaufsbereichen und $2 \times 2{,}40$ m aus den östlichen Verkaufsbereichen). In diesem Bereich wären ohne Nachweis und unter Voraussetzung einer gestaffelten Evakuierung (Garage und BT D nicht gleichzeitig) eine Rettungswegbreite bis ins öffentliche Straßenland von 8,80 m zur Verfügung zu stellen. Da dies geometrisch auf Grund der bestehenden Bebau-

ungen nicht möglich war, wurde in diesem Bereich eine Simulation durchgeführt, die aufzeigt, dass die geplanten Wegbreiten im Freien ausreichend sind, bzw. welche Wegbreite mindestens zur Verfügung zu stellen ist.

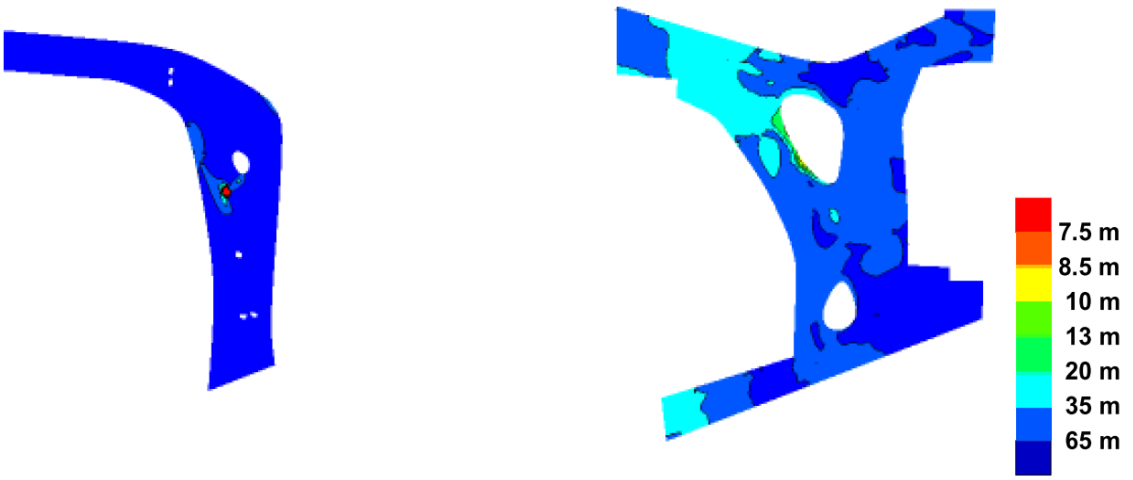


Bild 5 Verrauchung Mall im EG (links) und 4. OG (rechts) nach 5 min

EVAKUIERUNGSSIMULATION FÜR DIE AUSGANGSSITUATION

Für die Belegungszahlen (Anzahl der Personen in den jeweiligen Gebäudeeinheiten zum Zeitpunkt des Alarms) wurden die folgenden konservativen Angaben (Flächen jeweils bezogen auf die Mietfläche) benutzt:

- Büro: 6,0 m²/Person
- Verkauf: 3,5 m²/Person (auch für Pavillonflächen auf Mall)
- Gastronomie: 1,0 m²/Person (keine Gastplatz-Zahlen verfügbar)
- Konferenz: 1,0 m²/Person (wenn kein Bestuhlungsplan)
- Veranstaltung: maximale Personenzahl (1.600 P in der Music Hall)
- Fitness: 3,5 m²/Person

Die Gesamtpersonenzahl im Gebäude ergibt sich aus den jeweiligen Flächen der Nutzungseinheiten, dividiert durch die zugehörige Belegungszahl.

Zur Analyse der Räumungszeiten für die Mall wird auch den Gehflächen der Mall eine Personenbelegung zugeordnet (3,5 m²/Person für den ungünstigen, 7 m²/Person für den realistischen Fall).

In dieser Personenstromanalyse für die sog. Lysonecke wurde für vier Varianten untersucht, ob es während der Phase eines kontinuierlichen Zustroms von Personen aus allen in den Hof mündenden Treppenausgängen zu einer kritischen Personendichte innerhalb des Hofs und dadurch zu einem Rückstau in den Treppen kommen kann.

Die kritische Dichte, welche nicht überschritten werden sollte, liegt bei 4 Personen/m². Bei diesem Wert ist die Fortbewegungsmöglichkeit der Personen stark eingeschränkt und es kann sogar zum vorübergehenden Stillstand der Bewegung kommen.

Um die Durchlassfähigkeit des Ausgangsbereiches „Lysonecke“ zu untersuchen, wurde die zeitliche Entwicklung der Dichte auf dem Lysonhof und den zu diesem hin führenden Treppen untersucht (Bild 6). Dabei wurde konservativ der Fall eines gleichzeitigen maximalen Personenstroms aus allen Treppen für einen Zeitraum von einigen Minuten berechnet. Bild 7 zeigt die resultierenden Verläufe der Personendichte. Im Lysonhof bleibt die Personendichte nahezu konstant bei einem Wert von 0,7 bis 0,8 Personen/m². Es kommt also dort zu einem kontinuierlichen Zu- und Abstrom ohne Staubildung.

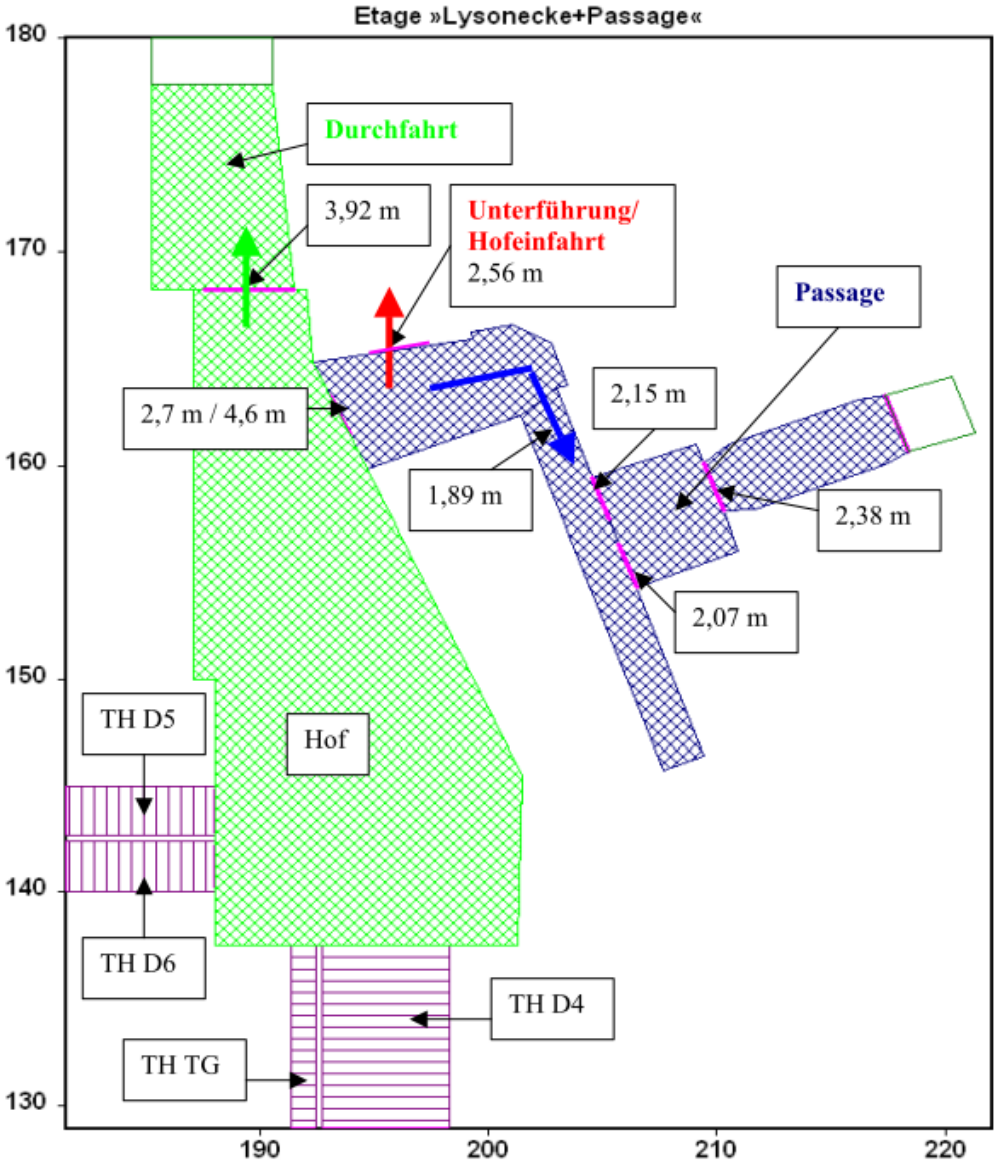


Bild 6 Fluchtwegabmessungen Ausgang Lysonecke

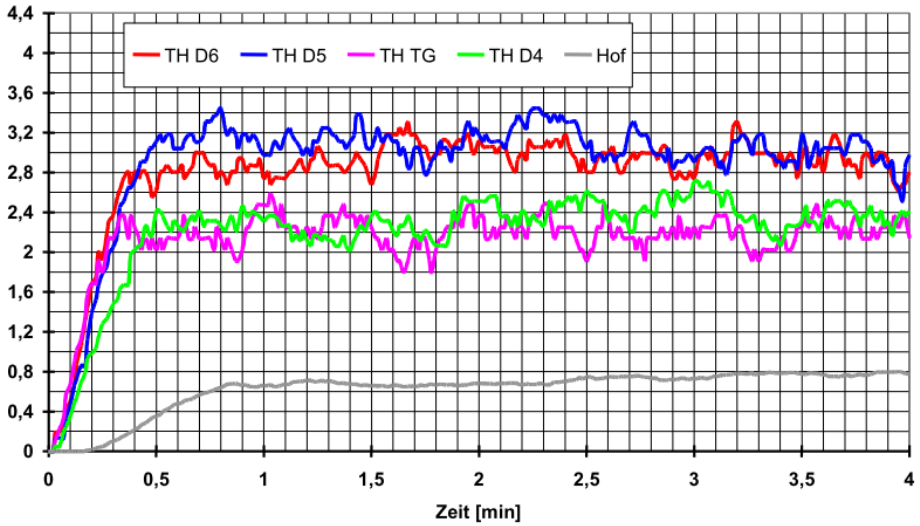


Bild 7 *Zeitlicher Verlauf der Personendichte [Personen/m²] in den Fluchtwegen des Ausgangsbereichs „Lysonecke“*

Für die Räumung der Mallebenen in den Obergeschossen erhält man Räumungszeiten von maximal 6 Minuten. Die Gesamträumungsdauer bis zum Erreichen der jeweiligen Zielbereiche außerhalb des Gebäudes beträgt je nach Ausgangsbereich 19 bis 22 Minuten.

EVAKUIERUNGSSIMULATION FÜR DIE EXPRESSROLLTREPPE

Im PalaisQuatier ist eine sogenannte Expressfahrtreppe realisiert, die ohne Zwischenstopp vom Erdgeschoss bis ins vierte Obergeschoss fährt (Bild 8). Dabei wird freitragend eine Höhe von 21,10 Metern überwunden. Für eine Rolltreppe dieser Art gibt es bisher weltweit kaum Referenz- oder Vergleichsobjekte. Es sollte deshalb – als Ergebnis der Abstimmungen – nachgewiesen werden, dass „Durchschnittspersonen“ die Treppe bei einem Stillstand im Gefahrenfall innerhalb von drei Minuten sicher verlassen können. Beim Ansatz von älteren oder gehbehinderten Personen durften sechs Minuten – mit Verweis auf die Verrauchung im 4. OG nicht überschritten werden. Bei den Szenarien sollte davon ausgegangen werden, dass die Personen, die sich zum Zeitpunkt des Stillstands auf den unteren zwei Dritteln der Treppe befinden, diese auch nach unten verlassen. Die Menschen auf dem oberen Drittel der Treppe würden sich demnach nach oben bewegen.

Die Räumungszeiten berechnete die IST GmbH mit Hilfe von zwei verschiedenen Szenarien mit dem Simulationsprogramm ASERI. Im ersten Fall nahmen die Objektplaner an, dass die Treppe einen Neigungswinkel von 27,3° und eine Lauflänge von 46 Metern besitzt. Im zweiten Szenario maß die Rolltreppe – bei einem Neigungswinkel von 24,5° – 51,9 Meter. In beiden Fällen wurde davon ausgegangen, dass sich – bei der Treppenbreite von einem Meter – maximal zwei Personen auf einer Treppenstufe aufhalten. Dadurch ergeben sich Personenanzahlen von 232 bei der ersten Variante (Bild 9) bzw. 262 im zweiten Fall.

Bild 8 *Expressfahrtreppe: max. Auslastung mit 232 Personen (Neigungswinkel 27,3°, Treppenlänge 46,29 m)*

Durch die unregelmäßige Auslastung der beiden Treppenausgänge (nach oben flieht ein Drittel der Personen, nach unten jedoch zwei Drittel), entsteht automatisch eine erhöhte Räumungszeit – verglichen mit einer gleichmäßigen Auslastung (also wenn 50 % der Anwesenden die Treppe nach oben und 50 % nach unten verlassen würden).

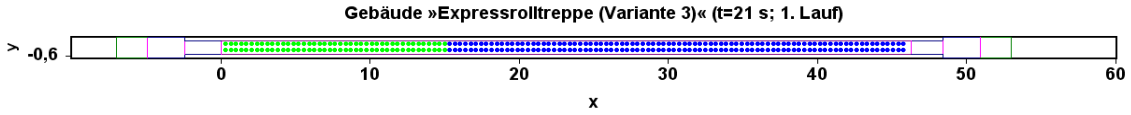


Bild 9 *232 Personen: Maximalbelegung der Expressfahrtreppe mit je zwei Personen pro Stufe*

Der entstehende Stau am Kopf- und Fußende der Treppe wurde bei den Simulationen explizit berücksichtigt. Ebenfalls mussten die Berechnungen die Reaktionszeit vom Übergang der fahrenden zur stillstehenden Treppe bis hin zum Beginn der Räumung miteinbeziehen. Kalkuliert wurde eine Zeit von maximal einer Minute, wobei den Personen zufallsgesteuert eine individuelle Startzeit im Intervall von 45 bis 60 Sekunden zugewiesen wurde. Es galt außerdem, verschiedene physische Eigenschaften der Personen zu berücksichtigen. Dazu wurden drei Personengruppen untersucht: Personengruppe A stellt den Standardfall dar (dazu gehören auch Menschen mit eingeschränkter Mobilität), Gruppe B repräsentiert die Durchschnittspersonen mit uneingeschränkter Mobilität und Personengruppe C umfasst ausschließlich Menschen mit eingeschränkter Mobilität – sprich Ältere oder Personen mit Gepäck. Aus diesen unterschiedlichen Voraussetzungen ergeben sich verständlicherweise unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten, Raumbedürfnisse und Räumungszeiten.

Jedes Szenarium beanspruchte mehrere Simulationsläufe, deren Ergebnisse anschließend statistisch ausgewertet wurden. Das Gesamtergebnis machte deutlich, dass die Entfluchtung bei der ersten Gestaltungsvariante in der kürzesten Zeit möglich ist. Mach 139 bzw. 199 Sekunden (schnellste bzw. langsamste Personengruppe) ist die Expressrolltreppe komplett geräumt (Bild 10).

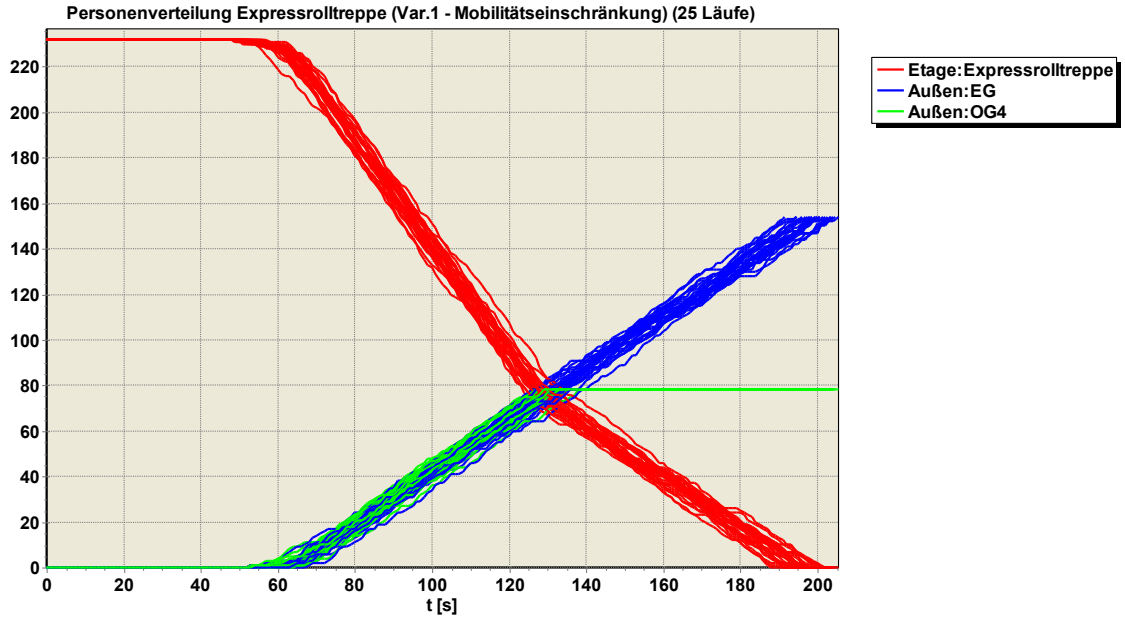


Bild 10 *Auswertung der ASERI Rechnung für die Rolltreppe, die nach 199 sec vollständig geräumt ist.*

Die Unterschiede bei den Entfluchtungszeiten ergeben sich hauptsächlich aus den verschiedenen Personenzahlen auf der Treppe. Außerdem werden durch die Präsenz mobilitätseingeschränkter Personen agilere Menschen behindert. Dadurch erklärt sich, dass die Ergebnisse der gemischten Personengruppe A nah an den Evakuierungszeiten der langsamsten Gruppe C liegen.

In Abstimmung mit der Bauaufsicht wurde schließlich die Expressrolltreppe mit dem steileren Neigungswinkel und der kürzeren Lauflänge umgesetzt (Bild 11).

Bild 11 Montage der Expressfahrtreppe im Nov. 2007

CFD-RAUCHGASSIMULATION - AUFGABENSTELLUNG

Mit der durchgeführten cfd-Rauchgassimulation musste gezeigt werden, dass:

a) die Ausbildung eines fast 12.000 m² großen Rauchabschnittes in den Garagengeschossen nicht zu einer Verschlechterung gegenüber der gesetzlichen Anforderung (maximale Rauchabschnittsgröße von 5.000 m²) kommt.

   Da sich auch mit den gesetzlich geforderten Maßnahmen zur Rauchableitung in einem derartigen Rauchabschnitt (16 m³/(h×m²)) keine raucharme Schicht von 2,50 m auf Dauer einstellt und es somit zu einem Ausfall der gesamten Fläche kommt, muss mit der Simulation lediglich gezeigt werden, dass nicht mehr als 5.000 m² verrauchen und somit die Situation nicht schlechter als die bauordnungsrechtlich akzeptierte ist.

   Ein Nachweis, dass eine Flucht in Bezug auf die Verrauchung möglich ist, muss ebenfalls wie beim Einsatz einer konventionellen Entrauchungsanlagen nicht erbracht werden, da die maximal zulässigen Rettungsweglängen grundsätzlich eingehalten werden. Etwaige Bedenken, wegen der geringfügigen Überschreitungen der Rettungsweglängen in der Garage ließen sich jedoch anhand der Ergebnisse der Evakuierungssimulation in Verbindung mit denen der cfd-Rauchgassimulaiton ausräumen.

b) es im Brandfall im Bauteil D nicht zu einer Verrauchung der Mall im EG kommt, da in diesem Treppenräume münden, die nach der Landesbauordnung im Freien münden müssten und außerdem die Ausgangslänge auf der Mall über der maximal zulässigen von 35 m liegt.

   Da im 4. OG im Bauteil D die Rettungsweglängen grundsätzlich eingehalten werden, muss dem Konzept der MVkVO [4] folgend kein Nachweis erbracht werden, dass die Mall (speziell das 4. OG) nicht verraucht, bzw. erst dann

verraucht, wenn die Personen sich nicht mehr auf dieser Ebene (speziell in der Mall) befinden. Ein derartiger Nachweis ist nicht notwendig, da wie o. g. der Gesetzgeber den Ausfall eines Rettungsweges (hier der Mall) akzeptiert. Der durchgeführten Evakuierungssimulation kann jedoch im Zusammenhang mit der durchgeführten CFD-Entrauchungssimulation entnommen werden, dass es zu einem Ausfall der Mall im 4. OG erst nach Abschluss der Selbstrettung kommt.

CFD-RAUCHGASSIMULATION - ERGEBNISSE

Rauchableitung aus den Garagengeschossen

In der geplanten Garage ist eine Strahlventilatorenanlage vorgesehen, die zusätzlich durch Fort- bzw. Zuluftschächte mit innenliegenden Axialventilatoren ergänzt wird. Im Normalbetrieb wird diese Anlage zur Regulierung des CO-Gehaltes in den Garagengeschossen eingesetzt. Bei einem Brand in der Garage werden die Strahl- und Axialventilatoren über Rauchmelder der Brandmeldeanlage angesteuert.

Im Brandfall wird die volle Ventilatorleistung (ca. 470.000 m³/h; ca. 16,5facher Luftwechsel) für die Entrauchung des Brandgeschosses eingesetzt. Die CFD-Simulationen haben ergeben, dass die Strahlventilatoren (mit Ausnahme auf der „Umschaltgrenze“ nicht benötigt und somit ausgeschaltet werden.

Das Geschoss ist in zwei sog. Brandbereiche unterteilt (Bild 12). Die Normallüftung hat Abzüge im Ostbereich und Zuluft im Westbereich. Im Brandfall wird im betroffenen Brandbereich Rauch abgesaugt, in dem anderen – nicht vom Brand betroffenen – Brandbereich wird Frischluft mechanisch zugeführt (Bild 13 und Bild 14).

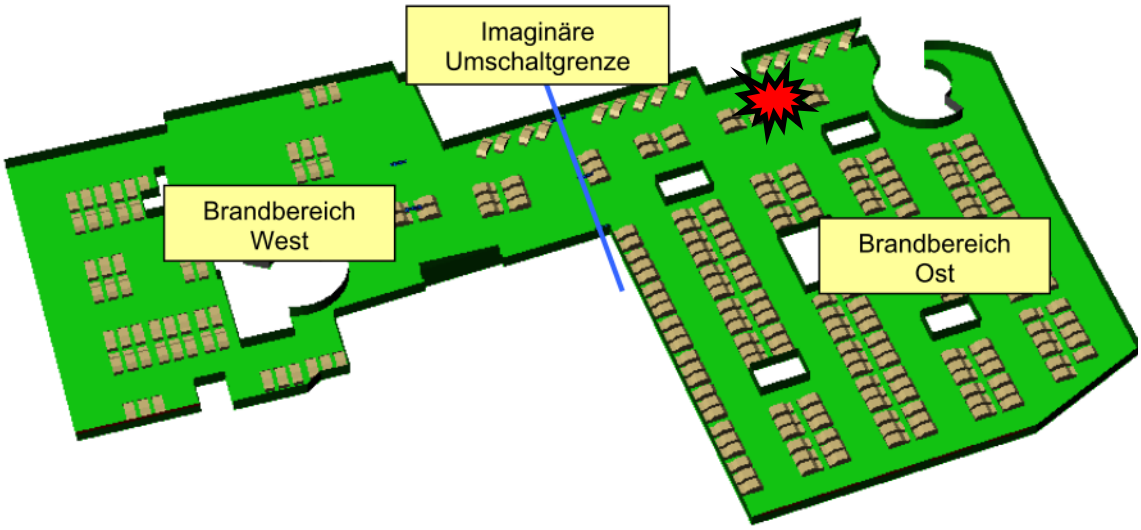


Bild 12 *Übersicht der Brandbereiche Ost und West sowie der „Umschaltgrenze“ – Brandszenario im Brandbereich Spindel Ost*

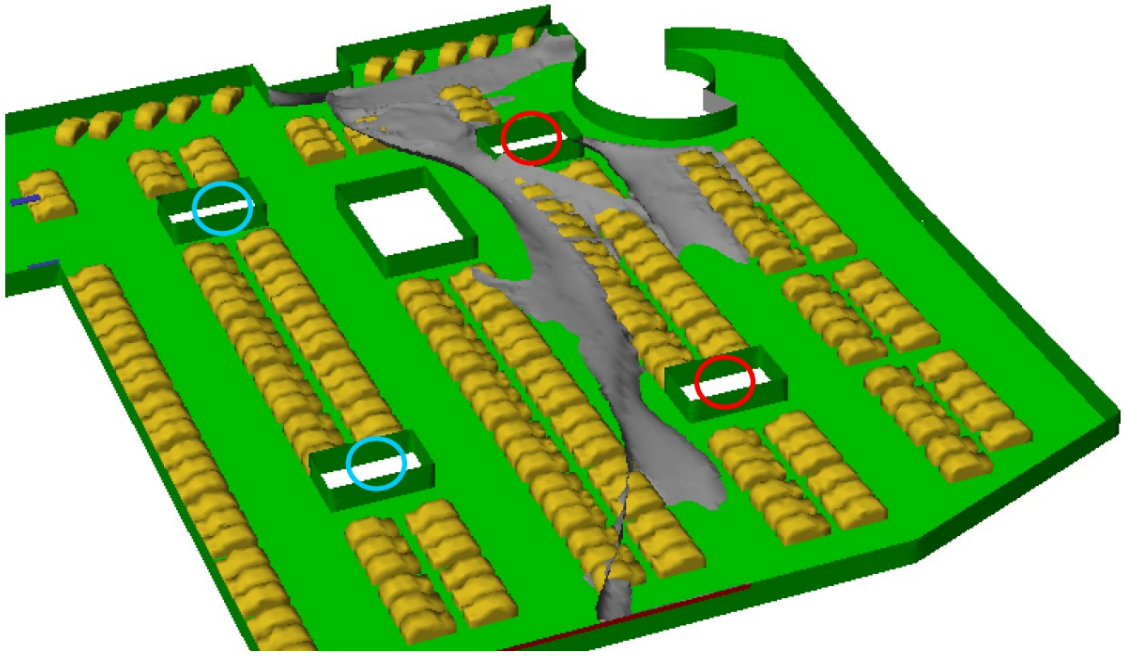


Bild 13 Rauchverteilung nach 20 Minuten – Ausfall zweier Treppenräume (rote Kreise)

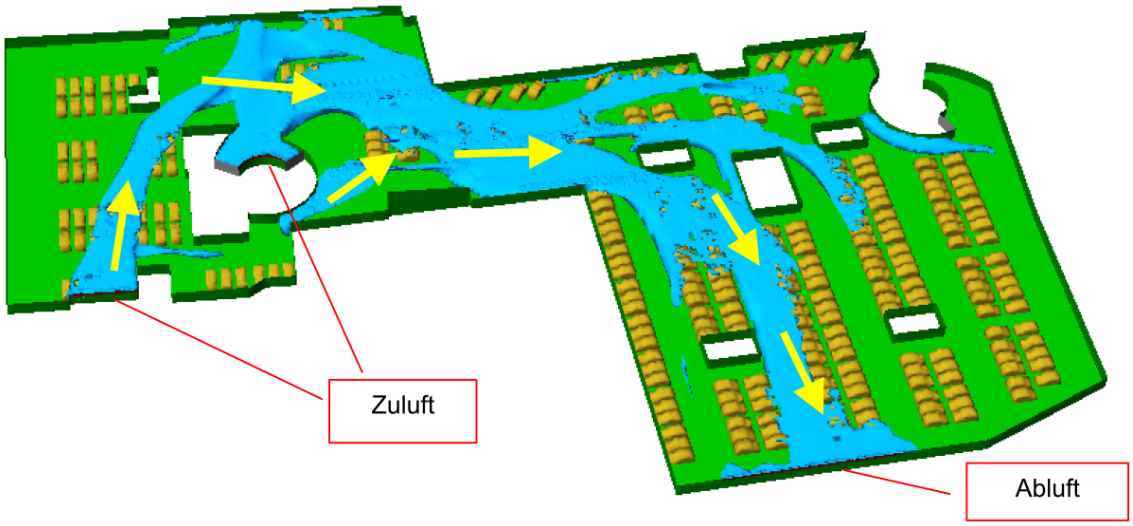


Bild 14 Darstellung der Luftbewegung

RAUCHABLEITUNG AUS DER MALL

Auch die Rauchentwicklung in der Mall wurde mittels computergestützter Simulationen berechnet. Dabei untersuchte die AFC AG die Ausbreitung des Rauchs sowie die Entwicklung der Sichtweiten insbesondere im ersten und vierten Obergeschoss. In allen Fällen galt es, das Schutzziel sicherzustellen bzw. nachzuweisen: Im Rahmen der 35 Meter langen Fluchtwege, eine Mindestsichtweite (2,50 Meter über dem Boden) von 35 m Metern (bis zu fünf Minuten

nach dem Ausbruch eines Brandes) bzw. 20 Metern (ab fünf Minuten). Dazu wurden verschiedene Brandherde untersucht. Beispielhaft wurden ein Brand im Untergeschoss (UG), zwei Brände im Erdgeschoss (EG) und zwei Brände im ersten Obergeschoss (OG) simuliert (Bild 15).

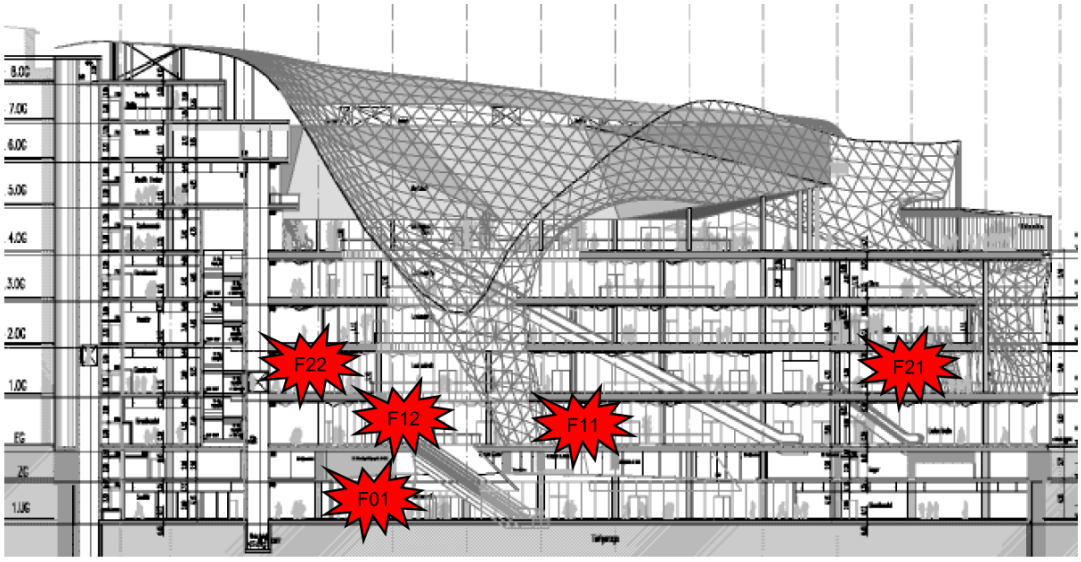


Bild 15 untersuchte Brandszenarien

Bei dem Brand wurde von einer quadratisch ansteigenden Brandleistung ausgegangen. Basierend auf der VDI 6019 Teil 1 und den Abstimmungen mit der Bauaufsicht, der Feuerwehr und dem eingesetzten „Zweitprüfer“ wurden die in Tabelle 2 angegebenen Eingangsgrößen verwendet.

Tabelle 2 Brandtechnologische Kennwerte

Brandtechnologischer Kennwert	Wert
Geschwindigkeit Brandentwicklung	schnell
Max- spez. Wärmefreisetzungsrate	500 kW/m2
Brandintensitätskoeffizient α	0,047 kW/s
Nennauslösetemperatur TNA	68 °C
Trägheitsindex RTI	120 (ms)0,5
Raumhöhe	4,9 m
Auslösezeitpunkt	3,67 min

Die Simulationen dauerten jeweils 20 Minuten, da die Brandleistung nach dieser Zeit auf einen so kleinen Wert absinkt, dass die Verrauchung ihren Höhepunkt überschritten hat und geringer wird (Bild 16).

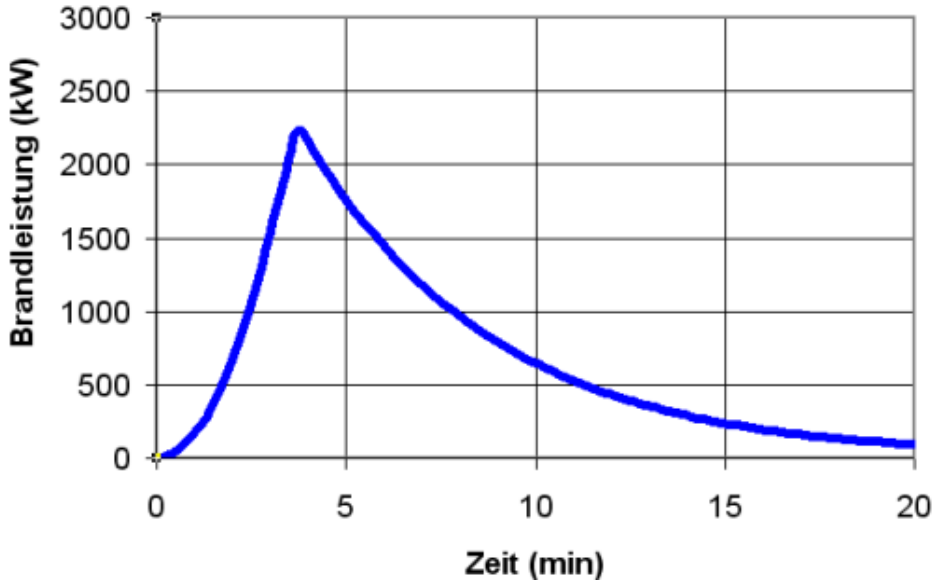


Bild 16 Darstellung des Brandverlaufs

Die Entrauchung des „MyZeil“ erfolgt im Ergebnis über sechs Ventilatoren, die im Dachbereich an drei Stellen zentriert angebracht sind. Bei einem Brand im Untergeschoss wird die verrauchte Luft zusätzlich abgesaugt. Frischluft kann über die Eingänge (im Süden und Osten der Mall) nachströmen (Tabelle 3).

Tabelle 3 Flächen und Volumenströme für die Rauchableitung aus der Mall

	Fläche total m^2	Volumenstrom m^3/h	Mittlere Luftgeschwindigkeit m/s
RWA Dachbereich	11	600.000	15
RWA Untergeschoss	20	100.000	1,4
Nachströmung	100	600.000 700.000	1,7 1,9

Die Resultate zeigen: Die Sichtweiten bei allen Brandszenarien betragen fast immer mehr als 35 Meter. Bei einem Brand im UG gelangt beispielsweise nur sehr wenig Rauch durch die Durchbrüche vom UG zum EG, da hier eine erhöhte Absaugung des Rauchs erfolgt.

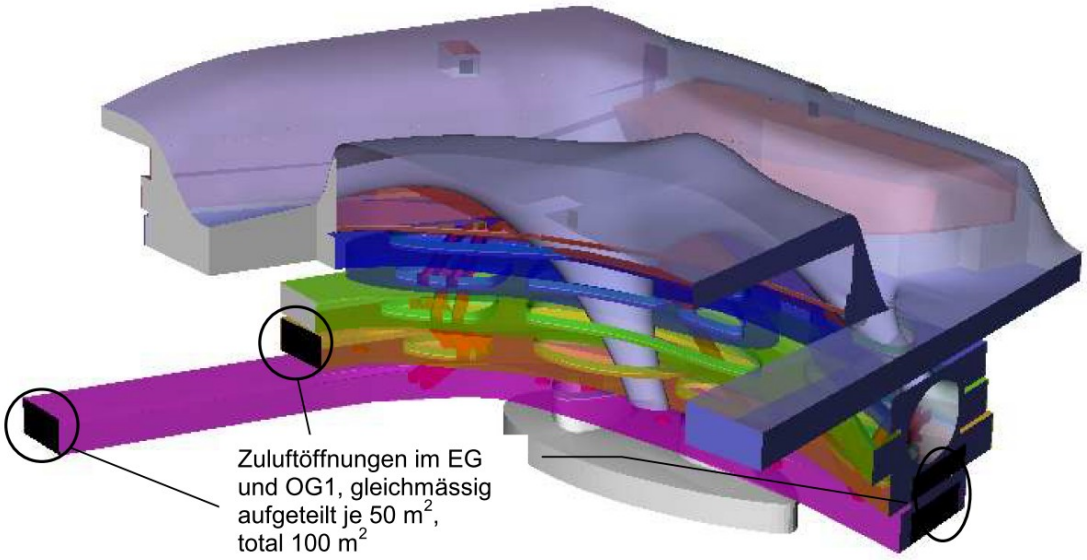


Bild 16 Lage der Zuluftöffnungen und der Entrauchungsventilatoren

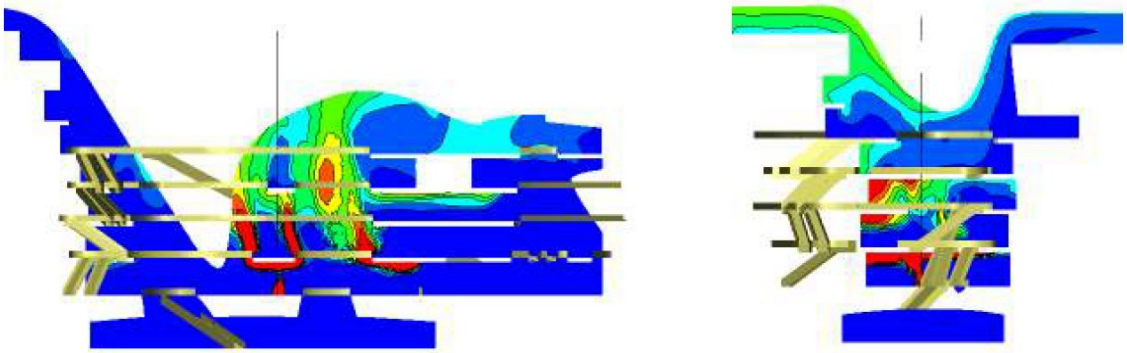


Bild 17 Rauchverteilung nach 5 Minuten, Schnitt Nord-Süd und West-Ost durch den Brandherd

Fazit

Das PalaisQuartier – eines der größten Innenstadt-Projekte, das in den letzten Jahren in Deutschland realisiert wurde – konfrontierte die Projektbeteiligten in allen Bereichen mit neuen Dimensionen. Auch bei der Planung der Brandschutzmaßnahmen galt es daher, neue Wege zu gehen und maßgeschneiderte, schutzzielorientierte Lösungen zu finden.

Das Gesamt-Projekt wurde für die Brandschutzplanung in seine einzelnen Bauteile „zerlegt“ werden, um sie getrennt voneinander betrachten und bewerten zu können. Das heißt, es wurde für jeden Gebäudeteil zunächst ein individuelles Brandschutzkonzept entwickelt, das den jeweiligen, detaillierten Anforderungen gerecht werden konnte. Ein allumfassendes und übergreifendes Gesamtkonzept umschließt die Einzel-Konzepte, regelt die Schnittstellen und führt die Einzelbetrachtungen zu einem schlüssigen, großen Ganzen zusammen. Mit

der Priorität, die allgemeinen Schutzziele des Brandschutzes zu erfüllen, ist es gelungen – aus einem Mix von Rechtsverordnungen und Gesetzen sowie der Anwendung innovativer Ingenieurmethoden – ein sicheres Brandschutzkonzept zu erstellen und zugleich den architektonisch anspruchsvollen und unkonventionellen Entwurf zu realisieren.

Aus dem Bereich der Ingenieurmethoden bzw. Sondernachweise hat das Projekt einiges geboten. durchgeführt wurden:

- Heißbemessung für das Dachtragwerk der Mall – thermische und mechanische Analyse
- Rauchgassimulation für die Mall zur Überprüfung der Sicherstellung der im EG mündenden Malltreppenräume
- Modellversuch 1:30 der Rauchableitung in der Mall, um die Planungssicherheit für die Entrauchungsanlagen noch vor der erreichten Baugenehmigung zu erhöhen
- Rauchgassimulation für das Foyer im BT B zum Nachweis des Verzichtes von Aufzugsvorräumen im Foyer
- Rachgassimulation für die fast 12.000 m² große Garage zum Nachweis, dass trotz Verzicht auf Rauchabschnitt eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung nicht gegeben ist.
- Evakuierungssimulation für alle Gebäude – auch um Werte für eine mögliche Räumzeit in einem nicht betrachteten Katastrophenfall zu bekommen
- Evakuierungssimulation für die Expressrolltreppe
- Evakuierungssimulation außerhalb des Gebäudes um den Nachweis zu führen, dass die Rettungswege trotz Einengungen sicher bis ins öffentliche Straßenland geführt werden.
- Rauchversuche in der Mall um zu überprüfen, ob die Verknüpfung der unterschiedlichen Brandschutztechnischen Anlagen funktioniert und zur Plausibilitätsprüfung der durchgeführten Simulation
- Fassadenbrandversuche zum Nachweis, dass trotz schräg gestellter Fassaden eine besondere Gefährdung im Bereich der Hochhäuser nicht gegeben ist.

LITERATUR

[1] HBO; Hessische Bauordnung; Juni 2002

[2] HHR; Richtlinien über den Bau und Einrichtung von Hochhäusern - Fassung Dezember 1983

[3] GaVO; Verordnung über den Bau und Betrieb von Garagen und Stellplätzen - Fassung 16.November 1995

[4] MVkVO; Muster Verordnung der Fachkommission "Bauaufsicht der ARGEBAU über den Bau und Betrieb von Verkaufsstätten - Stand September 1995

[5] MVStättV; Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten - Fassung Mai 2002

[6] FrankfurtHochVier: BT D – Entrauchung im Brandfall, CFD-Simulationen, Bericht 3.0, 14.Juni 2006, AFC Air Flow Consulting AG Zürich

[7] MAB Zeil: ASERI Entfluchtungssimulation, 08.03.2004, IST Integrierte Sicherheits-Technik GmbH

BRANDSCHUTZKONZEPTE IM SPANNUNGSFELD ZWISCHEN DIN 18230 UND DEN EUROCODES

Georg Spennes und Gregor Jäger
Sachverständigenbüro BFT Cognos GmbH, Aachen

MOTIVATION

Moderne und anspruchsvolle Architektur und der Einsatz von modernen Baustoffen (z. B. hochduktile Stähle, transparente Gebäudehüllen etc.) können bisher nur durch den Einsatz neuster Erkenntnisse aus Wissenschaft und Technik realisiert werden. Ingenieurmethoden des Brandschutzes können heute dabei helfen, ein Gebäude bzw. eine bauliche Anlage hinsichtlich der Brandschutzmaßnahmen risikogerecht und wirtschaftlich zu planen, zu bewerten und zu realisieren. Dies gilt auch für Gebäude des Bestandes. Heutige Nutzungskonzepte sind mit einer wortgetreuen Umsetzung der bauordnungsrechtlichen Anforderungen, wie man sie den Landesbauordnungen entnehmen kann, nur noch bedingt vereinbar.

Die materiellen Brandschutzregelungen der jeweiligen Landesbauordnung sind auf die Wohnnutzung und auf hinsichtlich der Risiken vergleichbare Nutzungen abgestimmt. Im Sonderbau, vor allem in Gebäuden z. B. mit erhöhtem Publikumsverkehr, in Versammlungsstätten, in Hochhäusern, in gewerblich oder industriell genutzten Gebäuden reichen die für Standard-Wohngebäude definierte bauliche Maßnahmen nicht aus. Die baulichen Maßnahmen werden durch technische bzw. organisatorische Maßnahmen ergänzt, um das durch die besondere Nutzung erhöhte Risiko auszugleichen, um wiederum das erforderliche Mindestsicherheitsniveau zu erreichen. In der heutigen Genehmigungspraxis wird für diese Sonderbauten ein Brandschutzkonzept gefordert. In diesem werden Erleichterungen und Abweichungen von den sonst geltenden Vorschriften, die sich aus der besonderen Art und Nutzung für die Errichtung, die Änderung, die Instandhaltung, den Betrieb und die Benutzung ergeben, beschrieben. Das Feld der Anwendungen von Ingenieurmethoden des Brandschutzes ist in den vergangenen Jahren stetig gewachsen. Sie kommen beispielsweise als Werkzeug bei der Beurteilung von bestehenden Tragkonstruktionen zum Einsatz, die nach den deskriptiven Vorgaben aus heutigen Regelwerken nur mit erheblichem finanziellem Aufwand ertüchtigt werden könnten.

Ein Blick in die Entwicklung der „Bauingenieurkunst“ der letzten 2.000 Jahre zeigt, dass nicht nur heute Ingenieure zur Erfüllung ihrer Aufgaben vor besonderen Herausforderungen stehen.

Dem zwischen den Jahren 72 und 80 n. Chr. in Rom errichteten Amphitheatrum Novum, besser bekannt unter dem Namen Kolosseum, wird nachgesagt, dass es durch die Anordnung der Treppen, Gänge und Ausgänge innerhalb von drei Minuten geräumt werden konnte [1]. Im Vorfeld der Veranstaltungen soll es darüber hinaus möglich gewesen sein, dass Amphitheater innerhalb weniger Mi-

nuten mit Zuschauern zu füllen. Diese Leistungsfähigkeit wird bisher dem besonderen Wegesystem des Bauwerkes zugeordnet und dient heute noch als Vorbild für moderne Multifunktionsarenen.

Die bei der Errichtung eines Gebäudes zu beachtenden Anforderungen begründeten sich bis zum Ende des 19. Jahrhunderts aus den Lebens- und Schadenserfahrungen der Baumeister der jeweiligen Epoche. Die Verordnungen enthielten meist rein qualitative Anforderungen, die für die bauliche Ausführung nur bedingt Orientierung hinsichtlich der einzuhaltenden Schutzziele gaben.

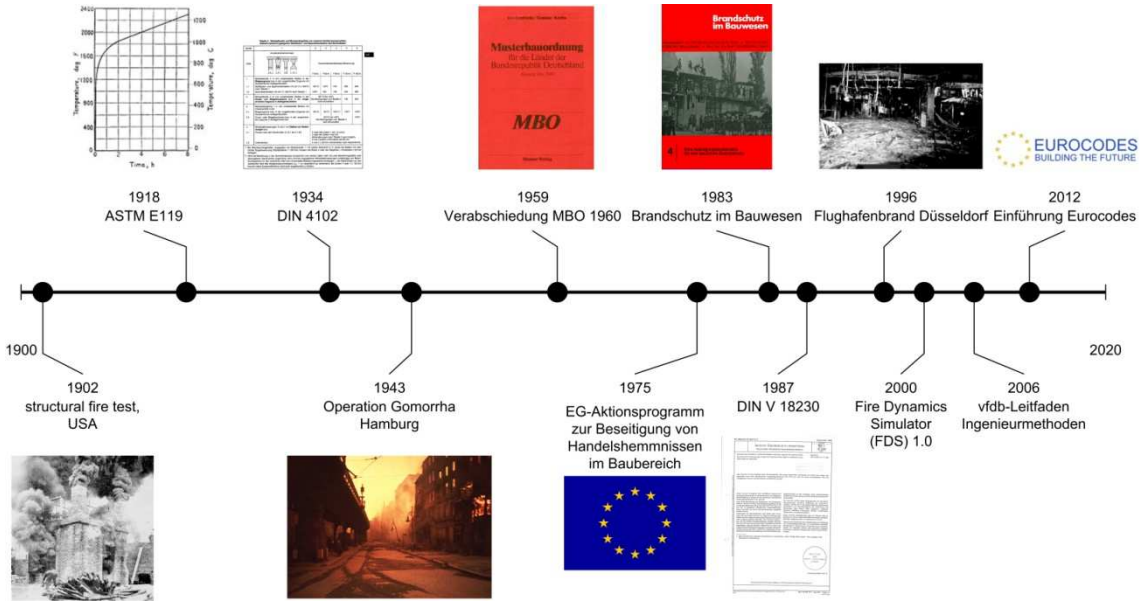


Bild 1 Geschichte der brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts fanden Begriffe wie „feuersicher“, „feuerfest“ oder „feuerhemmend“ in den Bauvorschriften erstmals Verwendung. Mit Einführung dieser Klassifizierungsbegriffe begann die Entwicklung von Prüfverfahren, Verfahrens- und Produktnormen. Die Festlegung einer Einheits-Temperaturzeitkurve für die Bemessung von Bauteilen im Regelwerk ASTM E199 im Jahr 1918 kann als Geburtsstunde der heute unter dem Oberbegriff „Brandschutzingenieurmethoden“ angewendeten Werkzeuge und Methoden bezeichnet werden (siehe Bild 1). Das Normenwerk DIN 4102 Teil 4 enthält einen Katalog von Baustoffen, Bauteilen und Sonderbauteilen, die nach ihrem Brandverhalten auf der Grundlage von Prüfungen nach der Normenreihe DIN 4102 klassifiziert wurden und seitdem bei Umsetzung der baurechtlichen Anforderungen eingesetzt werden können. In der Norm sind im Wesentlichen die für die geforderte Feuerwiderstandsdauer erforderlichen Querschnittsabmessungen bzw. Bekleidungsdicken und gegebenenfalls Lastausnutzungsgrade auf Grundlage der Einheits-Temperaturzeitkurve hinterlegt. Einen ausführlichen Überblick über die Geschichte dieser nationalen Norm ist [2] zu entnehmen.

Ein weiteres Beispiel für Methoden des Brandschutzingenieurwesens stellt die 1987 als Vornorm erschienene DIN V 18230 Teil 1 über eine einheitliche brand-

schutztechnische Bemessung von Industriebauten mit festlegbarer Brandbelastung in Bezug auf die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer ihrer Bauteile dar [3]. Mit der bauaufsichtlichen Einführung der Industriebaurichtlinie in den Jahren 1989 bis 1993 (u. a. im Bundesland Nordrhein-Westfalen [4]) erlangte die Norm ihre bis heute anhaltende Bedeutung. Seitdem ermöglicht die in allen Bundesländern als Technische Baubestimmung eingeführte Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL) die Festlegung und den Nachweis der Anforderungen an Baustoffe und Bauteile sowie an die Größe der Brandbekämpfungsabschnitte.

Was haben nun die Baumeister von damals und die Architekten, Fachplaner und Mitarbeiter der Genehmigungsbehörden von heute gemeinsam? Heute wie damals stellt sich die Frage, wie man die Sicherheit der Nutzer im Gebäude bzw. in der baulichen Anlage im Sinne der baurechtlich definierten Schutzzielanforderungen gewährleisten kann. Der Brandschutzingenieur steht bei der Aufstellung des Nachweises vor der besonderen Herausforderung, dass durch den Nachweis nicht der Eindruck entsteht, man möchte die Anforderungen der Bauordnung umgehen.

Nachdem in den vergangenen Jahren die Erstellung von Brandschutzkonzepten weitestgehend beherrscht wird und sich die Prüfung nach einheitlichen Kriterien etabliert hat, wird in Fachkreisen zunehmend über die Validierung und Verifizierung der bisher eingesetzten Werkzeuge zur Brandsimulation und ihrer Einbindung in die Konzeption diskutiert.

In diesem Beitrag werden die Fortschritte der vergangenen Jahre aufgegriffen und der Bogen zwischen der Erstellung von Brandschutzkonzepten und der Einbindung von Ingenieurmethoden des Brandschutzes gespannt. Zu Beginn werden die bauordnungsrechtlichen Anforderungen in allgemeiner Form und die erforderliche Umsetzung der zielorientierten Gesamtbewertung im Brandschutzkonzept beschrieben. Anschließend folgt ein Überblick über die heute bekannten und angewendeten Methoden des Brandschutzingenieurwesens.

Die Einführung der wesentlichen Teile des Eurocodes für die Bemessung im Brandfall im Juli 2012 als Technische Baubestimmungen kann als Quantensprung im Brandschutzingenieurwesen bezeichnet werden. Am Beispiel des Näherungsverfahren zur Bestimmung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer nach DIN 18230 und der Bemessung von Tragwerken im Brandfall gemäß Eurocodes werden die für die kommenden Jahre bevorstehenden Herausforderungen für eine Etablierung der Anwendung von Ingenieurmethoden des Brandschutzes in die tägliche Arbeit herausgearbeitet.

BAUORDNUNGSRECHTLICHE ANFORDERUNGEN

Das in der Gesetzgebungskompetenz der Bundesländer liegende Bauordnungsrecht regelt die grundsätzlichen Anforderungen an die Ausführung von Gebäuden und baulichen Anlagen. Die in den Anwendungsbereich fallenden

Gebäude und baulichen Anlagen müssen so angeordnet, errichtet, geändert und instand gehalten werden, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen nicht gefährdet werden. Eine Konkretisierung dieser oft als bauordnungsrechtliche Generalklausel bezeichnete und in vielen Vorträgen/Fachbeiträgen zitierten Anforderungen erfolgt unter anderem für die Bereiche Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Brandschutz in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Ziel und Zweck der im Bauordnungsrecht definierten brandschutztechnischen Anforderungen ist die Sicherstellung einer ausreichenden Sicherheit im Brandfall. Diese richtet sich nach den vier Grundanforderungen, die umgangssprachlich als Schutzziele bezeichnet werden:

- Entstehung eines Brandes vorbeugen,
- Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen,
- Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen und
- wirksame Löscharbeiten ermöglichen.

Die Ausgestaltung dieser Schutzziele erfolgt in weiteren Einzelvorschriften, die sich in der Regel auf die Wohnnutzung und hinsichtlich der Risiken auf eine vergleichbare Nutzung beziehen. Übersteigen die Risiken die übliche Nutzung, bedarf es weiterer Anforderungen an den Brandschutz. Hierbei kann die Bauordnung keine in Bezug auf die spezielle Art und Nutzung weitergehenden Anforderungen aufführen, da damit der Gesetzesumfang gesprengt werden würde.

Grundsätzlich kann die Nachweisführung zum baulichen Brandschutz deskriptiv auf Grundlage der jeweiligen Landesbauordnung in Verbindungen mit den eingeführten Technischen Baubestimmungen und/oder weiteren bauaufsichtlichen Verordnungen und Richtlinien, nach allgemein anerkannten Regeln der Technik oder nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erfolgen.

Die heute angewendete Rechtssystematik wurde nicht zuletzt durch die Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) maßgebend beeinflusst. Ausgehend von diesem Ziel wurden in den vergangenen Jahren die notwendigen Normen und Leitlinien für die erforderlichen europäischen technischen Zulassungen erarbeitet. Die im Grundlagendokument „Brandschutz“ [4] definierten Anforderungen entsprechen im Wesentlichen den bereits beschriebenen baurechtlichen Brandschutzanforderungen.

Anforderungen an Brandschutzkonzepte

Zu den erforderlichen Unterlagen (Bauvorlagen) eines Bauantrages für Sonderbauten gehört in Abhängigkeit der Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung ein Brandschutzkonzept. Dieses stellt dabei eine zielorientierte Gesamtbewertung des baulichen und abwehrenden Brandschutzes dar. Die erforderlichen Angaben regeln die zur Verwirklichung der allgemeinen bauordnungsrechtlichen Anforderungen durch Rechtsverordnung erlassenen Vorschriften.

Die Erstellung erfolgt in der Regel basierend auf den in den Gesetzen, Verordnungen und Technischen Regelwerken deskriptiv formulierten Anforderungen.

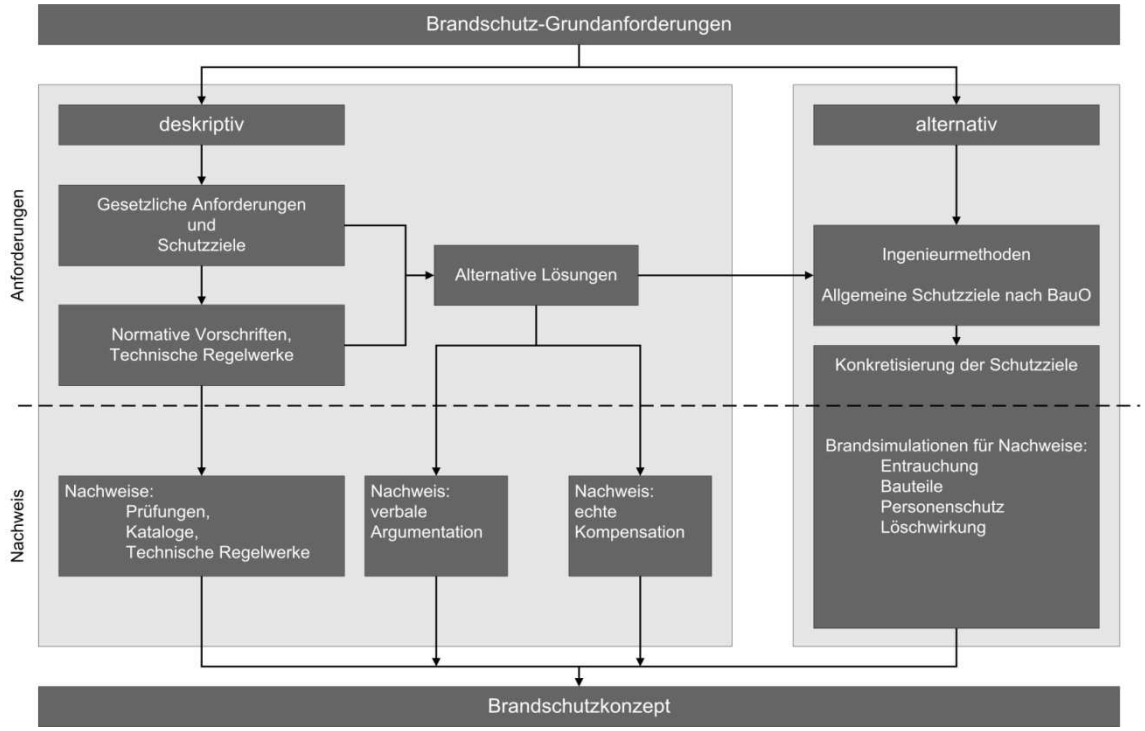


Bild 2 Möglichkeiten zur Nachweisführung der Brandschutzanforderungen

Durch die Fortschritte bei der Entwicklung und den Einsatz von neuen Bauprodukte und der europäischen Harmonisierung kommen Abweichungen von den materiellen Anforderungen der häufig als träge erscheinenden Bauordnungen bzw. rechtlichen Regelungen immer häufiger vor. Diese Abweichungen müssen begründet werden und das Gesamtzusammenspiel aller wirksamen brandschutztechnischen Maßnahmen muss dabei in sich schlüssig und nachvollziehbar dargestellt werden. Dies erfolgte bisher überwiegend verbal argumentativ.

Die Anzahl der Brandschutzkonzepte, bei denen der Nachweis durch Einsatz/ Anwendung von Ingenieurmethoden des Brandschutzes geführt wird, nimmt langsam aber stetig in den vergangenen Jahren zu. Im Gegensatz zu der freien verbalen Argumentation über die Gleichwertigkeit der Kompensationsmaßnahmen erfolgt der Nachweis mit Ingenieurmethoden anhand von quantitativen Kriterien. Eine Herausforderung stellt hierbei noch immer die Konkretisierung der Schutzziele dar. Orientierung zu diesen Fragen bietet beispielsweise der vfdb-Leitfaden „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“.

Im Mai 2000 erschien die erste Ausgabe der vfdb-Richtlinie 01/01 „Brandschutzkonzept“ [6]. Diese durch das Referat 1 „Vorbeugender Brandschutz“ des Vereins zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb e. V.) erarbeitete Richtlinie kann als Reaktion auf die Entwicklungen im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes verstanden werden. Die heute vorliegende aktuelle Fas-

sung [7] enthält nicht nur einen Vorschlag zum Inhalt eines Brandschutzkonzeptes, sondern auch Hinweise zum Genehmigungsverfahren und zur Prüfung. Das Kapitel 8 [8] enthält Grundsätze für die Aufstellung von Nachweisen mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens. Danach müssen die Brandszenarien der Nutzung entsprechen und auf der sicheren Seite liegende Brandwirkungen ergeben.

Diese lassen sich

- durch die Verwendung von Ergebnissen aus Brandereignissen, die der geplanten bzw. vorhandenen Nutzung und spezifischen Brandbelastung ähnlich sind,
- durch Brandszenarien, die nach international anerkannter Meinung für die spezielle Situation anzunehmen sind, oder
- durch Ableitung der Brandbelastung anhand der Art und Menge der tatsächlich vorhandenen brennbaren Stoffe

bestimmen.

Der Nachweis muss, so der Schlusssatz von Kapitel 8, „… *vollständig, nachvollziehbar und überprüfbar sein*“. Die Auslegung der in diesem Satz enthaltenen Begriffe „Vollständigkeit“ und „Nachvollziehbarkeit“ bleibt dem Leser überlassen. Dieser Interpretationsspielraum führt zuweilen in der Praxis zu längeren und zeitintensiven Gesprächen zwischen dem Nachweisersteller, dem Prüfer und/oder der genehmigenden Behörde. Solange die Kraft des Feuers in Düsseldorf und Köln scheinbar unterschiedlichen Naturgesetzen folgt, wird die Diskussion über die Plausibilität des Nachweises zum Alltag gehören.

Ingenieurmethoden des Brandschutzes

Ingenieurmethoden auf dem Gebiet der Brandsicherheit sind gemäß dem Grundlagendokument „Brandschutz“ ein Ansatz zur Anwendung ingenieurgemäßer Grundsätze zur Bewertung des erforderlichen Brandsicherheitsniveaus und zur Bemessung und Berechnung der erforderlichen Schutzmaßnahmen. Im Sinne des Grundlagendokumentes können sie

- zur Ermittlung grundlegender Kenntnisse über die Entwicklung und Ausbreitung von Feuer und Brandgasen in Bauwerken,
- zur Bewertung von thermischen, chemischen und mechanischen Einwirkungen,
- zur Beurteilung des Verhaltens von Bauprodukten bei Brandeinwirkung,
- zur Beurteilung der Brandmeldung, Aktivierung und Brandbekämpfung und
- zur Beurteilung und Bemessung von Räumungs- und Rettungsmaßnahmen

angewendet werden.

International sind zu den aufgeführten Bereichen bereits wesentliche Teile weit entwickelt und teilweise sogar Gegenstand von Technischen Regelwerken. In den vergangenen Jahren sind in Deutschland von verschiedenen Gremien Handlungsanweisungen zum Vorgehen bei der Erstellung von Nachweisen mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes erarbeitet und veröffentlicht worden. Auf nationaler Ebene ist gegenwärtig die Erarbeitung einer Rahmenrichtlinie für die Erstellung von Brandschutzkonzepten zur Erreichung bestimmter Schutzziele unter Anwendung von wissenschaftlichen und ingenieurgemäßen Arbeitsprinzipien Gegenstand eines Normungsgremiums (DIN 18009 - NA 005-52-21 AA). Als Vorläufer der heute in der Bearbeitung befindlichen Normen und Richtlinien sei an dieser Stelle das Näherungsverfahren nach DIN 18230 zur Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von Bauteilen und der Brandabschnittsgröße im Industriebau genannt, das vor ca. 30 Jahren Eingang in das Normenwerk fand. All diesen Methoden ist gleich, dass diese auf jahrelangen Vorarbeiten beruhen und ihre Eignung und Anwendung bereits getestet wurden, bevor diese in Normen und Regelwerken einflossen.

Neben dem wirtschaftlichen Ziel, das die Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften in der Europäischen Union hatte und heute noch hat, wurden fast unbemerkt die Weiterentwicklung und die Anwendung von Ingenieurmethoden nicht nur in Deutschland gefördert. Nicht zuletzt durch die Veröffentlichung des vfdb-Leitfadens „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ [9] im Jahr 2006 haben die Weiterentwicklung und insbesondere die Anwendung einen vornormativen Charakter sowie eine gewisse Akzeptanz bei den Genehmigungsbehörden erfahren. Zu Beginn der Entwicklung wurden Methoden für die Brandschutzbemessung entwickelt, die zumeist auf experimentellen Daten beruhten. Dies bedeutet, dass diese Methoden meist nicht beliebig skalierbar sind und die Anwendung nur in den durch die Experimente abgedeckten Bereichen möglich ist. Meist betrachten diese Methoden auch nicht die mögliche zeitliche Änderung von Einflussgrößen und Randbedingungen.

Heute versteht man unter Ingenieurmethoden des Brandschutzes meist den Einsatz von Brandsimulationsmodellen, denen technische und wissenschaftliche Erkenntnisse aus der Thermodynamik und Strömungsmechanik zugrunde liegen. Diese sind, unter der Annahme der allgemeinen Gültigkeit der Theorien, in vielen Bereichen frei skalierbar und anwendbar. Die Grenzen der Modelle für die Strahlungsberechnung, der Turbulenzbetrachtung und Verbrennungsberechnung liegen im Wesentlichen in der Detaillierung der einzelnen Modelle und den analytischen Lösungen [10].

BESTIMMUNG DER FEUERWIDERSTANDSDAUER VON BAUTEILEN UND DER BRANDABSCHNITTSGRÖSSE IM INDUSTRIEBAU

Für Industriebauten, die im Sinne der Landesbauordnung bauliche Anlagen und Räume besonderer Art und Nutzung darstellen, ist in den meisten Bundesländern durch Rechtsverordnung die Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL) eingeführt. Die von einer Projektgruppe der Fachkommission Bauaufsicht der

ARGEBAU erarbeitete und zwischenzeitlich novellierte Muster-Richtlinie diente in den meisten Bundesländern als Vorlage für die Umsetzung in spezifisches Landesrecht. Das Ziel der MIndBauRL ist es, die Anforderungen an den Brandschutz von Industriebauten zur Erfüllung der bauordnungsrechtlichen Schutzziele zu regeln. Industriebauten im Sinne der Richtlinie sind Gebäude oder Gebäudeteile im Bereich der Industrie und des Gewerbes, die der Produktion oder Lagerung von Produkten oder Gütern dienen. Die Richtlinie regelt insbesondere Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile, die Brennbarkeit der Baustoffe, die Größe der Brandabschnitte bzw. Brandbekämpfungsabschnitte und der Anordnung, Lage und Länge der Rettungswege.

Die Mindestanforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile und die Größe der Brandabschnitte bzw. Brandbekämpfungsabschnitte können nach Abschnitt 4 MIndBauRL

- nach dem vereinfachten Verfahren (Abschnitt 6),
- auf Grundlage des Rechenverfahrens nach DIN 18230-1 oder
- mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens zum Nachweis der grundlegenden Anforderungen

festgelegt werden. Für die Aufstellung von Nachweisen mit Methoden des Brandschutzingenieurwesens sind die Grundsätze von Anhang 1 MIndBauRL zu beachten.

Nachweis auf Grundlage des Rechenverfahrens nach DIN 18230-1

Nach Abschnitt 7 MIndBauRL wird für einen Brandbekämpfungsabschnitt auf Grundlage der ermittelten Brandlasten die äquivalente Branddauer $t_{ä}$ zur Bestimmung der zulässigen Fläche und die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer (erf. t_F) zur Bestimmung der Anforderungen an die Bauteile in Abhängigkeit der Brandsicherheitsklasse ermittelt. Die äquivalente Branddauer beschreibt die Zeit in Minuten, bei der im betrachteten Bauteil im Normbrand näherungsweise dieselbe Wirkung (z. B. Temperatur) erreicht wird wie im natürlichen Schadfeuer (siehe Bild 3). Der Nachweis wird anhand eines definierten Referenzbauteils durchgeführt.

Die äquivalente Branddauer $t_{ä}$ (1) wird aus der rechnerischen Brandbelastung q_R, dem Umrechnungsfaktor *c* zur Berücksichtigung des Wärmeabflusses durch die Umfassungsbauteile und des Wärmeabzugsfaktors *w* ermittelt:

$$t_{ä} = q_R * c * w \tag{1}$$

Die rechnerische spezifische Brandbelastung q_R (2) ergibt aus der rechnerischen Brandbelastung von geschützten und ungeschützten Stoffe.

$$q_R = q_{R,u} + q_{R,g} \tag{2}$$

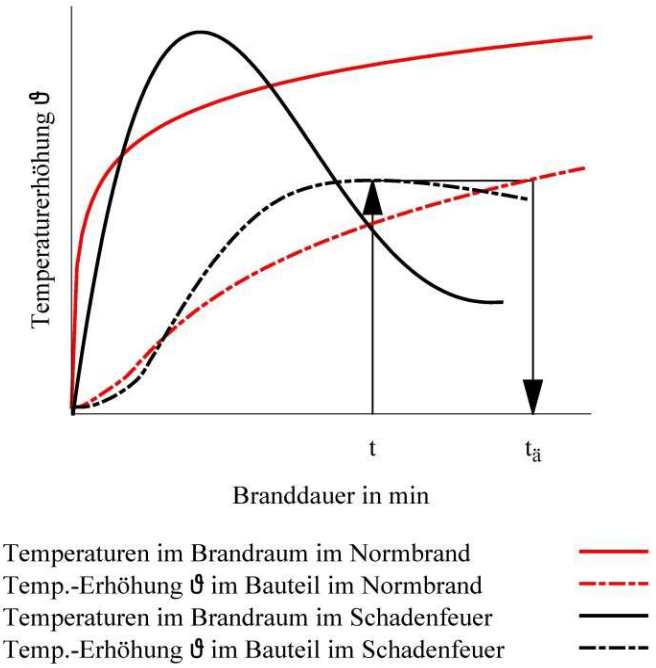


Bild 3 Berechnung der äquivalenten Branddauer

Für ungeschützte Stoffe ergibt sich die rechnerische spezifische Brandbelastung $q_{R,u}$ (3) aus der Summe der Masse der ungeschützten Stoffe M_i, ihrem Heizwert H_{ui} und ihrem Abbrandfaktor m_i.

$$q_{R,u} = \frac{\sum(M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i)}{A_B} \tag{3}$$

Für geschützte Stoffe ergibt sich die rechnerische spezifische Brandbelastung $q_{R,g}$ (4) aus der Summe der Masse der ungeschützten Stoffe M_i, ihrem Heizwert H_{ui} und ihrem Abbrandfaktor m_i und ihrem Beitrag zum Brandgeschehen ψ_i.

$$q_{R,g} = \frac{\sum(M_i \cdot H_{ui} \cdot m_i \cdot \varphi_i)}{A_B} \tag{4}$$

Der Abbrandfaktor m_i ist ein Beiwert, mit dem die Brandlast zur Berücksichtigung des Brandverhaltens der brennbaren Stoffe in der jeweiligen Art, Form und Verteilung im Vergleich zu einem Brand mit Holzkrippen bewertet wird. Die in DIN 18230-3 [11] veröffentlichten m-Faktoren wurden von einem Sachverständigenausschuss beschlossen und amtlich festgelegt. Stoffe mit nicht bekannten Abbrandfaktoren, für die nicht auf der sicheren Seite liegend unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte von vergleichbaren Bau- und Lagerstoffen der entsprechenden Stoffgruppe entsprechende m-Faktoren abgeleitet werden können, können aufgrund Ermangelung von entsprechenden Prüfeinrichtungen heute nicht mehr experimentell untersucht werden. So bleibt dem Anwender des Verfahrens nur der Ausweg, scheinbar auf der sicheren Seite liegende Werte anzunehmen.

Der Umrechnungsfaktor *c* beschreibt den Einfluss des Wärmeabflusses durch die Umfassungsbauteile auf die Temperaturentwicklung im Brandbekämpfungsabschnitt. Bereits in der Vornorm aus dem Jahr 1987 basieren die Angaben aus Erfahrungen mit Brandversuchen in Versuchsbrandräumen, die im Vergleich zu Industriebauten sehr kleine Abmessungen aufweisen. Die bis heute in der Norm enthaltenen *c*-Faktoren wurden auf der sicheren Seite liegend angenommen und werden auch unverändert bis heute verwendet. Eine Überprüfung in größeren Maßstäben erfolgte bisher nicht.

Mit dem Wärmeabzugsfaktor *w* wird berücksichtigt, in welchem Anteil im Brandfall die entstehende Wärme über vertikale (A_v) und horizontale (A_h) offene oder öffenbare Flächen abfließen kann. Es wird bewertet, inwieweit dies zu einer Temperaturentlastung der Bauteile führt. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei die wirksamen Öffnungsflächen in den Wänden und im Dach sowie die maßgebende Höhe des Brandbekämpfungsabschnittes. Dem informativen Anhang der aktuellen Fassung der Norm DIN 18230-1 [12] ist zu entnehmen, dass die Diagramme (Bild 1 und 2) der Norm unter Verwendung eines Rechenprogramms auf Basis der Wärmebilanztheorie für eingeschossige Brandbekämpfungsabschnitte ohne Ebenen mit gleichmäßig verteilter Brandbelastung erstellt wurden. Bei der Erstellung der Norm wurde im Rahmen des Konsensverfahrens beim Diagramm für den Faktor w_0 in Abhängigkeit von dem Öffnungsverhältnis a_v und a_h in Abhängigkeit von der Grundfläche festgelegt, dass die Öffnung bei kleinen a_v- und a_h-Werten aufgrund der schlechten Ventilation in der Regel zu hohen äquivalenten Branddauern $t_{ä}$ führt. Die in den Gleichungen der Norm beschriebenen Bedingungen begründen sich gemäß der Erläuterung darin, dass ansonsten die $t_{ä}$-Werte sehr steil ansteigen und unrealistisch hoch werden würden. Deshalb wurde das Abschneiden der a_v-Werte bei 0,025 festgelegt. Eine Begründung für die in der Norm aufgeführten Bedingungen für den minimalen Wert des Faktors w_0 von $w \geq 0{,}5$ enthält der Anhang leider nicht.

Die rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F (5) in Minuten ergibt sich in Abhängigkeit von dem Sicherheitsbeiwert γ unter Berücksichtigung der Brandsicherheitsklasse SKB und den jeweils maßgebenden Flächen nach Tabelle 2 in Abschnitt 9 DIN 18230-1. Die vorhandene bzw. geplante brandschutztechnische Infrastruktur fließt als Zusatzbeiwert α_L in die Ermittlung der rechnerisch erforderlichen Feuerwiderstandsdauer ein:

$$\text{erf}\, t_F = t_{ä} \cdot \gamma \cdot \alpha_L \tag{5}$$

Neuberechnung Wärmeabzugsfaktor *w*

Nach Veröffentlichung der Vornorm DIN V 18230 im September 1987 wurde im Zuge der Anwendung des in der Vornorm enthaltenen Rechenverfahrens festgestellt, dass bei der Berechnung der äquivalenten Branddauer $t_{ä}$ die *w*-Faktoren teilweise zu niedrig, zu einem kleinen Teil jedoch zu hoch angesetzt wurden. Bereits direkt nach Veröffentlichung der Vornorm wurde vom zuständigen NABau-Arbeitsausschuss 12.04 „*Baulicher Brandschutz im Industriebau*“

angeregt, die Berechnung der *w*-Faktoren zu überprüfen und ggf. neu festzulegen. Somit sollte durch die zwischenzeitlich fortschreitende Entwicklung, vor allem durch die entstandenen rechnerischen Untersuchungsmöglichkeiten, eine in sich konsistente Anpassung früherer Schätz- und Erfahrungswerte im Zuge der Fortschreibung der Norm erfolgen. Der Bericht der Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit [13] enthält die Ergebnisse der in diesem Rahmen durchgeführten Brandsimulation in kleinen, mittleren und großen Industriegebäuden.

Die Neuberechnung der Wärmeabzugsfaktoren in der heute bekannten Fassung erfolgte am Beispiel einer eingeschossigen Halle mit einer Grundfläche von 2.400 m² (60 m x 40 m) mit einer mittleren Höhe von 6 m. Die Dachöffnungen (horizontale Öffnung) wurden gleichmäßig über die gesamte Hallenlänge verteilt. Für die Öffnungen wurde unterstellt, dass sie bei einer Deckentemperatur von ca. 100 ℃ automatisch geöffnet werden. D ie vertikalen Öffnungen wurden so berücksichtigt, dass jeweils ein Tor mit einer Breite von 5 m direkt am Fußboden angebracht war. Der Rest der Öffnungen hat eine Sturzhöhe von 1 m, wurde von der Hallenmitte in der oberen Hälfte angeordnet und als von Beginn des Brandes an geöffnet angesehen. Die Höhe der Öffnung wurde entsprechend der Höhe der betrachteten Halle gestaffelt. Für das betrachtete Referenzszenario mit einer Hallenhöhe von 6 m betrug die Öffnungshöhe 2 m. Für die Umfassungsbauteile wurde angenommen, dass die Decke aus Trapezblech mit obenliegender Wärmedämmung und die Wände sowie der Fußboden aus Stahlbeton bestehen. Als Brandszenario wurde angenommen, dass auf der Brandfläche ein Brandgut mit einem bewerteten Heizwert von 3,74 kWh/m² bei einer angenommenen Abbrandgeschwindigkeit von 20 kg/m²h, einer Ausbreitungsgeschwindigkeit *v* von 1 m/min mit einer Brandmasse von 38,5 kg/m² verbrennt. Bei vollständiger Verbrennung beträgt die spezifische Wärmefreisetzung somit 74,8 kW/m².

Nach Auswertung der Ergebnisse kamen die Autoren des Forschungsberichtes zu dem Ergebnis [13, S. 67], dass die Wechselwirkung von a_h und a_v nicht so eindeutig und trivial ist, wie im Rechenverfahren nach DIN V 18230:1987-09 unterstellt wurde. Dieses Verfahren erweckte nach Meinung der Autoren zwar den Eindruck einer großen Genauigkeit, die - wie die Rechenergebnisse jedoch zeigen - nicht begründet war. Betrachtet man die in Abhängigkeit von der vertikalen und horizontalen Öffnungen aus den Berechnungen ermittelten Werte für die äquivalente Branddauer $t_{ä}$ und dem *w*-Faktor (siehe Bild 2), erkennt man, wie weit die Ergebnisse nach DIN V 18230:1987-09, insbesondere in ungünstigen Fällen, von den „tatsächlich“ zu erwartenden $t_{ä}$-Werten abweichen.

Aus den Berechnungsergebnissen leiteten die Autoren den in der nachfolgenden Tabelle 1 und Bild 6 dargestellten Normenvorschlag für den *w*-Faktor in Abhängigkeit von den horizontalen und vertikalen Öffnungen ab.

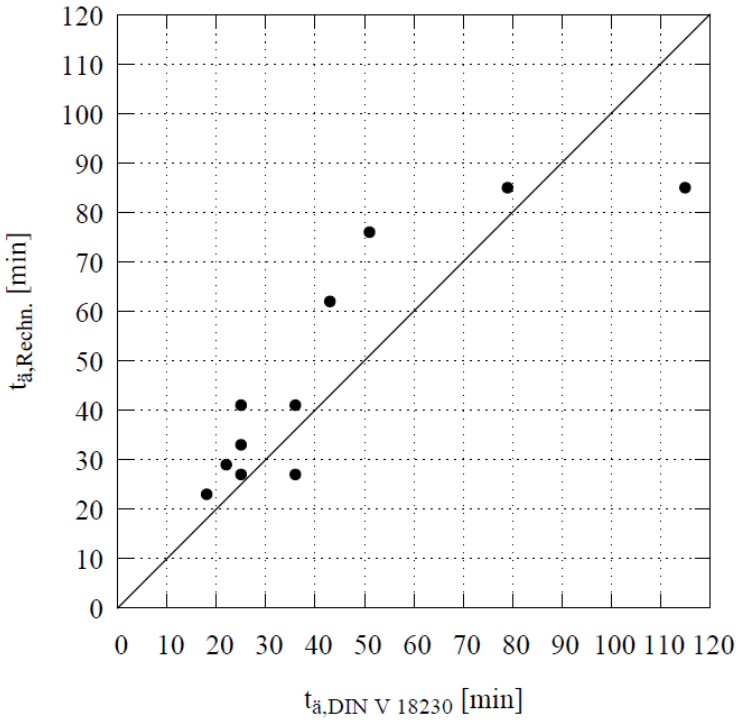


Bild 4 *Vergleich $t_ä$ - DIN V 18230 und Neuberechnung w-Faktor (nach [12])*

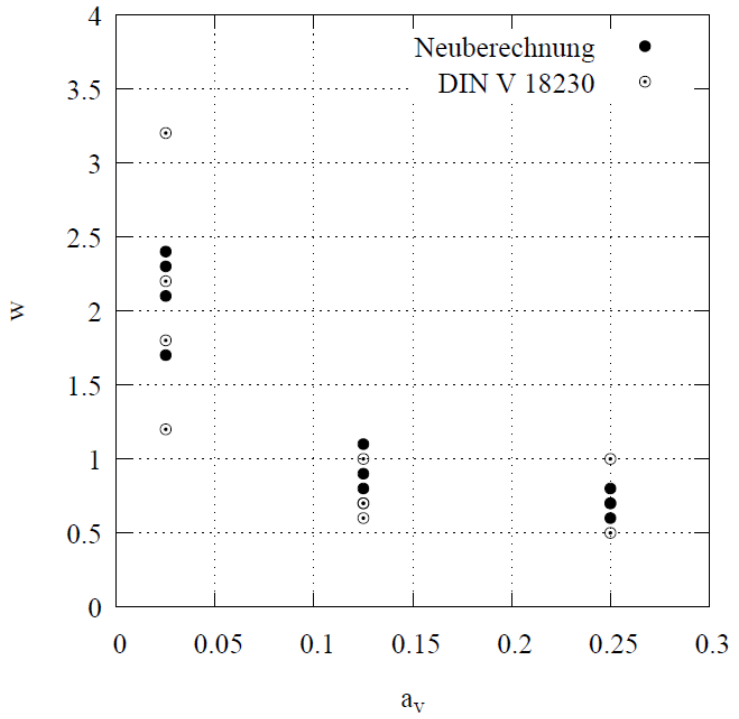


Bild 5 *Vergleich w - DIN V 18230 und Neuberechnung w-Faktor (nach [12])*

Tabelle 1 Normenvorschlag für den w-Faktor in Abhängigkeit von den horizontalen und vertikalen Öffnungen (nach [12])

A_v/A A_h/A	1,0	1,25	1,5	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	25,0
0,00		3,9		2,4	2,0	1,7	1,4	1,0	0,70
1,25		3,5		2,1	1,7	1,4	1,1	0,9	0,65
2,50		3,0		1,8	1,4	1,2	0,9	0,8	0,60
5,00		2,6		1,5	1,2	1,0	0,8	0,7	0,55
7,50		2,3		1,2	1,0	0,9	0,7	0,6	0,50

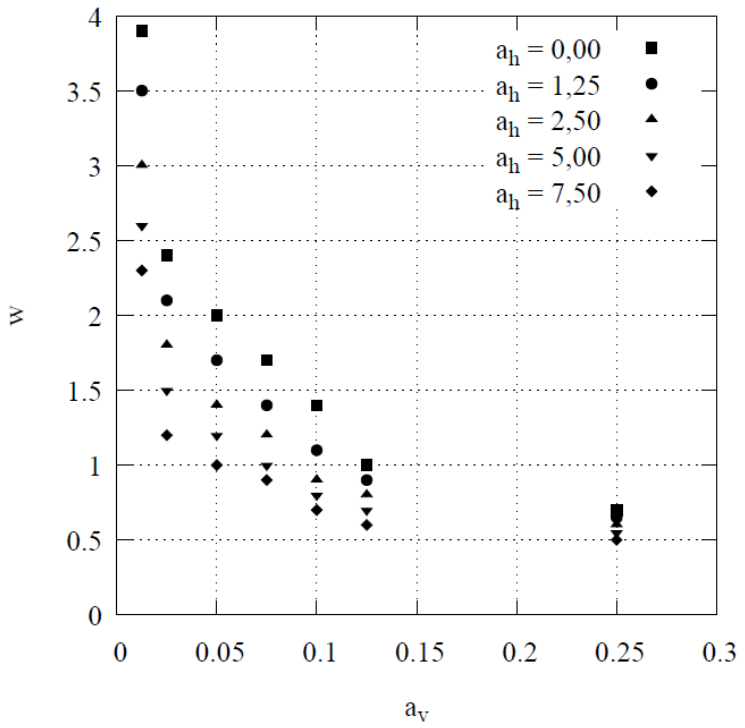


Bild 6 Normenvorschlag w-Faktor (nach [12])

Im Verlauf der Normungsarbeit der im Mai 1998 als Weißdruck veröffentlichten DIN 18230 Teil 1 erfolgte für die in Tabelle 1 aufgeführten Werte durch Approximation die Umwandlung in das heute bekannte Verfahren (siehe Bild 7).

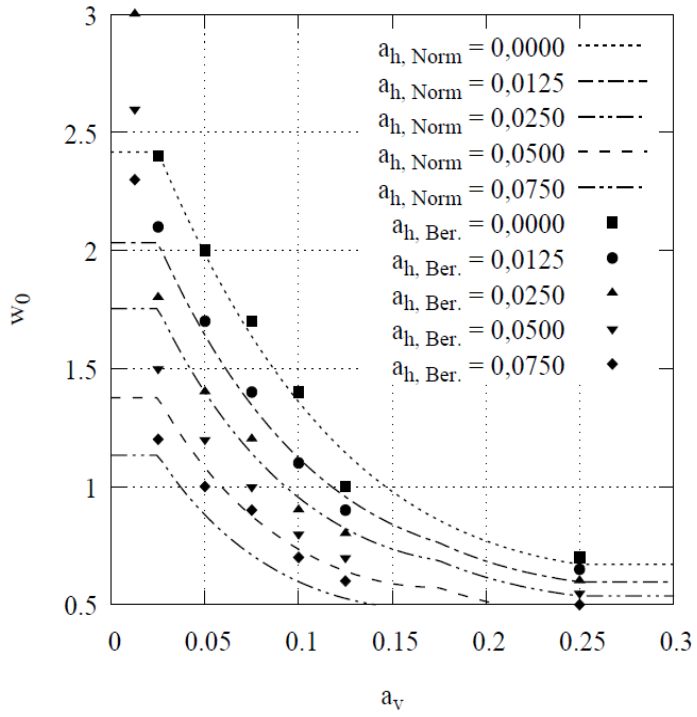


Bild 7 w-Faktor in Abhängigkeit von a_v und a_h nach [11]

Die Approximation führt zwangsläufig zu Abweichungen von den tatsächlich berechneten Ergebnissen. Dies muss bei der Interpretation von Berechnungsergebnissen von CFD-Simulationen berücksichtigt werden.

UNTERSUCHUNGEN ZUM REFERENZSZENARIO NACH DIN 18230

Mit Erscheinen des Weißdrucks im Jahr 1998 wurde bereits in DIN 18230-1 darauf hingewiesen, dass die vorliegenden Rechenformeln und Tabellen in einzelnen Fällen nicht umfassend sind, um die notwendigen Berechnungen für die Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{ä}$ oder des Wärmeabzugsfaktors *w* durchführen zu können. Die Festlegung der DIN 18230-1 orientiert sich an ein- und mehrgeschossigen Industriebauten unterhalb der Hochhausgrenze. Die Festlegungen sind in der Regel ungeeignet, u. a. zur Bemessung von sehr hohen Gebäuden, von Gebäuden mit sehr großer Lagerguthöhe, von Freianlagen oder überdachten Freilagern. Hierbei kann es einerseits zu überzogenen, andererseits zu geringen Anforderungen kommen. Insbesondere betrifft dies die Fälle mit der Berechnung lokaler Brandwirkung auf Bauteile und des Wärmeabzugs im Geschossbau.

Ziel der im Herbst 2009 auf Initiative von Herrn Professor Schneider begonnenen Normungsarbeit des Normungsgremiums NA 005-52-41 ist es, die Eingangsparameter und Rechengrößen für die Berechnung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzuges nach DIN 18230-1 auf der Basis von Brandsimulationen in einem neuen Normenteil, der DIN 18230-4, festzulegen.

Zur Klärung von einzelnen vorgesehenen konkreten Aussagen in der zu entwickelnden Norm wurde vom Hauptausschuss ein Arbeitskreis Simulation zur vertiefenden Bearbeitung der relevanten Themengebiete eingesetzt. Dieser Arbeitskreis hatte die Aufgabe, die dem Referenzszenario von DIN 18230-1 zugrunde liegenden Berechnungen mit heute in der Praxis angewandten Zonen- und Feldmodellen zu berechnen und auszuwerten (Verfahren siehe Bild 6).

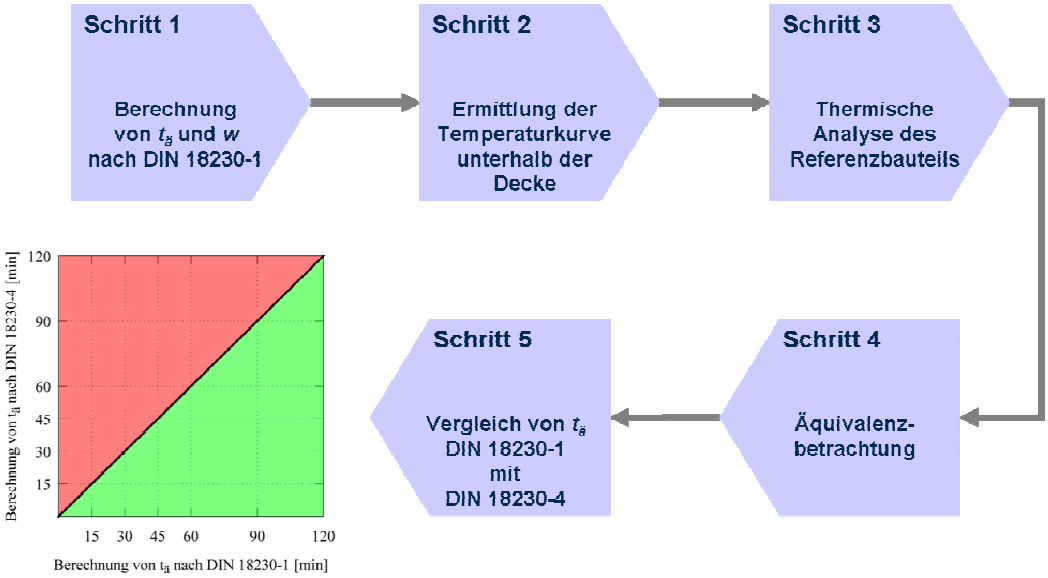


Bild 8 Fünfstufiges Untersuchungsverfahren

Im Rahmen dieser Tätigkeit wurde das zu diesem Zeitpunkt nur in Fragmenten vorliegende Referenzbrandszenario zusammengetragen und die fehlenden Randbedingungen in einem Konsensverfahren festgelegt.

Referenzbrandszenario DIN 18230-1

Das untersuchte Referenzszenario unterstellt einen Vollbrand der betrachteten Halle. Ausgehend von der Hallenmitte breitet sich der Brand in alle vier Richtungen mit einer Geschwindigkeit von 1 m/min aus. Bei der Betrachtung wird von einer gleichmäßig über die gesamte Halle verteilten spezifischen Brandbelastung von 144 kWh/m^2 ausgegangen. Die angenommene Brandbelastung ergibt sich aus einer angenommenen Mischbrandlast, die zu 20 % aus Polyurethan (PU), zu 30 % aus Polyvenylchlorid (PVC), zu 40 % aus Holz und zu 10 % aus Öl besteht. Der auch im Anhang D der DIN 18230-1 aufgeführte gewichtete Heizwert von 3,74 kWh/kg (13.468 kJ/kg) und der gewichtete Abbrandfaktor m = 0,65 basieren auf der Mittelung der in DIN 18230-1 Beiblatt 1 [9] aufgeführten Materialkennwerte. Bei der Ermittlung wurden dabei die Stoffe mit maximalen und minimalen Heizwerten und Abbrandfaktoren nicht berücksichtigt. Der Verlauf der Wärmefreisetzungskurve ergab sich in Abhängigkeit von dem verwendeten Ausbreitungsmodell unter Berücksichtigung einer angenommenen Abbrandgeschwindigkeit von 20 kg/m^2 h und einer spezifischen Brandlast von 38,5 kg/m^2.

Neben den Untersuchungen im vom Normungsgremium NA 005-52-41 eingesetzten Arbeitskreis wurden durch die Autoren für eine weitergehende Analyse der möglichen Abweichungen aus der vorgenommenen Approximation der Berechnung des Wärmeabzugsfaktors *w* (siehe Tabelle 1 und Bild 6) weitere Parameterstudien (siehe Tabelle 2) am Referenzgebäude durchgeführt.

Tabelle 2 Übersicht der bei den Berechnungen variierten Parameter

Variante	Fläche [m^2]	Höhe [m]	q_R [kWh/m^2]	m [kg/m^2 h]	A_h/A [%]	A_v/A [%]	v [m/min]
1	2.400	6	72	20	0,0	1,6	1
2			144		1,0	2,5	
3			288		5,0	7,5	
4					12,5	12,5	

Für das Referenzbauteil wurden in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen die in Tabelle 2 aufgeführten Werte für die äquivalente Branddauer - basierend auf den Temperaturen in der Heißgasschicht und den daraus resultierenden Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil - ermittelt.

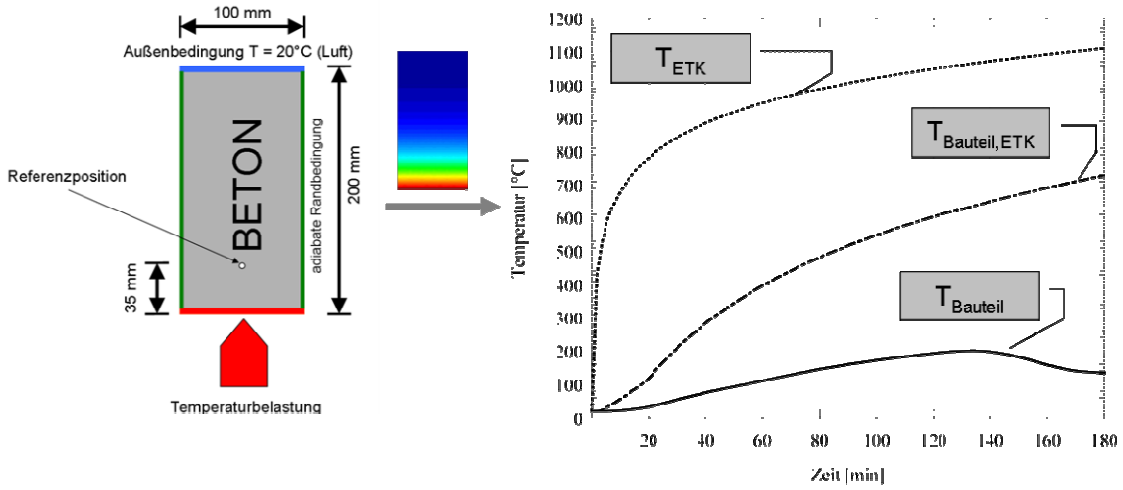


Bild 9 Thermische Analyse des Referenzbauteils

Die Ergebnisse [14] zeigen, dass für das Referenzszenario die Ergebnisse von Berechnungen mit Zonenmodellen und CFD-Programmen die Ergebnisse nach dem vereinfachten Näherungsverfahren nach DIN 18230-1 unter Berücksichtigung der vorgenommenen Approximation im w-Faktor-Diagramm reproduziert werden konnten.

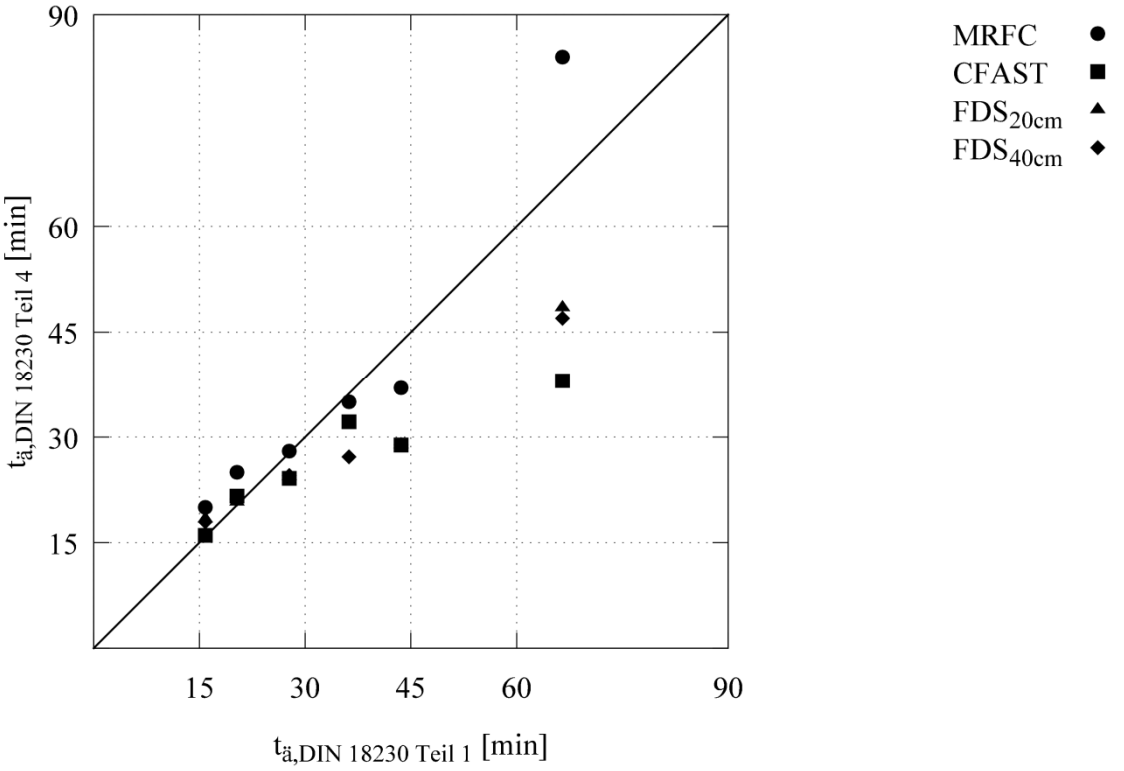


Bild 10 Vergleich $t_ä$, DIN 18230-1 und $t_{ä,Simulation}$ bei q_R = 144 kWh/m²

Bei der Variation der spezifischen Brandbelastung zeigt sich, dass die Ergebnisse des Näherungsverfahrens bei geringer spezifischer Brandbelastung in einem bestimmten Bereich zu höheren Werten der äquivalenten Branddauer führen (siehe Bild 11). Bei einer größeren spezifischen Brandbelastung liegen die Ergebnisse der Zonenmodelle und CFD-Simulationen dagegen unterhalb der Ergebnisse des Näherungsverfahrens nach DIN 18230-1 (siehe Bild 12).

Ein Vergleich der berechneten bzw. nach DIN 18230-1 ermittelten Wärmeabzugsfaktoren zeigt, dass einzelne Berechnungen mit Zonenmodellen zu w-Faktoren außerhalb des Wertebereiches nach DIN 18230-1 führen (siehe Bild 13).

Die Auswertungen mit den heute in der Praxis vorhandenen und eingesetzten Zonen- und Feldmodellen zeigen, dass weiterer Untersuchungsbedarf für eine abschließende Einordnung der erzielten Ergebnisse besteht. Bereits jetzt ist festzuhalten, dass das an einer Referenzgeometrie entwickelte Näherungsverfahren bei anderen Raum- und Gebäudegeometrien zu abweichenden Ergebnissen führen kann. Der Umgang mit diesen Erkenntnissen in der täglichen Praxis ist noch nicht abschließend geklärt und bedarf der Abstimmung in den zuständigen Fachkreisen.

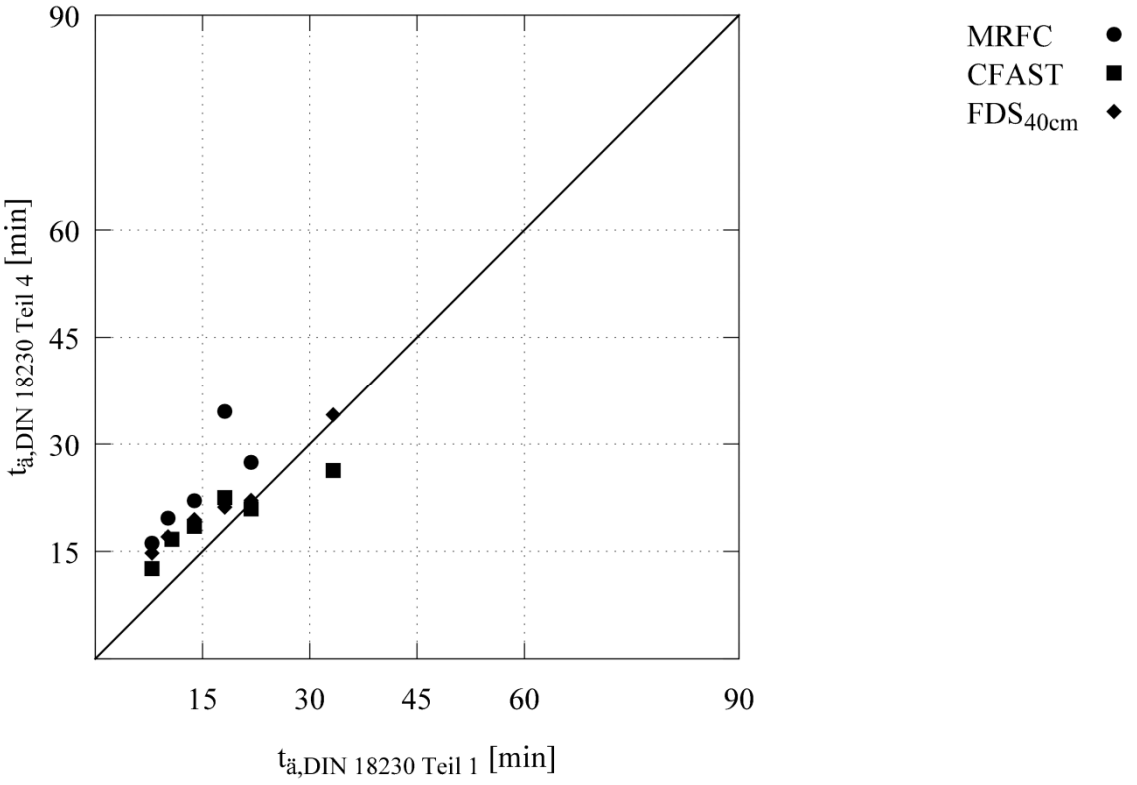


Bild 11 Vergleich $t_{ä,\ DIN\ 18230\text{-}1}$ und $t_{ä,Simulation}$ bei q_R = 72 kWh/m²

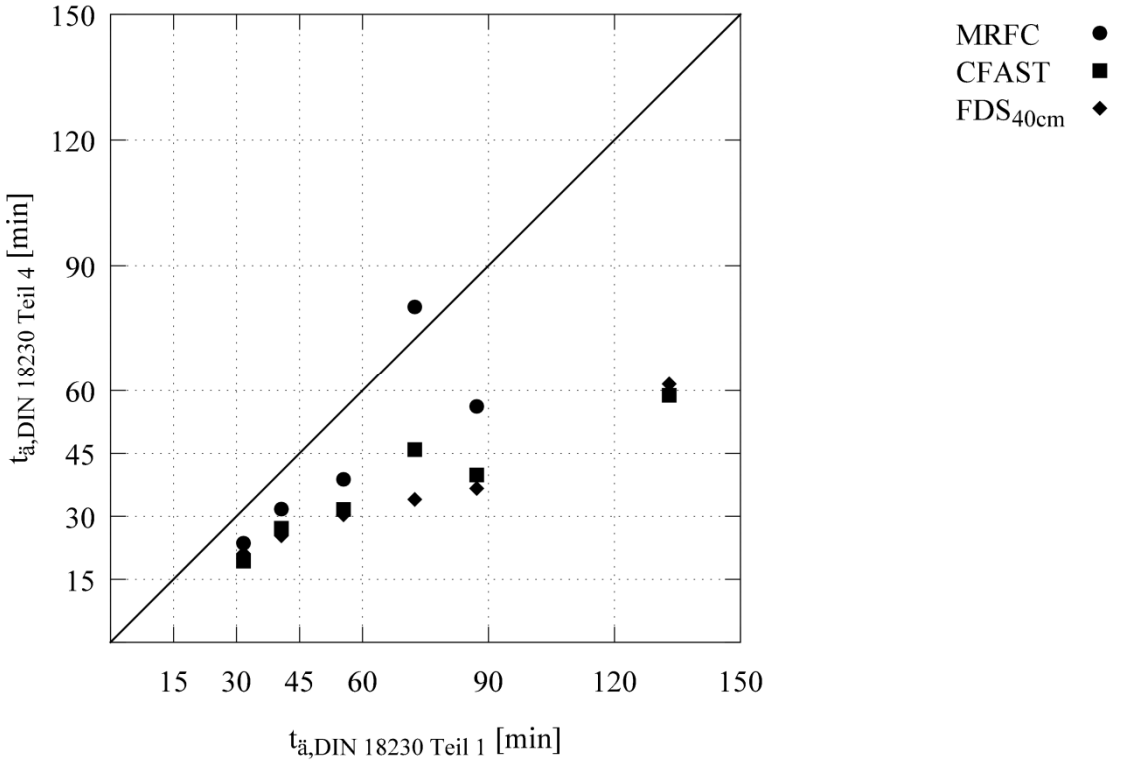


Bild 12 Vergleich $t_{ä,\ DIN\ 18230\text{-}1}$ und $t_{ä,Simulation}$ bei q_R = 288 kWh/m²

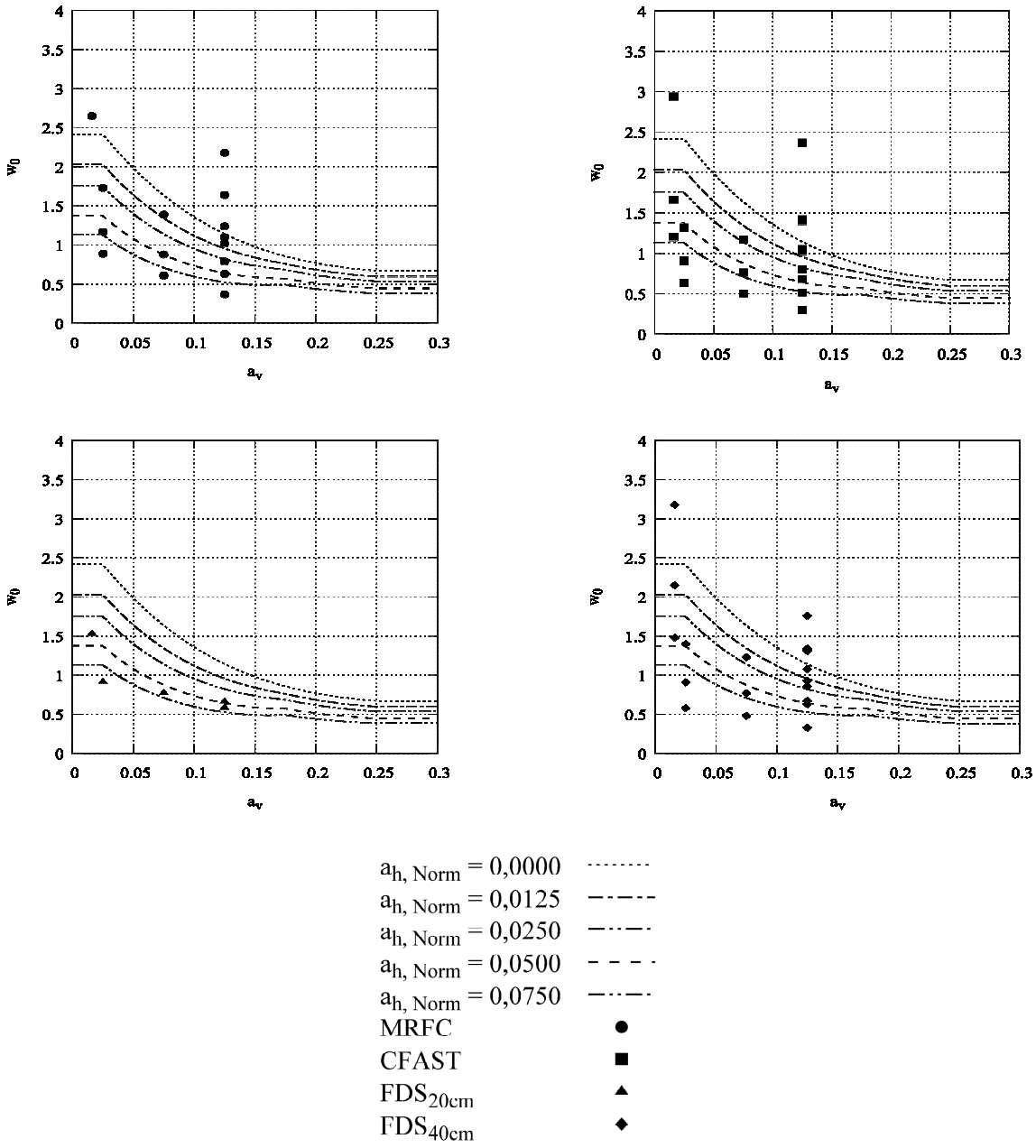


Bild 13 Vergleich w-Faktoren nach DIN 18230-1 und Simulation

BEMESSUNGSVERFAHREN NACH EUROCODES

Brandschutztechnische Bauteilnachweise wurden bisher auf Grundlage der DIN 4102-4 geführt. Dieses Nachweisverfahren stößt in seiner Anwendung schnell an seine Grenzen, da das Verfahren ausschließlich auf genormten Versuchen im Brandraum unter Berücksichtigung der Einheitstemperaturkurve beruht.

Bei den im Zuge der Europäisierung entwickelten Eurocodes sind die Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung, soweit sie abgesichert und konsensfähig sind, in die europäische Normung eingegangen. Der Nachweisführung nach Eurocode liegt ein dreistufiges Bemessungsverfahren zugrunde (siehe Bild 14):

- Ebene 1: Klassifizierung von Bauteilen mit Hilfe von Tabellen
- Ebene 2: Nachweis mit vereinfachten Berechnungsverfahren
- Ebene 3: Nachweis mit allgemeinen Berechnungsverfahren

Die Eurocodes sehen dabei hinsichtlich der Nachweisführung der Ebene 3 zwei wesentliche Schritte vor:

- Schritt 1: Thermische Analyse
- Schritt 2: Mechanische Analyse

Das Verfahren nach Eurocode stellt im Vergleich zum Nachweisverfahren nach DIN 18230-1 ein iteratives Verfahren dar, das Kenntnisse über die thermischen und mechanischen Einwirkungen, das thermische und mechanische Verhalten von Baustoffen und die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der eingesetzten Werkzeuge (z. B. Brandsimulationsprogramme) erfordert.

Mit Erscheinen des Weißdrucks der Normenreihe im Dezember 2012 wurde das in Anhang F von DIN EN 1991-1-2 aufgeführte Verfahren zur Berechnung der äquivalenten Branddauer gemäß nationalem Anhang von der Anwendung ausgeschlossen. Die noch im Entwurf des nationalen Anhangs enthaltenen Brandlastdichten für Industriebauten wurden ersatzlos gestrichen. Für Anwendungen im Industriebau wird auf das Verfahren nach DIN 18230-1 verwiesen. Das im Anhang AA beschriebene vereinfachte Naturbrandmodell gilt für Brände in Räumen bis zu 400 m^2 Grundfläche und bis zu einer Höhe von 5 m. Die Fläche der Ventilationsöffnungen muss hierbei zwischen 12,5 % und 50 % und die Brandlastdichte zwischen 100 MJ/m^2 bis 1.300 MJ/m^2 liegen. Bei größeren und/oder höheren Räumen wird die thermische Einwirkung zunehmend auf der sicheren Seite liegend angenommen.

Die im nationalen Anhang BB beschriebenen Eingangsdaten für die Beschreibung der Brandeinwirkungen bei natürlichen Bränden gelten grundsätzlich für alle vereinfachten und allgemeinen Brandmodelle nach DIN EN 1991-1-2, 3.3 und den Anhängen D und AA im nationalen Anhang.

Während die Verfahren des Eurocode von rein thermischen Nachweisen auf der Temperaturebene bis zu thermisch-mechanischen Nachweisen auf der Zeit- und Tragfähigkeitsebene reichen, endet die Betrachtung nach DIN 18230 bei einem thermischen Nachweis mittels einer Äquivalenzbetrachtung anhand eines definierten Referenzbauteils. In beiden Verfahren ist im Unterschied zu DIN 4102-4 für die Bemessung neben der bekannten Einheits-Temperaturzeit-

kurve auch die Verwendung von Naturbrandkurven, wenn derzeit auch nur als Vollbrandmodell, zugelassen.

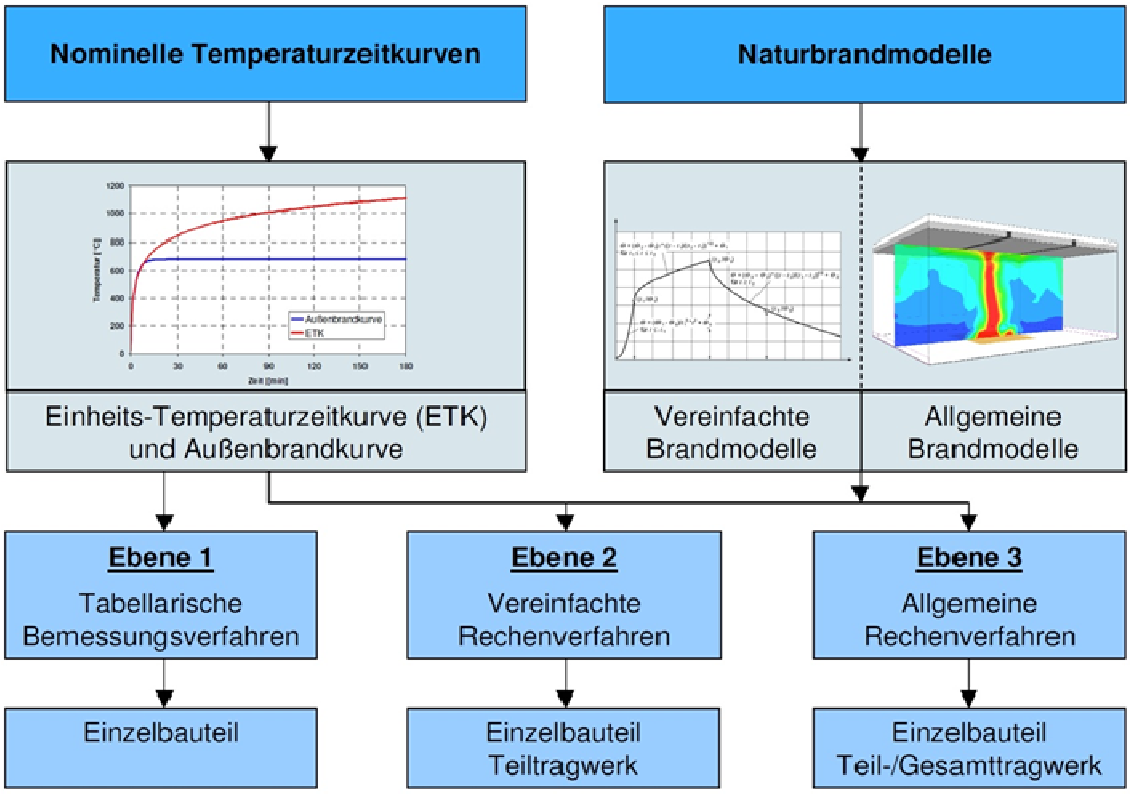


Bild 14 Bemessungsverfahren nach Eurocode

Das Verfahren nach DIN 18230-1 berücksichtigt die thermische Einwirkung auf Bauteile in Abhängigkeit von einer objekt- und nutzungsspezifischen Brandlast. Auch wenn eine detaillierte mechanische Analyse im Rahmen der Anwendung der DIN 18230 nicht vorgenommen wird, wird bereits im Vorwort der Norm darauf hingewiesen, dass auch bei Anwendung der DIN 18230 konstruktive Betrachtungen (kinematische Kette und thermische Zwängungen) berücksichtigt werden müssen:

„*Diese Norm enthält keine Anforderungen für die brandschutztechnisch wirksame Ausbildung der Gesamtkonstruktion. Hierfür sind in der Regel zusätzliche Maßnahmen erforderlich (z. B. Berücksichtigung der Verformungen und Dehnungen beim Brand, Wahl geeigneter statischer Systeme, Schaffung voneinander statisch unabhängiger Teilbereiche und Sollbruchstellen).*“ [14]

Unter Beachtung dieses Grundsatzes im Vorwort der DIN 18230-1 ist also auch dem Verfahren nach dieser Norm zumindest eine grundsätzliche mechanische Analyse für den Brandfall anzufügen. Diese hat im Rahmen der Tragwerksplanung zu erfolgen.

Untersuchungen zum Referenzgebäude nach DIN 18230

Nach Einführung der Eurocodes im Juli 2012 als Technische Baubestimmungen gilt es nun in weiterer Folge, die Lücke zwischen DIN 18230 und den Verfahren nach den Eurocodes für die Bemessung von Tragwerken von Industriebauten zu schließen. Hierzu wurden am Beispiel des Referenzgebäudes nach DIN 18230-1 die Verfahren nach DIN 18230, unter Einwirkung der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK), und nach DIN EN 1991-1-2 in Verbindung mit DIN EN 1993-1-2 am Beispiel eines ungeschützten 2-Feld-Rahmens in Stahlbauweise näher untersucht [15] (siehe Bild 15).

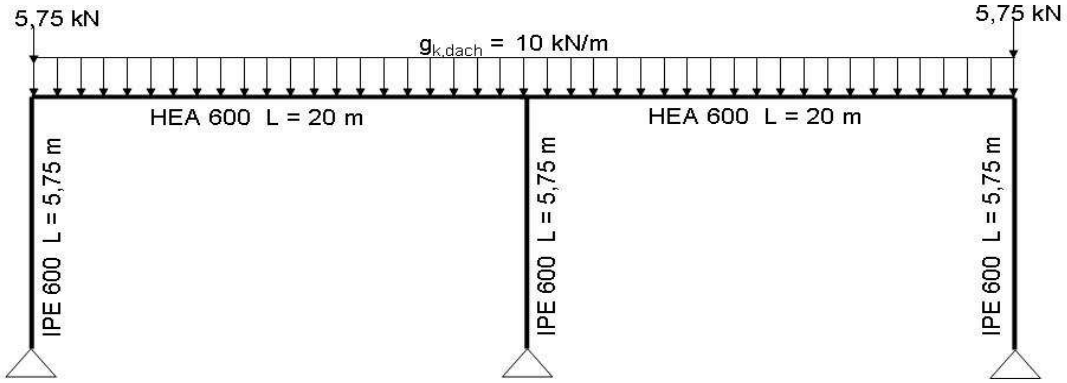


Bild 15 Statisches System

Aufgrund fehlender Werte für die flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate RHR_f für die stationäre Phase bei Industriebauten wurden für das Verfahren nach DIN EN 1991-1-2 in Verbindung mit DIN EN 1993-1-2 nachfolgend aufgeführte Werte untersucht:

- $q_{f,d}$ = 0,075 MW/m2
- $q_{f,d}$ = 0,100 MW/m2
- $q_{f,d}$ = 0,150 MW/m2

Die aus den Wärmefreisetzungskurven (Bild 16) resultierenden Temperaturverläufe (Bild 17) inklusive der Einwirkung unter der Einheitstemperaturzeitkurve ergeben die in Tabelle 3 aufgeführte erforderliche Feuerwiderstandsdauer.

Die Auswertung der Berechnungen für einen ungeschützten 2-Feld-Rahmen in Stahlbauweise zeigt, dass in Abhängigkeit (siehe Tabelle 3 und Bild 18) von der Brandbelastung und den Ventilationsbedingungen kein Systemversagen zu erwarten ist und somit keine Anforderungen an die Feuerwiderstandsklassifizierung im Brandfall an das Tragwerk zu stellen sind.

Tabelle 3 Erforderliche Feuerwiderstandsklassifizierung nach DIN 4102/EN 13501

	Bemessung				
	nach	nach Eurocode			
	DIN 18230	ETK	180 MW	240 MW	360 MW
Systemversagen/ $t_{ä}$	43,60 min	20 min	> 90 min	61 min	16 min
Tragfähigkeit	F 60	F 0	R 90	R 60	R 0

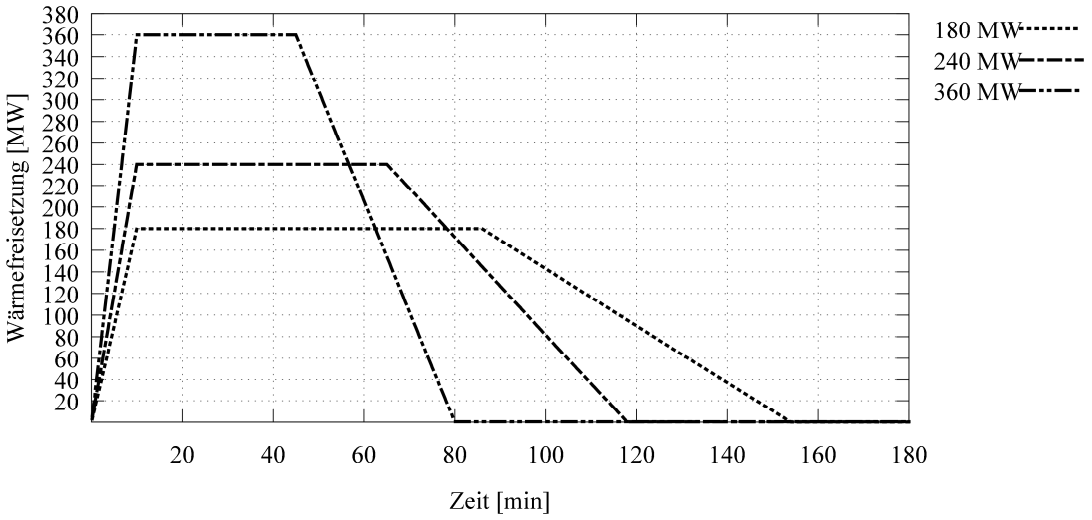


Bild 16 Wärmefreisetzungskurven

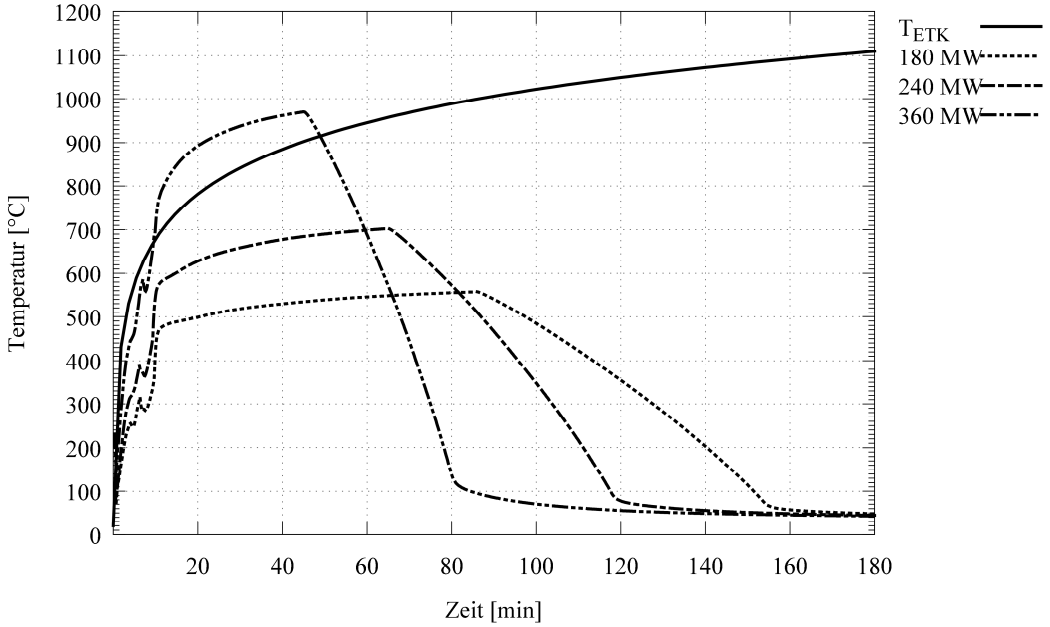


Bild 17 Temperaturzeitkurven

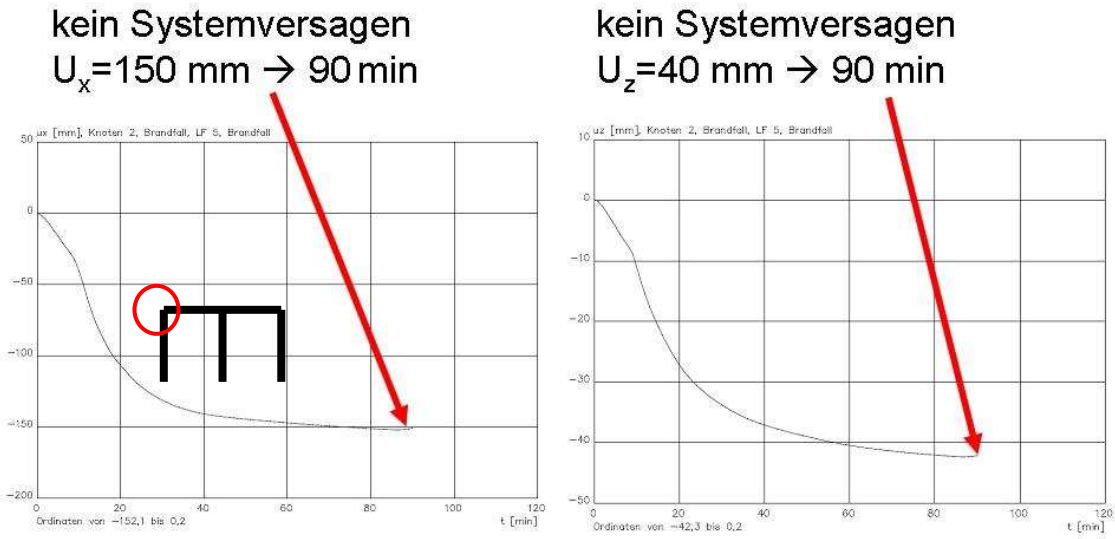


Bild 18 Tragwerksbemessung im Knoten 2 bei Q_{EC} = 180 MW

ZUSAMMENFASSUNG/AUSBLICK

Ingenieurmethoden des Brandschutzes sollen heute dabei helfen, moderne und anspruchsvolle Architekturvisionen unter Einsatz von modernen Baustoffen Wirklichkeit werden zu lassen. Architekten, Fachplaner und die beteiligten Genehmigungsbehörden stehen vor der Herausforderung das Gebäude im Sinne der jeweiligen Landesbauordnung zu planen, zu bewerten und zu genehmigen.

Zu den erforderlichen Unterlagen (Bauvorlagen) eines Bauantrages für Sonderbauten gehört in Abhängigkeit der Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung ein Brandschutzkonzept. Die Anzahl der Brandschutzkonzepte, bei denen der Nachweis durch Einsatz/Anwendung von Ingenieurmethoden des Brandschutzes geführt wurde, nahm in den vergangenen Jahren stetig zu. Im Gegensatz zu der freien verbalen Argumentation über die Gleichwertigkeit der Kompensationsmaßnahmen erfolgt der Nachweis mit Ingenieurmethoden anhand von quantitativen Kriterien. Eine Herausforderung stellt hierbei noch immer die Konkretisierung der Schutzziele dar. Die Anwendung numerischer Simulationen als Bestandteil eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes hat sich in den letzten Jahren national, aber auch international bewährt und kann ein wichtiges Hilfsmittel sein, um den Nachweis des baurechtlich zugrundeliegenden Schutzzielniveaus zu gewährleisten.

Die wesentlichen Herausforderungen für die kommenden Jahre sind:

Nachdem in den vergangenen Jahren die Erstellung von Brandschutzkonzepten weitestgehend beherrscht wird und sich die Prüfung nach einheitlichen Kriterien (z. B. vfdb-Richtlinie 01/01) etabliert hat, bedarf es einer Verankerung der bereits in der Praxis zur Verfügung stehenden und angewendeten Werkzeuge, insbesondere der Simulationsmodelle und Programme. In Abhängigkeit ihrer

Stärken und Schwächen sind die Einsatzgebiete der einzelnen Modelle bzw. Programme festzulegen. Dies bedeutet nicht, dass einzelne Programme normativ für bestimmte Anwendungsbereiche ausgeschlossen werden, sondern die Auswahl und Anwendung soll im Zuge der Bearbeitung geprüft und begründet werden. Darüber hinaus ist ein Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr zu etablieren, das die Stärken und Schwächen bei der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigt.

Je konkreter Aussagen bei der Festschreibung im Rahmen von Normen und Richtlinien getroffen werden, umso umfangreicher muss das behandelte Themengebiet betrachtet werden und untersucht sein. Hierbei gilt es für jedes Gremium, bei der Erarbeitung nicht nur den eigenen Auftrag abzuarbeiten, sondern durch regelmäßigen Austausch mit anderen Fachgremien über den Tellerrand hinaus zu schauen und ein trag- und zukunftsfähiges Werkzeug gemeinsam zu entwickeln.

Eine Schlüsselaufgabe für alle Fachgremien wird die Definition des „Lastfalls Brand“ in Form von normativ definierten Bemessungsbränden bzw. normativ geregelten Verfahren zur Festlegung von Bemessungsbränden sein.

LITERATUR

[1] Pearson, J.: Arena, The Story of the Colosseum. London, 1972

[2] Hahn, C.: *DIN 4102-4 - Ergänzende Regelungen zu Brandschutzteilen der Eurocodes*. in: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage, 27. und 28.09.2011 in Braunschweig. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 214, S. 149 - 164

[3] Vornorm DIN V 18230-1:1987-09: *Baulicher Brandschutz im Industriebau - Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer*

[4] Europäische Gemeinschaft: *Grundlagendokument, Wesentliche Anforderungen Nr. 2 „Brandschutz“*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. C 62/23 vom 23.02.1994

[5] vfdb TWB (Hrsg.): vfdb-Richtlinie 01/01 - Brandschutzkonzept, 2000-05

[6] Industriebaurichtlinie: *Bauaufsichtliche Behandlung von Industriebauten mit Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau - Industriebaurichtlinie (IndBauR)* - hier: Fassung gem. Runderlass des Ministers für Stadtentwicklung, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen vom 23.10.1989, MBl. NRW Nr. 74 vom 05.12.1989

[7] vfdb TWB (Hrsg.): vfdb-Richtlinie 01/01 - Brandschutzkonzept, 2008-04

[8] Spangardt, G.: vfdb-Richtlinie 01/01 Brandschutzkonzept, Ausgabe April 2008. in: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage, 30.09. und 01.10.2008 in Braunschweig. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 202, S. 123 - 134

[9] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Technischer Bericht vfdb TB 04/01, 2. Auflage Mai 2009. Altenberge, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), 2006

[10] Münch, M.: Konzept zur Absicherung von CFD-Simulationen im Brandschutz und in der Gefahrenabwehr, INURI GmbH, Berlin, 2013

[11] Norm DIN 18230-1:2010-09: Baulicher Brandschutz im Industriebau - Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer

[12] Arbeitsgemeinschaft Brandsicherheit: Neuberechnung der Wärmeabzugsfaktoren w für DIN V 18230-1, Baulicher Brandschutz im Industriebau. Bruchsal, Wien, 1990

[13] Spennes, Jäger, Plum, Stock: Untersuchungen zum Referenzszenario von DIN 18230. Gesellschaft für Sachverständigenwesen BFT Cognos GmbH, Aachen, 2013

[14] Norm DIN 18230-1:2010-09: Baulicher Brandschutz im Industriebau - Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer

[15] Spennes, Flesch, Plum, Jäger: Eurocodes und DIN 18230 - Ein Vergleich. Gesellschaft für Sachverständigenwesen BFT Cognos GmbH, Aachen, 2013

SONDERBAU – CHANCEN UND RISIKEN AUS DER SICHT EINES VERKEHRSINFRASTRUKTURBETREIBERS

Marc Willich
DB Station&Service AG, Berlin

EINLEITUNG

In Anlehnung an die Musterbauordnung (MBO) sind Personenbahnhöfe und Haltepunkte ungeregelte Sonderbauten. Außer für Empfangsgebäude lassen sich materielle Anforderungen von Landesbauordnungen oder Sonderbauverordnungen grundsätzlich nicht unmittelbar übertragen. Es bedarf einer fachkundigen, schutzzielorientierten Bewertung durch einen Sachverständigen für Brandschutz.

Die Arbeit dieser Sachverständigen ist in der Regel von der individuellen Bewertung einzelner Objekte geprägt. Für das zu bewertende Objekt wird nach den in dem jeweiligen Büro über Jahre erarbeiteten Standards der Nachweis der Sicherheit in Form eines Brandschutzkonzeptes geführt.

Auch die DB Station&Service AG, als Betreiber von Personenbahnhöfen, beauftragt grundsätzlich die Erstellung einzelfallbezogener Sicherheitsnachweise. Diese stehen aber im Kontext eines großen Anlagenportfolios mit einer Vielzahl von mehr oder weniger vergleichbaren Objekten. Die jeweilige Einzelfallbewertung bzw. die für das jeweilige Objekt festgelegten Maßnahmen können somit immer auch als Präjudiz für folgende Bewertungen anderer Objekte im Portfolio wirken. Einheitliche eigene Standards auf einem angemessenen Niveau sind somit nicht nur geboten, sondern eine zwingende Notwendigkeit für einen langfristig wirtschaftlichen Betrieb des Gesamtportfolios.

Bei aller Ähnlichkeit der Nutzungen der Objekte kann es doch erhebliche Unterschiede in Größe, Nutzungsintensität, Personenfrequenz und anderen für die Bewertung relevanten Aspekten geben, was die Standardisierung zu einer Herausforderung werden lässt.

Der folgende Beitrag versucht, dieses Spannungsfeld für das Anlagenportfolio und die Geschäftstätigkeit der DB Station&Service AG zu erläutern. Es wird anhand ausgewählter Beispiele aufgezeigt, welche Standards für unterschiedliche Anlagengruppen in den letzten Jahren entwickelt werden konnten und wie die Arbeit des Brandschutzsachverständigen für das Heben der Chancen und das Vermeiden der Risiken bei der Bewertung des Sonderbaus „Bahnhof“ verantwortlich ist.

DB STATION&SERVICE AG – BETREIBER VON PERSONENVERKEHRS-ANLAGEN DER EISENBAHNEN DES BUNDES

DB Station&Service AG

Die DB Station&Service AG ist Teil des Vorstandsressorts Infrastruktur der Deutsche Bahn AG. Kernaufgabe ist der Betrieb von aktuell rund 5.400 aktiven Bahnhöfen und Haltepunkten mit rd. 1.600 Empfangsgebäuden. Die DB Station&Service AG hat rd. 4.550 Mitarbeiter, davon rd. 3000 im Kundenservice, die sich auf sieben Regionalbereiche und eine Zentrale aufteilen und erzielt derzeit einen Umsatz von rd. 1.1 Mrd. Euro pro Jahr.

Haupteinnahmequelle der DB Station&Service AG sind Gebühren für Halte von Zügen an den Verkehrsstationen. Durch die strenge Regulierung der so genannten Stationspreise durch die Bundesnetzagentur wird es immer schwerer, steigende Kosten zum Beispiel für Energie und Personal auszugleichen. Hier kommt der zweiten großen Einnahmequelle, der Vermietung von Gewerbeflächen in Empfangsgebäuden, Zugangsbauwerken und auf den Bahnsteigen eine immer größere Bedeutung zu. Durch die Vermietung wird aber auch die Attraktivität der Bahnhöfe für den Kunden gesteigert. In vielen Bahnhöfen lässt sich inzwischen eine intensive, multifunktionale Nutzung finden.

Ein herausragendes Beispiel für dieses Geschäftsmodell ist der Berliner Hauptbahnhof, der nicht nur der größte Kreuzungsbahnhof Europas ist, sondern auch mit seinen gut 80 Läden und Geschäftseinheiten Reisenden und auch zahlreichen Besuchern als „Shopping Mall“ dient (Bild 1 und Bild 2).

Bild 1 Berliner Hauptbahnhof, Außenansicht [Foto: Marc Willich]

Bild 2 Berliner Hbf, Innenansicht [Foto: Marc Willich]

An dieser Stelle sei aber auch erwähnt, dass es eine Vielzahl von Empfangsgebäuden gibt, deren wirtschaftliche Vermarktung nicht möglich ist und die entweder leer stehen oder zum Kauf angeboten werden. Die Bandbreite des Portfolios der DB Station&Service AG reicht von artreinen Verkehrsstationen mit zum Teil deutlich unter 50 Reisenden am Tag (Bild 3) bis hin zu multifunktionalen Großbahnhöfen mit weit über 400.000 Reisenden und Besucher am Tag.

Bild 3 Bahnhof Liebenau (Hessen), Verkehrsstation mit verkauftem Empfangsgebäude [Foto: Marc Willich]

Der Bahnhof - Ungeregelter Sonderbau

Die Bauordnungen und Sonderbauverordnungen der Länder gelten grundsätzlich nicht direkt für Bahnhöfe und Haltepunkte, wenngleich sich die Maßnahmen in den Empfangsgebäuden in der Regel hieraus ableiten lassen (§ 1 (2) MBO).

Für „Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes“ existiert ein eigenes umfängliches Regelwerk, welches auf allgemein gültige, anerkannte Regeln der Technik (a.R.d.T.) referenziert. Die Basis bilden das Allgemeine Eisenbahngesetz (AEG) sowie die Eisenbahn Bau- und Betriebsordnung (EBO). Das Eisenbahn-Bundesamt schafft als zuständige Aufsichtsbehörde über Verwaltungsvorschriften, Leitfäden oder die eisenbahnspezifische Liste technischer Baubestimmungen einen Regelungsrahmen. Dieser wird durch das eigene Regelwerk der Deutschen Bahn, zum Beispiel durch die Richtlinien (Ril) 123 „Notfallmanagement, Brandschutz“ und 813 „Personenbahnhöfe Planen“, sowie ergänzende fachliche Weisungen, technische Mitteilungen, Planungsvorgaben, Leitfäden und Prozesse weiter detailliert und konkretisiert. Sind Bahnhöfe oder Haltepunkte betroffen, die an Strecken der „Transeuropäischen Netze (TEN)“ liegen, sind darüber hinaus diverse „Technische Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI)“ zu berücksichtigen.

Um sich als Sachverständiger für Brandschutz auf diesem Terrain sicher zu bewegen, bedarf es einiger Einarbeitungszeit und Erfahrung. Grundvoraussetzung für die Erstellung von Brandschutzkonzepten für die DB Station&Service AG ist deshalb eine durch die TÜV CERT durchgeführte Zertifizierungsprüfung, die alle drei Jahre zu wiederholen ist. Darüber hinaus wird jedes Brandschutzkonzept durch so genannte „Fachspezialisten Brandschutz“ qualitätssichernd überprüft und bei Bedarf mit dem Ersteller besprochen, bevor dieses an die Aufsichtsbehörden weitergegeben wird. Die Fachspezialisten (mind. einer je Regionalbereich) fungieren bei Bedarf auch als „Lotsen“ für den Sachverständigen, um eine einheitliche Verwendung der aktuellsten Regelwerke und eine reibungslose Orientierung in den komplexen Strukturen der Deutschen Bahn AG zu unterstützen.

DAS BRANDSCHUTZTECHNISCHE MODERNISIERUNGSPROGRAMM DER DB STATION&SERVICE AG

Allgemeines

Der vorbeugende Brandschutz ist integraler Bestandteil des Sicherheitskonzeptes der DB Station&Service AG, die seit Ende 2006 ein Programm zur brandschutztechnischen Modernisierung ihres gesamten Anlagenportfolios durchführt. Gemeinsames Ziel mit dem Eisenbahn-Bundesamt ist es, die zum Teil weit über 100 Jahre alten Anlagen fit zu machen für die Zukunft und dabei – soweit sinnvoll möglich und notwendig – die aktuellsten Sicherheitsstandards umzusetzen. Das mit einem Gesamtwertumfang von über 500 Mio. Euro ausgestattete Programm ist inzwischen zu 70 % umgesetzt. Jährlich werden für die

Brandschutzmodernisierung rund 40 bis 60 Mio. Euro bereitgestellt. An bis zu 600 Bahnhöfen wird derzeit parallel gebaut. Die Maßnahmen decken das gesamte Spektrum des baulichen und anlagentechnischen Brandschutzes ab.

Eine besondere Herausforderung stellt die Modernisierung der rd. 50 unterirdischen Personenverkehrsanlagen der S-Bahn-Systeme der Deutschen Bahn AG in München, Stuttgart, Frankfurt, Offenbach, Köln, Dortmund und Hamburg dar. Ihre Innenstadtlage, die hohe Personenfrequenz und die enge Zugtaktung aber auch die enorme Wichtigkeit für den öffentlichen Personenverkehr der jeweiligen Großstadt führen für die Planung, Genehmigung und Umsetzung von Maßnahmen zu erheblichen Aufwänden.

Oberirdische Personenverkehrsanlagen (oPVA)

Unter dem Begriff „oPVA“ werden kleinste Haltepunkte an Nebenstrecken (zum Teil Bedarfshalte mit weniger als 10 Reisenden am Tag) bis hin zu Hauptbahnhöfen in Metropolen wie zum Beispiel Berlin, München, Frankfurt, Köln und Hamburg subsummiert. Trotz dieser großen Variationsbreite hat die DB Station&Service AG eine einheitliche inhaltliche Struktur für alle Brandschutzkonzepte festgelegt. Kapitel und Abschnitte, die für die zu bewertende Personenverkehrsanlage nicht relevant sind, sind trotzdem in der Struktur des Brandschutzkonzeptes aufzuführen und erforderlichenfalls als nicht relevant zu kennzeichnen. Hierdurch werden zwar zum Teil inhaltsleere Kapitel erzeugt. Dieses Vorgehen hat jedoch den Vorteil, dass bestimmte Inhalte immer an der gleichen Stelle in einem Brandschutzkonzept behandelt werden. Prüfung sowie Umsetzung des jeweiligen Brandschutzkonzeptes durch die Fachplaner werden so erheblich erleichtert.

Die DB Station&Service AG war bis vor kurzem verpflichtet, für alle Personenverkehrsanlagen Brandschutzkonzepte vorzuhalten. Dies galt auch für kleinste Haltepunkte ohne Empfangsgebäude (Bild 4).

Mit Einführung des aktualisierten Leitfadens für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen des Bundes [6] Anfang 2011 durch das Eisenbahn-Bundesamt wurde es für den Anlagenbetreiber möglich, Kriterien für Anlagen zu definieren, bei deren Einhaltung ein Brandschutzkonzept obsolet wird. Diese Kriterien sind inzwischen in die Ril 123.0105 A02 aufgenommen, so dass für eine Vielzahl von oPVA außerhalb von Hallen und ohne Empfangsgebäude auf die Vorhalung eines Brandschutzkonzeptes verzichtet werden kann.

Für alle anderen Personenverkehrsanlagen werden auch weiterhin Brandschutzkonzepte benötigt. Diese bilden die Basis für das Brandschutzmodernisierungsprogramm der DB Station&Service AG. Zu Beginn des Programms wurde besonderer Wert auf die Einhaltung einheitlicher Standards bei der Brandschutzkonzepterstellung gelegt. Neben Richtlinien, Leitfäden sowie ergänzenden technischen Unterlagen und Arbeitshilfen, ist die qualitätssichernde Prüfung der Brandschutzkonzepte durch die „Fachspezialisten Brandschutz“ ein wichtiger Baustein.

Bild 4 Verkehrsstation ohne Empfangsgebäude [Foto: Holger Buch]

Bei der Erstellung von Brandschutzkonzepten für oPVA sind einige Besonderheiten zu beachten. Während es zum Beispiel in Empfangsgebäuden oder bei Bahnsteigen in so genannten Gleishallen grundsätzlich Rettungswege gibt, ist dies bei Personenverkehrsanlagen außerhalb von Hallen und deren Zuwegungen ausdrücklich nicht so. Das ausreichende Vorhandensein von so genannten „Rettungswegmöglichkeiten“ wird durch eine risikoanalytische Bewertung nachgewiesen, welche von der IVE mbH Hannover entwickelt wurde. Für welche Fälle es in einer Personenunterführung, überdachten Treppenanlagen oder eingehausten Personenüberführungen eine Sicherheitsbeleuchtung geben muss, ist in der Ril 813.05 „Personenbahnhöfe planen – Beleuchtungsanlagen“, festgelegt. Auf Bahnsteigen außerhalb von Hallen ist diese nicht erforderlich.

Auch häufig im Bestand vorkommende Holz-Bahnsteigdächer, die zum Teil unter Denkmalschutz stehen, sind grundsätzlich zulässig. Hier eine „nicht brennbare“ Ausführung zu fordern, würde einer Aufforderung zum Abriss und Neubau gleichgekommen. Nahezu nicht vorhandene Zündquellen und nur in geringem Umfang vorhandene, zusätzliche Brandlasten, die Möglichkeit zu einer schnellen Evakuierung oder der „Sichere Bereich“ auf dem Bahnsteig sowie die geringe Gefährdung durch Brandgase lassen in der Regel eine differenziertere Bewertung der Sachlage zu.

In gleicher Weise zu hinterfragen ist die Forderung nach einer Feuerbeständigkeit für das Stahltragwerk einer Eisenbahnüberführung, unter der ein Bahnsteigzugang hindurchgeführt wird (Bild 5).

Bild 5 Bahnhof Hofgeismar, Personenunterführung und Stahltragwerk der Eisenbahnüberführung [Foto: Marc Willich]

Empfangsgebäude wiederum lassen sich in der Regel, wie in Kapitel 2 erwähnt, recht gut auf Basis der Landesbauordnungen und Sonderbauverordnungen bewerten. Die erste Frage, die sich hier stellt, ist die Frage nach dem formellen oder zumindest materiellen Bestandsschutz. Für eine Beantwortung dieser Frage ist die Kenntnis von Bauordnungen aus den Jahren der Erstellung/Erstgenehmigung bzw. relevanter Umbauten sowie der Bestandsdokumentation von entscheidender Bedeutung für die Ermittlung des notwendigen Maßnahmenumfangs.

Unabhängig vom Bestandsschutz ist es immer Aufgabe des Sachverständigen, wirtschaftliche Lösungen für den Weiterbetrieb des jeweiligen Objektes zu finden. Für die Vielzahl der Gebäude, die zwischen 1890 und 1950 entstanden sind, stellt sich beispielsweise immer wieder die Frage, ob und wie alte Treppen oder Geschossdecken in Holzbauweise auch ohne umfangreiche Kompensationsmaßnahmen erhalten bleiben können. Risikoanalyse und Schutzzielbetrachtung sowie eine enge Abstimmung mit dem Betreiber und den Aufsichtsbehörden können gute und gleichzeitig wirtschaftliche Lösungen hervorbringen.

Um die Nutzungsflexibilität größerer Empfangsgebäude zu erhalten, ohne umfangreiche anlagentechnische Maßnahmen durchführen zu müssen, kommen immer häufiger Ingenieurmethoden zum Einsatz. Beispiel hierfür ist die Simulation und Bewertung der Verrauchungssituation einer Empfangshalle mit

Ladengeschäften und zugehöriger Ladenstraße nach Verkaufsstätten-Verordnung ohne Entrauchung.

Bei einzelnen, immer wieder vorkommenden Fragestellungen kann es geboten sein, Arbeitshilfen mit externer Unterstützung zu entwickeln. Dies war zum Beispiel bei mit Bitumenbahnen eingedeckten Bestandsdächern der Fall. Zulassungspapiere für Bestandteile des Dachaufbaus konnte die DB Station&Service AG nur selten bereitstellen. Das Vorhandensein einer harten Bedachung war aber entscheidend für die Festlegung der benötigten Löschwassermenge. Mit der Hilfe der DMT konnte hier eine Bewertungshilfe entwickelt werden, die mit geringem Aufwand bereits eine hinreichende Einordnung des jeweiligen Bestandsdaches ermöglicht.

Aber nicht nur die Erstellung von Brandschutzkonzepten nach einheitlichen Maßstäben stellt eine Herausforderung dar. Gerade die Umsetzung von vermeintlich einfachen baulichen Maßnahmen (Einbau von Kabelschotten etc.) in einer Vielzahl kleinerer Empfangsgebäude kann zu Problemen führen, wenn in der Planung, der Leistungsverzeichnis-Erstellung und der Bauüberwachung nicht ausreichend Sorgfalt und Sachkunde eingesetzt wird. Kabelschotte zum Beispiel entfalten nur dann die gewünschte Wirkung, wenn sie an der richtigen Stelle und entsprechend der Herstellervorgaben eingebaut werden und dem Bauherren eine ausreichende Dokumentation hierüber vorliegt. Um das Vorstehende sicher zu stellen, wurde in der aktuellen Fassung der Ril 813.0105 der Anhang 01 aufgenommen, der detailliert den Anspruch an eine qualifizierte Ausführungsplanung für die im Brandschutzkonzept definierten Maßnahmen beschreibt. Ein eigenständiges Maßnahmen-Kodierungssystem, welches von Maßnahmenliste über LV-Position, Lagepläne und Fotodokumentation bis hin zur Abnahmekontrolle Verwendung findet, soll eine eindeutige Verortung der definierten Maßnahmen und deren Dokumentation unterstützen.

Unterirdische Personenverkehrsanlagen (uPVA)

Unterirdische Personenverkehrsanlagen sind wichtige Verkehrsdrehscheiben des öffentlichen Personennahverkehrs. Sie dienen primär als Zugang für die durch private und öffentliche Verkehrsunternehmen angebotene Transportleistung, bieten aber den Kunden an vielen Standorten auch kleinere Einkaufsmöglichkeiten im Einzelhandels- bzw. Reisendenbedarfssektor. Dabei bleiben sie aber reine Zweckbauten, die nicht in den Regelungsrahmen öffentlichen Baurechts hineingezwängt werden können. Der Bahnsteigbereich zum Beispiel muss, um den reibungslosen Ein- und Ausstieg der Fahrgäste zu ermöglichen, übliche Längen und Breiten von Brandabschnitten deutlich übersteigen.

Es bedarf also einer qualifizierten, schutzzielorientierten Bewertung der Sicherheit in einem Brandschutzkonzept. Hierbei ist der Ingenieur besonders gefordert, gilt es doch, den Grundsatz „form follows function“ umzusetzen – also in erster Linie den Eisenbahnbetrieb sinnvoll und wirtschaftlich zu ermöglichen – ohne Sicherheitsbedürfnisse der Reisenden zu vernachlässigen. Erforderli-

chenfalls müssen auf Basis einer qualifizierten Risikobewertung intelligente Lösungen entwickelt werden.

Neben Brandschutzmaßnahmen, die in Anlehnung an die jeweiligen Bauordnungen der Länder oder zum Teil auch Sonderbauverordnungen definiert werden konnten (zum Beispiel die Erneuerung und Nachrüstung von Brandschutztüren und Schotten oder der Bau bzw. die Erweiterung von Sprinkleranlagen), gab es Maßnahmen, für deren Festlegung die Anwendung von Ingenieurmethoden erforderlich war. Die beiden zentralen Eingangsgrößen für den Nachweis der Sicherheit sind dabei einmal der Bemessungsbrand mit zugehöriger Energiefreisetzungskurve und der daraus resultierenden Rauchausbeute und zum anderen die maßgebliche Anzahl der zu evakuierenden Personen.

Als maßgebliches Brandereignis für die Bahnsteigebene der Station ist in der Regel der Brand eines Schienenfahrzeugs zu betrachten. Die Brandlastsituation und die möglichen Brandszenarien sind aber in jedem Fall vom Sachverständigen zu analysieren, zu bewerten und im Brandschutzkonzept zu dokumentieren. Mit einem modernen CFD-Programm ist es möglich, die hierdurch in der Station entstehende Verrauchung zu simulieren. Entscheidend für die Bewertung der Sicherheit ist die Zeit, innerhalb derer sich ein für die Evakuierung grenzwertiger Verrauchungszustand einstellt. Diese wird mit der für die Evakuierung der Station erforderlichen Zeit verglichen.

Problematisch bzw. als Risiko anzusehen war, dass die zur Simulation der Verrauchung herangezogene Bemessungsbrandkurve nicht für diese Anwendung gedacht war und deshalb durch das Eisenbahn-Bundesamt auch nur vorbehaltlich eines noch zu erbringenden Verwendbarkeitsnachweises akzeptiert wurde. Die Kurve entstammte dem „Ergebnisbericht zur Beurteilung von Bränden an Schienenfahrzeugen als Bemessungsbrände zur brandschutztechnischen Auslegung von oberirdischen Personenverkehrsanlagen (oPVA) der Deutschen Bahn AG“ aus dem Jahr 2000 [1]. Grundlage waren u. a. die EUREKA-Brandversuche in Norwegen. Die Bereits durch die Einführung der DIN 5510 im Jahr 1988 [2] (Ablösung durch DIN EN 45545 [3]) erreichten Fortschritte im Schienenfahrzeugbrandschutz wurden mit Blick auf zu diesem Zeitpunkt noch vorhandene Altfahrzeuge aus heutiger Sicht nicht angemessen berücksichtigt. Auch moderne Fahrzeuggeometrien (offene Innenraumgestaltung, Doppelstockwagen etc.) und Antriebsmodelle (Triebzüge mit Antrieben auf den Drehgestellen u. a.) konnten ebenfalls noch nicht in die Bewertung einfließen. Für eine abschließende Festlegung des Maßnahmenumfanges in den uPVA war es also dringend erforderlich, neue Bemessungsbrände festzulegen. Diesen Auftrag erhielt Anfang 2007 eine, in Abstimmung mit dem Eisenbahn-Bundesamt zusammengestellte, Expertengruppe unter dem Dach der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Haack und Herrn Dr.-Ing. Schreyer. Mitglieder der Arbeitsgruppe waren die Universität Wuppertal mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Klingsch und Herrn Dipl.-Ing. Toris, das Instituts für Brandtechnologie GmbH in Wuppertal mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Wittbecker und Herrn Dr.-Ing. Bansemer, Halfkann + Kirchner mit Herrn Dr.-Ing. Wiese und Brandschutz-Consult-Leipzig mit Herrn Dipl.-Ing. Wilk.

Als Berater fungierten diverse Abteilungen der Deutschen Bahn AG und des Eisenbahn-Bundesamtes.

Erste Zwischenergebnisse konnten 2008 zur Anwendung gebracht werden. Im Jahr 2010 wurden dann nach einer insgesamt vierjährigen Bearbeitungszeit neue Bemessungsbrände für S-Bahn-Fahrzeuge und für Fahrzeuge des gemischten Reisezugverkehrs vorgelegt und erstmals vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) als verbindliche Lastgrößen für die Verrauchungssimulation in Personenverkehrsanlagen (PVA) kommuniziert.

Um die Anwendung der Bemessungsbrände sowie auch den daraus abgeleiteten Sicherheitsstandard bundesweit zu vereinheitlichen, wurden alle anwenderrelevanten Informationen in einem Anwenderhandbuch [4] zusammengefasst und durch konkrete Planungsvorgaben [7] ergänzt. Neben der Wärmefreisetzungsrate je Zeiteinheit werden zum Beispiel auch Angaben zu den wichtigsten Verbrennungsparametern, dem Fahrzeugmodell, den in den Fahrzeugen enthaltenen Materialien und weiteren für die Simulation relevanten Daten gemacht.

Für marktübliche Simulationsprogramme wurden Mustervergleichsrechnungen durchgeführt. Hieraus ließen sich weitere wichtige Hinweise ableiten, die für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unabhängig von dem verwendeten Werkzeug sorgen.

Ein weiteres Anliegen der DB Station&Service AG war es, neben der Erarbeitung von einheitlichen Vorgaben für die Simulation der Wirkung der Brandlastgröße in der jeweiligen Station, einheitliche Kriterien für den Nachweis der sicheren Selbst- und Fremdrettungsphase festzulegen. Auch hierzu werden im Anwenderhandbuch differenzierte Angaben gemacht. Um dem besonderen Sachverhalt des eingeschränkten Handlungsspielraumes in Bestandsanlagen und der Frage des Bestandsschutzes angemessen gerecht zu werden, wurde zwischen Neuplanung und Bestandsanlage unterschieden.

Bereits in den Jahren 2005/2006 wurden mit dem EBA einheitliche Kriterien für die Bestimmung der maßgeblichen, zu evakuierenden Reisendenzahl in Bestandsanlagen festgelegt. Diese stellen eine zulässige Alternative zu den stark auf der sicheren Seite liegenden Abschätzungsformeln im „Leitfaden für den Brandschutz in Eisenbahnverkehrsanlegen des Bundes“ des Eisenbahn-Bundesamtes dar und basieren auf realen Zählzahlen aus dem Reisenden-Erfassungs-System der DB AG (RES). Die maßgebliche Reisendenzahl ist dabei die „Spitzenzahl aller Personen, die innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 15 Minuten in der Hauptbetriebszeit (Spitzenstunde) der jeweiligen Anlage aus allen planmäßig haltenden Zügen aussteigen; zuzüglich der Belegung des höchstbesetzten Zuges je Bahnsteigkante innerhalb der vorgenannten 15 Minuten“ [7].

Die sehr konservativen Bemessungslastgrößen, konkrete Vorgaben für die Nachweisführung und die detaillierten Vorgaben zur Anwendung der Simula-

tionswerkzeuge sorgen für ein sehr hohes Maß an Sicherheit der Nachweise sowie eine bundesweite Vergleichbarkeit der Ergebnisse (Bilder 6 und 7). Subjektiv festgelegte „Sicherheitsaufschläge“ des einzelnen Anwenders/Sachverständigen für bereits im Bemessungs- und Nachweiskonzept hinreichend berücksichtigte Imperfektionen (unterschiedlichste Schienenfahrzeuge, Brandorte, Zündquellen, Ventilationsbedingungen, Personenbelegungen und –verhalten sowie die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Simulationswerkzeuge etc.) sind weder notwendig noch geboten.

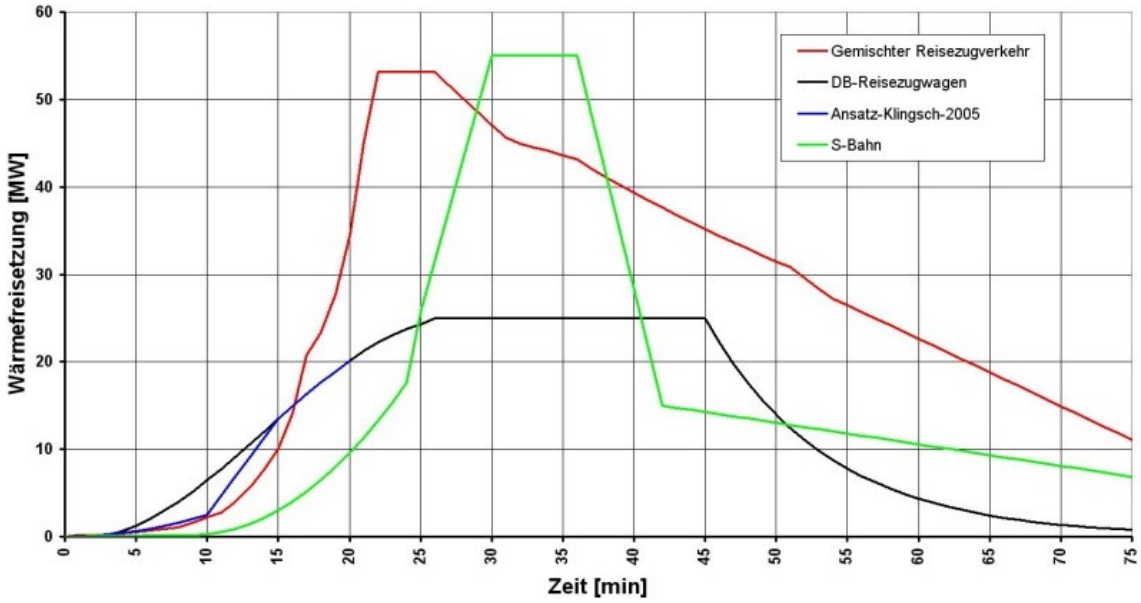


Bild 6 *DB-Bemessungsbrände im Vergleich; schwarze bzw. blaue Kurve bis 2010 gültig und durch rote bzw. grüne Kurve abgelöst [5]*

Um angesichts der anspruchsvollen Terminziele des Programms so wenig Zeit wie möglich zu verlieren und die für die brandschutztechnische Modernisierung zeitlich begrenzt bereitgestellten Bundeshaushaltsmittel zu nutzen, haben sich die DB Station&Service AG und das Eisenbahn-Bundesamt auf eine gestaffelte Umsetzung der Maßnahmenpakete verständigt. Die Maßnahmen in den Brandschutzkonzepten wurden in die Kategorien „vorziehbare berechnungsunabhängige Maßnahmen“ und „berechnungsabhängige Maßnahmen“ eingeteilt. Vorziehbare berechnungsunabhängige Maßnahmen sind diejenigen, die unabhängig von den Ergebnissen der Simulationsrechnungen notwendig sind und bereits ab 2006 realisiert werden konnten. Die berechnungsabhängigen Maßnahmen wurden bis zur Bestätigung durch die abschließende ingenieurmäßige Nachweisführung zurückgestellt [8].

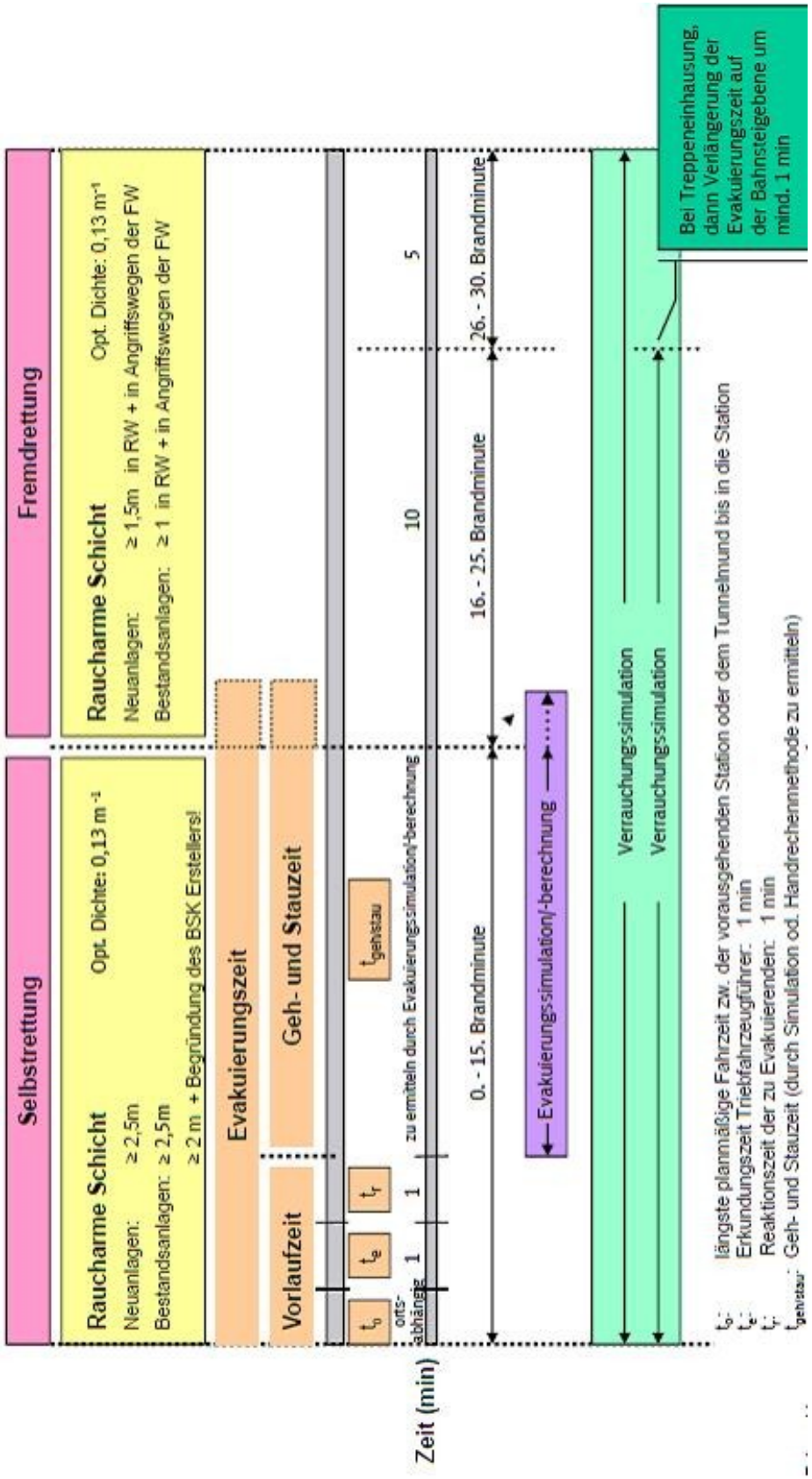


Bild 7 Zeitachsen für Nachweisführung [7]

Alle vorziehbaren berechnungsunabhängigen Maßnahmen wie zum Beispiel

- Erneuerung/Nachrüstung von Brandschutztüren,
- Schließen von Wand- und Deckendurchbrüchen (Hauptlast in den vermieteten Bereichen; Mieterausbau),
- Nachrüstung von hinterleuchteten Rettungswegkennzeichen,
- Reorganisation von Kabel- und Leitungswegen inkl. Schottungen,
- Bereitstellen zusätzlicher Löschmittel,
- Steuerung zur Abschaltung von Fahrtreppen im Brandfall,
- Installation von Rauchschürzen an den Treppenaufgängen,
- Herausnahme von rauchdichten Abhangdecken (wo erforderlich)

sind bereits umgesetzt.

Nicht alle Maßnahmen sind dabei nebenwirkungsfrei, was bei der Suche nach der „richtigen“, ganzheitlich optimierten Lösung unbedingt zu beachten ist. In Bahnsteigtrögen zum Beispiel ist oft eine Vielzahl betriebswichtiger Kabel verlegt. In einigen Stationen schien es aufgrund der Brandlast und der Verlegesituation der Kabel sinnvoll, die Bahnsteigtröge als einen eigenen „Brandabschnitt“ auszubauen und vorhandene Öffnungen zu schließen, anstatt eine frühe Detektion sicher zu stellen und ggf. die Brandlast durch Längsschotte zu unterteilen. Um den hierfür erforderlichen Mitteleinsatz zu reduzieren, wurden Öffnungen zum Teil ganz verschlossen. Durch die Lösung eines „Brandschutzproblems“ wurde nun aber ein „Dauerhaftigkeitsproblem“ für Konstruktion und Installation geschaffen, denn nach einigen Monaten konnte eine nicht unerhebliche Feuchtebildung festgestellt werden.

Lösungsansätze sollten zudem immer einer risikoorientierten Betrachtung unterzogen werden. Um Reisende zu informieren sind uPVA in der Regel mit Fahrgastinformationsanlagen ausgestattet. Die hierfür meist an der Decke verlegten Strom- und Datenkabel sind streng genommen nicht der „Rettungswegfunktion“ der Bahnsteige zuzuordnen, jedoch zwingend erforderlich für den kundengerechten Betrieb der Anlage. Die Musterleitungsanlagenrichtlinie könnte hier so interpretiert werden, dass ein Schotten dieser Kabelbrandlast und der elektronischen Zugzielanzeiger erforderlich wäre. Diese Forderung erscheint aber mit Blick auf das Bemessungsbrandszenarios „Schienenfahrzeugbrand“ wenig sinnvoll, wird die sichere Entfluchtbarkeit doch auch für dieses Extremal-Brandszenario nachgewiesen.

Seit Anfang 2009, nachdem erste Simulationsergebnisse auf Basis des neuen S-Bahn-Bemessungsbrandes vorlagen, wurde auch mit der Planung, Genehmigung und Umsetzung der berechnungsabhängigen Maßnahmen begonnen. Folgende Maßnahmen befinden sich in der Umsetzung bzw. werden bis 2015 umgesetzt:

- Bau von festen Treppeneinhausungen und mobilen Rauchschürzen,
- Erweiterung/Modernisierung/Neubau der Brandmeldeanlagen,
- Bau von Sprach-Alarm-Anlagen,
- Erneuerung der Allgemein-, Ersatz- und Sicherheitsbeleuchtungsanlagen (wo erforderlich),
- Brandfallsteuerungen für Aufzüge (wo erforderlich),
- Einbau rauchoffener Abhangdecken (wo erforderlich),
- Bau von maschinellen Entrauchungsanlagen (wo erforderlich),
- Verbreiterung von vorhandenen Treppenanlagen (wo erforderlich).

Besonders die Realisierung der maschinellen Entrauchungsanlagen wird die Projektbeteiligten vor eine enorme Herausforderung stellen. Die erforderlichen Planfeststellungsverfahren gehören dabei zu den kleineren Hürden, die es zu überwinden gilt. Druckwasser, geringe Baustelleneinrichtungsflächen und die Sicherheit der Reisenden beim Bauen unter laufendem Eisenbahnbetrieb verlangen das Wissen und die Erfahrung qualifizierter Baufachleute innerhalb und außerhalb der DB Station&Service AG.

Die Sicherheit der Kunden hat für die DB Station&Service AG als Infrastrukturunternehmen oberste Priorität. Es bedarf darum der engagierten und fachkundigen Zusammenarbeit aller an der Planung und Umsetzung des brandschutztechnischen Modernisierungsprogramms Beteiligten, um das Programm termin- und kostengerecht erfolgreich abzuschließen.

COMMON SAFETY METHODS (CSM)

Auf europäischer Ebene wird der Risikoanalytik immer größere Bedeutung bei der Planung und Umsetzung von Bauprojekten zugemessen. Mit der Verordnung (EG) 352/2009 (CSM-VO) wurde ein wichtiger Schritt in diese Richtung getan. Die Deutsche Bahn AG hat auf diese Entwicklung bereits mit der überarbeiteten Ril 451 „Betriebliches, organisatorisches und technisches Risikomanagement im System Bahn“ reagiert.

Bei sicherheitsrelevanten und signifikanten Änderungen ist der Anlagenbetreiber zur Erstellung einer Risikobewertung gemäß CSM-VO verpflichtet. Hierin werden Risikoszenarien strukturiert analysiert und einem vorher zu definierenden Risikoakzeptanzkriterium gegenübergestellt. Verlässt das Risiko ein tolerables Maß, sind geeignete risikominimierende Maßnahmen festzulegen. Die Risikobewertung ist durch eine unabhängige Bewertungsstelle zu prüfen.

Es ist zu erwarten, dass diese Methodik auch immer stärker bei Fragen des Brandschutzes zum Einsatz kommen wird. Zuerst werden hiervon voraussichtlich UiG/ZiE-Verfahren (UiG = Unternehmensinterne Genehmigung; ZiE = Zulassung im Einzelfall) betroffen sein. Es ist aber auch zu erwarten, dass Verfah-

ren zur Erteilung der Zustimmung zu Abweichungen oder sogar grundsätzlichere Themen von der Entwicklung berührt sein werden. Auch in Brandschutzkonzepten enthaltene Risikobewertungen werden so eine „Standardisierungs-Evolution“ durchlaufen müssen.

Grundsätzlich ist dies zu begrüßen, werden Anlagen zukünftig noch objektiver bewertet und Maßnahmen zielgerichteter definiert. So sehr eine risikoorientierte Einzelfallbewertung Sinn macht, so sehr sollte aber auch auf einen handhabbaren und der Sachlage angemessenen Bewertungsaufwand geachtet werden. Momentan fehlen hier noch praktische Erfahrungswerte.

ZUSAMMENFASSUNG

Die DB Station&Service AG ist Betreiber von rd. 5.400 aktiven Bahnhöfen und Haltepunkten in Deutschland. Der vorbeugende Brandschutz ist ein integraler Bestandteil des Gesamtsicherheitskonzeptes. Um den wirtschaftlichen Betrieb und ein bundesweit einheitliches Sicherheitsniveaus zu gewährleisten, kommt der Standardisierung von Methoden und Werkzeugen sowie der überregionalen Harmonisierung der Brandschutzmaßnahmen eine wichtige Bedeutung zu. Trotzdem muss der Brandschutzkonzeptersteller dem jeweiligen Objekt bei einer großen Variationsbreite im Portfolio gerecht werden.

Der Bahnhof als „ungeregelter Sonderbau“ bietet hier Chancen und Risiken gleicher Maßen. Ein verfehltes „Hineinpressen“ des Objektes in Anwendungsfälle der jeweils geltenden Landesbauordnung und das kompromisslose Einfordern der hieraus abzuleitenden, vermeintlich umzusetzenden materiellen Anforderungen, kann die weitere Nutzung der Verkehrsanlagen in Frage stellen. Eine schutzziel- und risikoorientierte Herangehensweise, erforderlichenfalls unterstützt durch den sinnvollen Einsatz von Ingenieurmethoden, öffnet jedoch die Türen für nutzungsgerechte und wirtschaftlich tragfähige Lösungen.

LITERATUR

[1] Ergebnisbericht zur Beurteilung von Bränden an Schienenfahrzeugen als Bemessungsbrände zur brandschutztechnischen Auslegung von oberirdischen Personenverkehrsanlagen der Deutschen Bahn AG; Wilk, Wiese, Tavakkol-Khah im Auftrag der Deutschen Bahn AG , September 2000

[2] DIN 5510: Vorbeugender Brandschutz in Schienenfahrzeugen, 1988

[3] DIN EN 45545: Bahnanwendungen – Brandschutz in Schienenfahrzeugen, März 2013

[4] Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr – Anwenderhandbuch; Haack, Schreyer (Studiengesellschaft für unterirdische Personenverkehrsanlagen e. V.) im Auftrag der DB Station&Service AG, Juni 2010

[5] Bemessungsbrände für S-Bahnen und den Gemischten Reisezugverkehr – Zusammenfassender Bericht; Haack, Schreyer (Studiengesellschaft für unterirdische Personenverkehrsanlagen e.V.) im Auftrag der DB Station&Service AG, Januar 2010

[6] Leitfaden für den Brandschutz in Personenverkehrsanlagen der Eisenbahnen des Bundes und der Magnetschnellbahn; Eisenbahn-Bundesamt (EBA), März 2011

[7] Planungsvorgaben für die brandschutztechnische Ausstattung unterirdischer Personenverkehrsanlagen; Wagner, Willich (DB Station&Service AG), April 2011

[8] Brandschutz in unterirdischen Personenverkehrsanalgen der DB Station&Service AG, Willich, Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 11/2010

SITZUNG 4

VFDB-LEITFADEN INGENIEURMETHODEN DES BRANDSCHUTZES, 3. AUFLAGE

Sitzungsleitung: J. Zehfuß, Braunschweig

FORTSCHREIBUNG DES VFDB-LEITFADENS INGENIEURMETHODEN DES BRANDSCHUTZES

Dietmar Hosser und Matthias Siemon
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

EINLEITUNG

Das vfdb-Referat 4 befasst sich seit 1997 mit der Auswertung und Fortschreibung des Standes von Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Ingenieurmethoden des Brandschutzes. Nach Abstimmung der eigenen Erkenntnisse mit den Erfahrungen ausländischer Experten im Rahmen des 9. Internationalen Brandschutz-Symposiums 2001 der vfdb in München [1] und des 10. Internationalen Brandschutz-Symposiums 2005 in Hannover [2] wurde im Mai 2006 der „Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes“ als Technischer Bericht vfdb TB 04-01 in 1. Auflage [3] im Internet veröffentlicht. Neben der sehr positiven Reso¬nanz aus der Praxis gab es auch extern wie intern Hinweise auf beste¬hende Unklarheiten und Ergänzungswünsche, die in der 2. Auflage Mai 2009 [4] umgesetzt wurden. Dieses Werk hat sich bei der Erstellung von Brandschutzkonzepten für Sonderbauten unter Verwendung von ingenieurmäßigen Nachweisen als sehr hilfreich und im Wesentlichen ausreichend erwiesen. Trotzdem hat das Referat 4 die bisherigen Darstellungen und Empfehlungen weiter an neuen Erkenntnissen in der internationalen Fachliteratur und Gremienarbeit gespiegelt und im Rahmen eigener Anwendungen erprobt. Dabei wurde der Leitfaden redaktionell überarbeitet, an verschiedenen Stellen auch inhaltlich ergänzt und mit zusätzlichen Hilfestellungen für die Anwender versehen. Das Ergebnis dieser Arbeiten soll Ende 2013 als 3. Auflage des Technischen Berichts vfdb TB 04-01 herausgegeben und dann auch in einer englischen Fassung veröffentlicht werden.

Dieser Beitrag gibt in Anlehnung an [5] zunächst einen Überblick über die seit 2009 durchgeführten Arbeiten und erzielten Verbesserungen in den einzelnen Kapiteln des Leitfadens. Danach werden die Neuerungen bezüglich der Brandszenarien und Bemessungbrände (Kap. 4), der Modelle für die Brandsimulation (Kap. 5), der Brandschutznachweise für Bauteile und Tragwerke (Kap. 6), des anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzes (Kap. 7), der Nachweise zur Personensicherheit (Kap.8) und Personenstromanalyse (Kap. 9) zusammenfassend beschrieben. Abschließend wird etwas detaillierter auf die Erweiterungen des Sicherheitskonzeptes (Kap. 10) für unterschiedliche Schutzziele eingegangen.

Drei weitere Beiträge zu dieser Fachtagung [6], [7], [8] befassen sich näher mit den Vorgaben des Leitfadens zu den Brandszenarien und Bemessungsbränden, den Brandsimulationsmodellen, den Tragwerksnachweisen sowie den Nachweisen zur Personensicherheit und wenden die Nachweise auf das im Anhang 2 des Leitfadens behandelte Beispiel eines Hörsaalgebäudes an.

KONZEPT UND GLIEDERUNG DES LEITFADENS

Das Grundkonzept des Leitfadens ist seit der 1. Auflage Mai 2006 [1] und der 2. Auflage Mai 2009 [2] praktisch unverändert geblieben. Die Struktur und Abfolge entsprechen dem realen Ablauf einer Projektbearbeitung unter Zuhilfenahme von Ingenieurmethoden des Brandschutzes mit den im rechten Teil von Bild 1 dargestellten Arbeitsschritten. Zum Vergleich ist die klassische Brandschutzauslegung „nach Vorschrift“ in Bild 1 links gezeigt.

Eine Sonderrolle spielt das Kapitel 10, das später noch genauer betrachtet werden soll. Es wird in der Mehrzahl der Anwendungsfälle nicht benötigt, wenn die Nachweise nach den Kapiteln 4 bis 9 ohne Berücksichtigung von besonderen anlagentechnischen und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen durchgeführt werden und wenn eine Differenzierung des an Standardgebäuden ausgerichteten brandschutztechnischen Sicherheitsniveaus nicht in Betracht kommt.

Auch die 3. Auflage des Leitfadens soll nach den Vorstellungen des Referats 4 wieder kostenfrei im Internet als Download-Version zur Verfügung gestellt werden, um den größtmöglichen Nutzen für Brandschutzsachverständige, Bauaufsichtsbehörden, Feuerwehren und Bauherren zu erzielen.

Die 3. Auflage des Leitfadens gliedert sich in 10 Kapitel und 3 Anhänge:

1 Konzept und Anwendung des Leitfadens

2 Erfassung des Gebäudes

3 Schutzziele, funktionale Anforderungen und Leistungskriterien

4 Brandszenarien und Bemessungsbrände

5 Modelle für die Brandsimulation

6 Brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen und Tragwerken

7 Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz

8 Personensicherheit in Rettungswegen

9 Personenstromanalysen mit rechnerischen Nachweisverfahren

10 Risikomethoden und Sicherheitskonzept

Anhang

A1 Bezeichnungen und Symbole

A2 Anwendungsbeispiele

A3 Mitarbeiter im vfdb-Referat 4

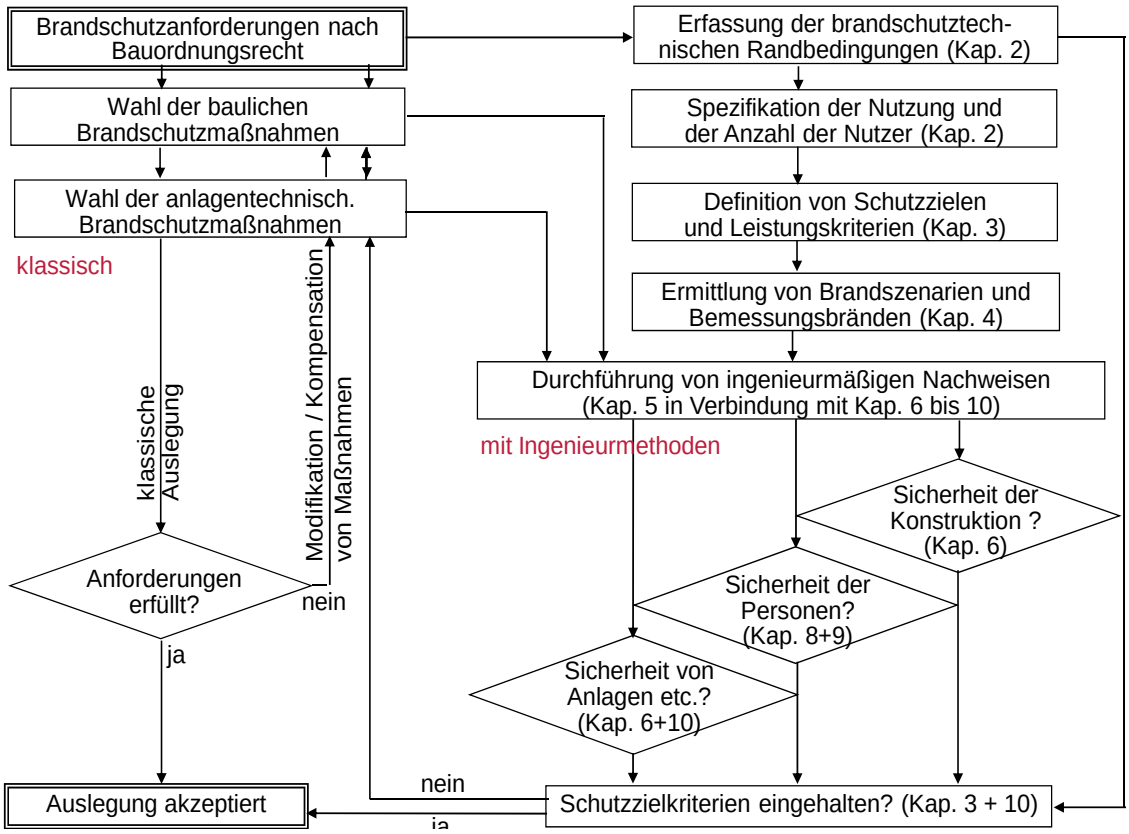


Bild 1 Einsatzbereich von Ingenieurmethoden (rechter Bildteil) im Vergleich zu der klassischen Vorgehensweise (linker Bildteil) bei der brandschutztechnischen Auslegung

Die einzelnen Kapitel wurden von 6 Arbeitsteams (AT) erarbeitet und im ständigen Arbeitskreis (AK) beraten und verabschiedet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Aufgaben der Arbeitsteams im Referat 4

AT	Bezeichnung des Arbeitsteams (Federführung)	Kapitel
1	Brandsicherheit in Gebäuden (Hosser)	1-3 + 10
2	Brandsimulationsmodelle (Siegfried)	5
3	Brandszenarien und Bemessungsbrände (Wiese)	4
4	Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz (Dehne → Rusch)	7
5	Personensicherheit und Rettungswege (Schneider)	8+9
6	Konstruktiver Brandschutz (Zehfuß)	6

Die Organisationsstruktur des Referats 4 mit allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Arbeitsteams findet sich auf der Homepage des Referats: http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/index.php/322.html .

NEUERUNGEN DER 3. AUFLAGE

Die 6 Arbeitsteams haben auftragsgemäß den aktuellen internationalen Stand von Wissenschaft und Technik auf ihren jeweiligen Arbeitsgebieten im Hinblick auf neue Erkenntnisse und Weiterentwicklungen bei den Ingenieurmethoden und Eingangsdaten ausgewertet. Auf dieser Basis wurden die einzelnen Kapitel des Leitfadens überarbeitet und ergänzt. Im Einzelnen haben sich in der 3. Auflage gegenüber der 2. Auflage folgende Änderungen und Neuerungen ergeben (vgl. Gliederung):

- Die Kapitel 1 bis 3 wurden lediglich redaktionell überarbeitet. Hierauf wird in diesem Beitrag nicht näher eingegangen.
- Das Kapitel 4 wurde gründlich überarbeitet und neu strukturiert. Die Datenbasis für die Bemessungsbrände wurde anhand umfangreicher Versuchsauswertungen überprüft und ergänzt. Es wurden Bemessungsbrände unter Berücksichtigung von Löschmaßnahmen entwickelt.
- In das Kapitel 5 wurden aufgrund von Kommentaren und Wünschen aus der Praxis ergänzende Erläuterungen und Interpretationen aufgenommen.
- Das Kapitel 6 wurde komplett überarbeitet. Den Schwerpunkt bilden jetzt Hintergrundinformationen und Anwendungshilfen zu den rechnerischen Nachweisen nach den Brandschutzteilen der Eurocodes. Ergänzend dazu wird auf Anwendungsbereiche der neuen „Restnorm“ DIN 4102-4 und der Bemessung mittels äquivalenter Branddauer nach DIN 18230 Teil 1 und Teil 4 eingegangen.
- Das Kapitel 7, das Modelle und Daten zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit anlagentechnischer und abwehrender Brandschutzmaßnahmen bereitstellt, wurde nur partiell ergänzt und redaktionell überarbeitet.
- Die Kapitel 8 und 9 wurden redaktionell überarbeitet. Ausführlichere Erläuterungen zu den Beurteilungsgrößen für quantitative Schutzziele der Personensicherheit in Kapitel 8 sollen helfen, bisher bestehende Unsicherheiten der Anwender abzubauen.
- Im Kapitel 10 wurde das semi-probabilistische Sicherheitskonzept für den baulichen Brandschutz auf Nachweise der Personensicherheit im Brandfall übertragen. Hierauf wird weiterunten noch näher eingegangen.
- Der Anhang 1 mit Bezeichnungen und Symbolen wurde erweitert.
- Im Anhang 2 wurde das Beispiel eines Hörsaalgebäudes mit der gesamten Nachweiskette – Schutzziele, Brandszenarien und Bemessungsbrände, Brandsimulationen, Nachweise des Tragwerks und der Personenrettung – an den aktuellen Stand der Kapitel angepasst.
- Der Anhang 3 mit der Organisationsstruktur des Referats 4 ist entfallen. Stattdessen wird auf die Homepage des Referats verwiesen.

BRANDSZENARIEN UND BEMESSUNGSBRÄNDE

Das Kapitel 4 „Brandszenarien und Bemessungsrbände“ des Leitfadens soll nützliche Informationen für die Festlegung von Bemessungs-Brandszenarien und von Bemessungsbränden bereitstellen, die es dem Anwender von Ingenieurmethoden des Brandschutzes ermöglichen, seine Rechenparameter auf der Basis von dort behandelten Kriterien und gelisteten Werten festzulegen. Damit soll erreicht werden, dass die Unterschiede von Rechenergebnissen verschiedener Anwender (auch mit unterschiedlichen Rechenmodellen) in der Praxis kleiner werden und dadurch das Vertrauen in derartige Berechnungen und Nachweise zunimmt.

Seit Veröffentlichung der 2. Auflage Mai 2009 des Leitfadens hat sich das zuständige Arbeitsteam 3 mit folgenden Fragen näher befasst:

- Prüfung der Anwendbarkeit der bisherigen Vorgaben und Auswertung von Zuschriften aus der Praxis,
- Ergänzung und Modifikation der textlichen Erläuterungen zur Szenarienauswahl und zur Festlegung von Bemessungsbränden einschließlich einer moderaten Umstrukturierung des Kapitels,
- Kontrolle und Fortschreibung des Datenmaterials für die Bemessungsbrände unter Straffung und Konzentration auf die deutschen Verhältnisse,
- Prüfung, inwieweit die beispielhaft abgedruckten Rechenwerte statistisch als Fraktilwerte interpretiert werden können im Hinblick auf die Anbindung an die Schutzziele des Kapitels 3 und die Sicherheitskonzepte des Kapitels 10,
- Fortschreibung und Abstimmung der Rechenansätze zur Berücksichtigung der Löschwirkung von Feuerlöschanlagen und von manuellen Maßnahmen zur Brandbekämpfung.

Bezüglich der Bemessungsbrände werden nur noch Festlegungen für die Wärmefreisetzungsrate getroffen, während die Angaben zur Freisetzung von toxischen, sichttrübenden und reizenden Brandprodukten in Kapitel 8 verschoben wurden.

Weitere Erläuterungen und konkrete Anwendungen sind dem Beitrag von Wiese und Riese [6].

MODELLE FÜR DIE BRANDSIMULATION

In Kapitel 5 „Modelle für die Brandsimulation“ wurden aufgrund von Anfragen und Kommentaren aus der Praxis ergänzende Hinweise zur Auswahl und Anwendung von Brandsimulationsmodellen für bestimmte Fragestellungen aufgenommen. Vertieft werden die Kriterien zur Bewertung der unterschiedlich komplexen Naturbrandmodelle dargestellt. Grundsätzlich wird eine Überprüfung und Validierung der Modelle durch Vergleiche mit Brandversuchen empfohlen. Allerdings finden sich in der Literatur kaum vollständig dokumentierte Brand-

versuche. Exemplarisch zeigt Bild 2 einen Vergleich zwischen Versuchs- und Rechenergebnissen für den in [9] beschriebenen Brand von 3500 kg Holzpaletten in einer 144 m x 65 m x 28 m (L x B x H) großen Halle.

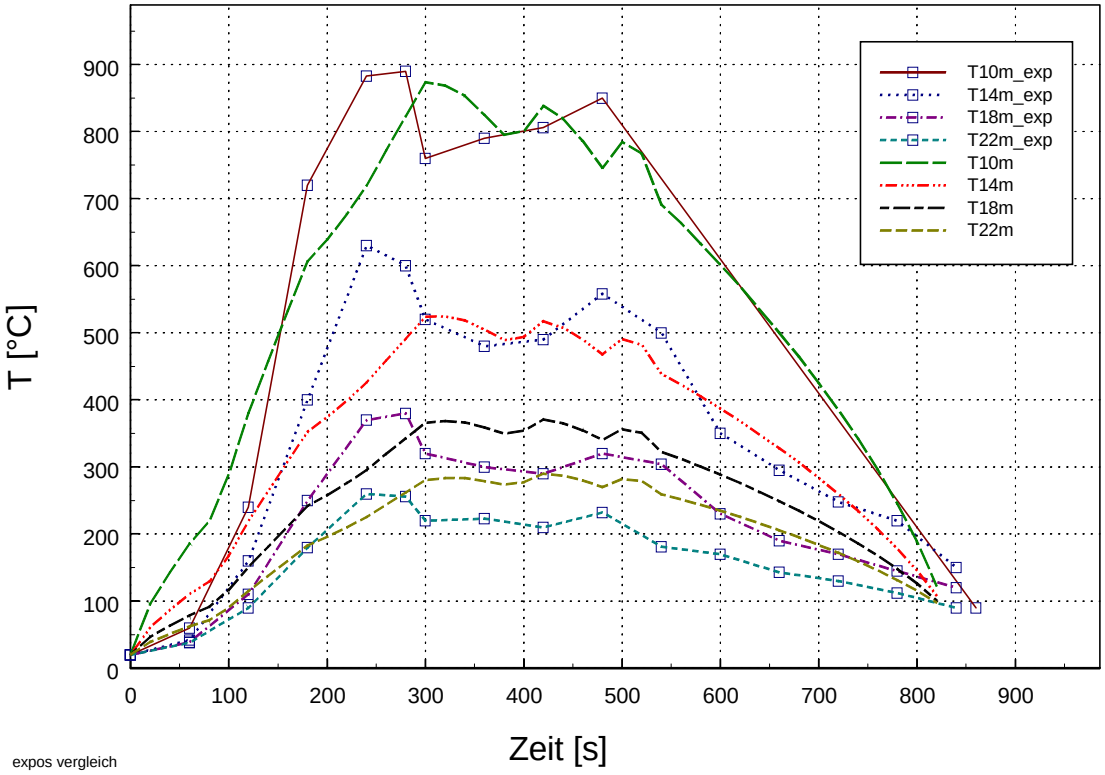


Bild 2 *Vergleich der Temperaturentwicklung in verschiedenen Höhen bei einem lokalen Brand in einer großen Halle nach Experiment und Berechnung*

Der Beitrag von Wiese und Riese [6] enthält auch Informationen über die vorgenommenen Ergänzungen bei den Brandsimulationsmodellen und wendet diese auf das gemeinsame Hörsaalbeispiel an.

BRANDSCHUTZNACHWEISE FÜR BAUTEILE UND TRAGWERKE

Die brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerken sind durch die Veröffentlichung der Brandschutzteile der Eurocodes mit den zugehörigen Nationalen Anhängen im Dezember 2010 und mit deren Aufnahme in die Musterliste der Technischen Baubestimmungen zum 1. Juli 2012 genormt und in Deutschland anwendbar. Die Darstellungen im Kapitel 6 des Leitfadens konnten daher reduziert und auf Hintergrundinformationen zu den Nachweisverfahren und ihrem bevorzugten Anwendungsbereich beschränkt werden. Neu in Kapitel 6 aufgenommen wurden Erläuterungen und Empfehlungen zu bisher nicht oder nicht ausreichend geregelten Fragen, z. B. zur Vorgehensweise bei der Verwendung neuer Baustoffe wie hochfestem oder ultra-hochfestem Beton oder hochfestem Stahl, zur Bedeutung unterschiedlicher Versagenskriterien beim baulichen Brandschutz, zu den Anwendungsgrenzen der einzelnen Nach-

weise sowie den bisher fehlenden Materialkennwerten für die Konstruktionsbaustoffe unter Hochtemperaturbeanspruchung bei einem Naturbrand mit Abkühlphase (siehe z. B. Bild 3).

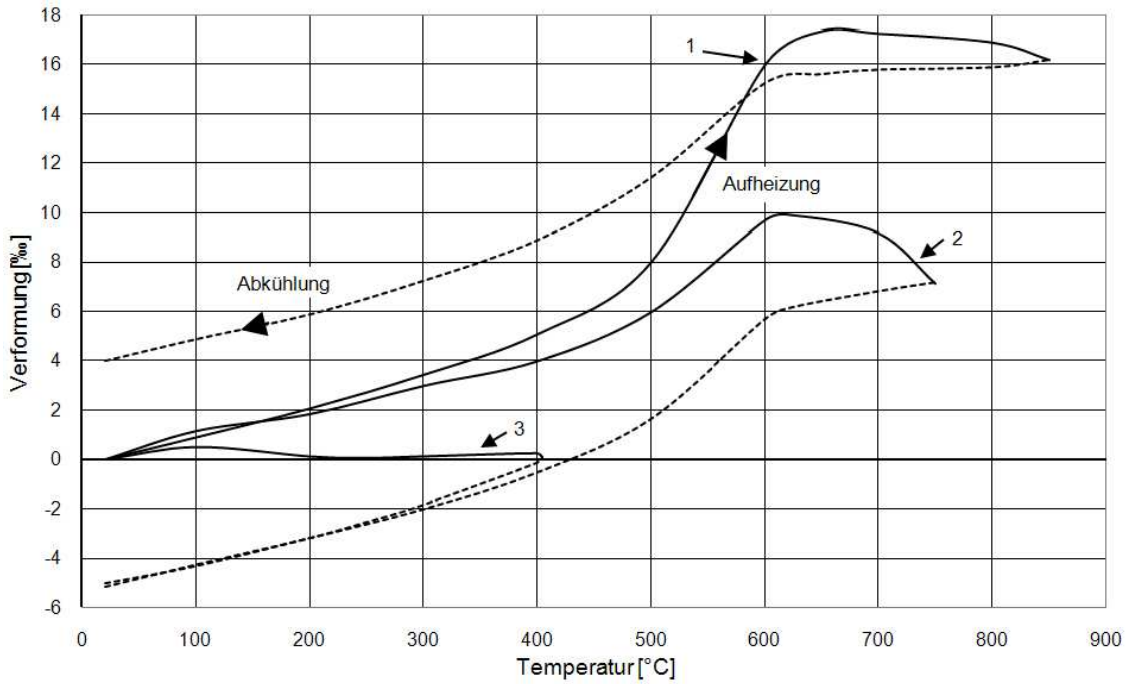


Bild 3 *Dehnungen von Normalbeton nach dem Aufheizen und Abkühlen in Abhängigkeit von der Lastausnutzung*

Aus aktuellem Anlass wird auf die voraussichtlich Ende 2013 als Entwurf erscheinende „Restnorm“ DIN 4102-4 eingegangen, die sich auf die in den Eurocodes derzeit nicht behandelten Bauteile und Sonderbauteile konzentrieren wird. Der Vollständigkeit halber wird auch die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen für den Industriebau mit dem vereinfachten Verfahren der äquivalenten Branddauer nach DIN 18230-1 und dem Entwurf DIN 18230-4 in Grundzügen kurz beschrieben.

Für weitere Erläuterungen zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen und Tragwerken wird auf den Beitrag von Zehfuß und Paliga [7] verwiesen.

ANLAGENTECHNISCHER UND ABWEHRENDER BRANDSCHUTZ

Das Kapitel 7 „Anlagentechnischer und abwehrender Brandschutz“ liefert die notwendigen Grundlagen und Daten, um die betreffenden Brandschutzmaßnahmen bei Nachweisen mit Ingenieurmethoden des Brandschutzes berücksichtigen zu können. Hierzu gehören einerseits Modelle zur Beschreibung der Auswirkungen dieser Maßnahmen auf den Verlauf eines Bemessungsbrandes und auf die Brandwirkungen und andererseits Daten zur Zuverlässigkeit bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandschutzmaßnahmen im Anforderungsfall.

Näher untersucht wurde der Auslösezeitpunkt von Sprinklern, der für die Wirksamkeit von Sprinkleranlagen entscheidend ist. Er kann alternativ mit einem sog. Ceiling Jet-Modell (mittels Tabellenkalkulation) berechnet oder aus Bemessungshilfen mit tabellarischen Daten (analog VDI 6019) entnommen werden.

Auch die Wirksamkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr kann grundsätzlich in den ingenieurmäßigen Nachweisen berücksichtigt werden. Allerdings fehlen hierfür belastbare Eingangsdaten, weil es in Deutschland noch immer keine aussagekräftige Brandstatistik gibt. Nach einer exemplarischen Auswertung der Feuerwehr Hamburg für Industriebrände beträgt die Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Löschmaßnahmen ca. 90 %, wenn die vom Brand erfasste Fläche nicht größer als 400 m^2 ist.

Informationen und Erläuterungen zur Berücksichtigung anlagentechnischer und abwehrender Brandschutzmaßnahmen bei Brandsimulationen und im zugehörigen Sicherheitskonzept finden sich in einem Beitrag von Dehne und Klinzmann zu den Braunschweiger Brandschutz-Tagen 2009 [10].

PERSONENSICHERHEIT UND PERSONENSTROMANALYSE

Zu Kapitel 8 „Personensicherheit in Rettungswegen“ und Kap. 9 „Personenstromanalysen mit rechnerischen Nachweisverfahren“, die für den Nachweis der sicheren und ausreichend langen Benutzbarkeit von Rettungswegen von Bedeutung sind, hat es aus der Praxis kaum Kritik oder Änderungswünsche gegeben. Deshalb wurden gegenüber der 2. Auflage des Leitfadens nur partielle Ergänzungen und redaktionelle Präzisierungen vorgenommen. Unter anderem betrifft dies die folgenden Punkte.

Da in der Praxis für die Bewertung der Sichttrübung durch Brandrauch oft die mit einem Simulationsmodell ermittelte Rußkonzentration eingesetzt wird, werden im Kapitel 8 in der Tabelle mit Anhaltswerten für Schutzzielkriterien auch Rußkonzentration angegeben. Außerdem wurde ein neuer Abschnitt zu "Rauchausbeuten" eingefügt und die "Bestimmung von Erkennungsweiten" wird erläutert und an Fallbeispielen demonstriert. Das Thema "Reizgase", zu dem bisher hauptsächlich auf weiterführende Literatur (ISO 13571, SFPE Handbook, vfdb-Richtlinie 10/03) verwiesen wurde, wird jetzt detaillierter behandelt, wobei das Konzept der Fractional Irritant Concentration FIC nach Purser [11] zur Beurteilung der Wirkung einer Kombination von Reizgasen benutzt wird.

Im Kapitel 9 wurde im Abschnitt "Verhaltensaspekte" ein Unterabschnitt zur Wahl des Fluchtweges hinzugefügt, in dem die Grundprinzipien für die Festlegung geeigneter Randbedingungen bei rechnerischen Nachweisen zur Entfluchtung erläutert werden. Für Detailfragen wird unter Quellenangaben auf die verfügbare Fachliteratur verwiesen. Einen Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten wird der Einfluss einer sich ändernden Alters- und Mobilitätsstruktur der Bevölkerung auf die Selbst- und Fremdrettung aus Gebäuden sein.

Nähere Erläuterungen zu den vorgenommenen Änderungen sowie praktische Anwendungen sind Beitrag von Schneider und Forell [8] zu entnehmen.

RISIKOMETHODEN UND SICHERHEITSKONZEPT

Im Kapitel 10 „Risikomethoden und Sicherheitskonzept“ wurden für die 3. Auflage des Leitfadens die Ausführungen zum Sicherheitskonzept für brandschutztechnische Nachweise überarbeitet und ergänzt. Das Sicherheitskonzept für den konstruktiven Brandschutz war in seinen Grundzügen bereits Ende der 1970er Jahre im Zusammenhang mit der Erarbeitung der DIN 18230 „Baulicher Brandschutz im Industriebau“ entwickelt [12] und dann auch auf andere brandschutztechnische Bemessungsverfahren und Gebäudenutzungen übertragen worden [13]. Inzwischen wurde dieses Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung nach den Eurocode-Brandschutzteilen fortgeschrieben [14] und in DIN EN 1991-1-2/NA [15] (Nationaler Anhang zu Eurocode 1 Teil 1-2), Anhang BB genormt. Deshalb kann sich die Darstellung im Leitfaden nun auf einige Erläuterungen und Hilfen für die Anwendung beschränken.

Nachteilig für die Festlegung risikogerechter Sicherheitsanforderungen ist, dass es in Deutschland nach wie vor keine belastbaren statistischen Daten zur Häufigkeit von Entstehungsbränden und zur Wahrscheinlichkeit der Brandausbreitung bis zum fortentwickelten Brand in unterschiedlich genutzten Gebäuden gibt. Deshalb musste in [14], [15] – wie bereits in [12], [13] – auf ausländische Daten aus internationalen Veröffentlichungen, Richtlinien und Normen zurückgegriffen werden. Anhand einer Vielzahl von brandschutztechnischen Nachweisen der Stufen 1 bis 3 für typische Bauteile in verschiedenen Gebäudenutzungen konnte gezeigt werden, dass mit den semi-probabilistischen Teilsicherheitsbeiwerten für die Brandbeanspruchung die Richtwerte der DIN EN 1990 [16] für die Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Zuverlässigkeit der Konstruktion im außergewöhnlichen Lastfall Brand im Mittel eingehalten werden.

Im Zuge der Überarbeitung von Kapitel 10 wurde das Sicherheitskonzept für die brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerken sinngemäß auf Nachweise der Entfluchtung im Brandfall übertragen. Diese gewinnen bei modernen Gebäudekonzepten mit offenen Verbindungen zwischen Gebäudebereichen und Geschossen und gleichzeitig größeren Menschenansammlungen in Genehmigungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Das Erreichen des Schutzziels „die Rettung von Menschen und Tieren ermöglichen“ gilt bei sog. Standardgebäuden und Standard-Sonderbauten als gewährleistet, wenn die präskriptiven Anforderungen der Landesbauordnung bzw. Sonderbauverordnung oder -Richtlinie hinsichtlich der Rettungsweggestaltung (z. B. maximale Länge, Breite) und ggf. zusätzlicher anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen bei der Planung berücksichtigt werden. Die in diesen Anforderungen implizierte Sicherheit ist aber nicht quantitativ fassbar und variiert je nach Art des Gebäudes und der Nutzung.

Leistungsorientierte Ansätze für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall spielen derzeit in Deutschland noch eine untergeordnete Rolle, weil es dafür weder einen rechtlichen Anspruch auf Anerkennung noch eine standardisierte oder genormte Vorgehensweise gibt. Albrecht hat in [17], [18] die vorhandenen leistungsorientierten Nachweismöglichkeiten für die Personensicherheit im Brandfall dargestellt (Bild 4) und in drei Hierarchiestufen analog zu den drei Stufen der brandschutztechnischen Nachweisverfahren nach Eurocode eingeteilt (Tabelle 2).

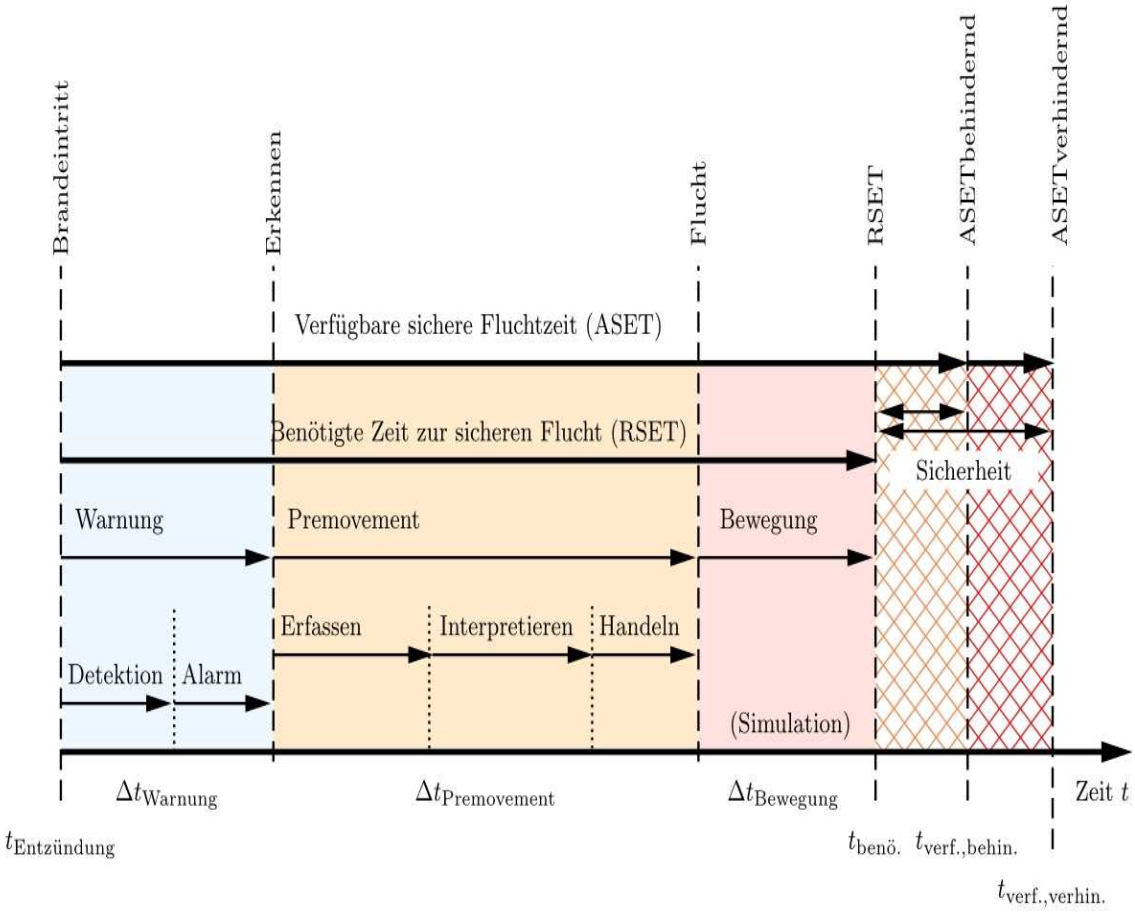


Bild 4 Schematische Darstellung der verschiedenen Zeitspannen bei der Entfluchtung im Brandfall nach [16]

Darauf aufbauend hat er einen probabilistischen Ansatz zur Quantifizierung der mit den Nachweisen erreichten Zuverlässigkeit entwickelt, mit dem z. B. Bemessungswerte für die maßgebenden Einflussgrößen einer risikogerechten Nachweisführung zur Personensicherheit (Bild 5) hergeleitet werden können. Dabei kann die erforderliche Zuverlässigkeit für die verschiedenen Nachweisstufen je nach Konservativität der Leistungskriterien und Modelle unterschiedlich gewählt und durch Vergleiche mit den derzeitigen präskriptiven Anforderungen kalibriert werden.

Tabelle 2 Hierarchiemodell für Nachweise der Personensicherheit [17], [18]

Stufe	Beschreibung	Gefordertes Fachwissen	Komplexität	Genauigkeit
Ia	Präskriptiv	Basiswissen Brandschutz	0	--
Ib	Kompensation	Basiswissen, Wirkungsweise von Brandschutzmaß-nahmen	0	--
IIa	Einhaltung von Kriterien	Kenntnisse über Zonenmodelle, selten CFD-Modelle, keine Evakuierungsmodelle	+	0
IIb	Nachweis mit einfachen Modellen	Kenntnisse über Zonenmodelle, selten CFD-Modelle, einfache Evakuierungsmodelle	++	+
III	Nachweis mit komplexen Modellen	vertiefte Kenntnisse über CFD- und Evakuierungsmodelle	+++	++
Legende: -- nicht quantifizierbar; 0 gering; + mittel; ++ hoch; +++ sehr hoch				

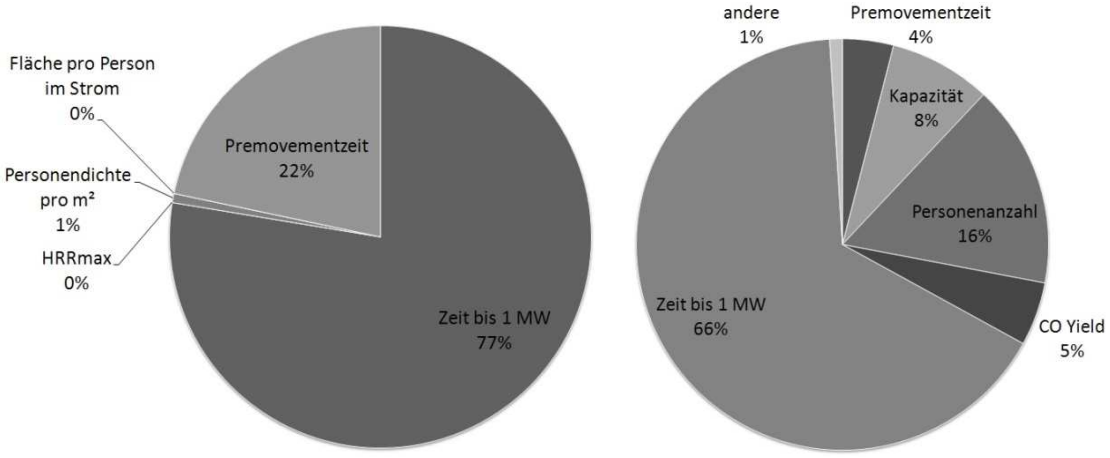


Bild 5 Maßgebende Einflussgrößen (Sensitivitäten) beim Nachweis der Entfluchtung mit den Leistungskriterien a) raucharme Schichthöhe = 2,5 m und b) FED-Wert = 0,3; dominierend ist in beiden Fällen die Brandentwicklungsgeschwindigkeit (= Zeit bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von 1 MW) (nach [17], [18])

Am Schluss von Kapitel 10 wird aufgezeigt, wie der probabilistische Ansatz und die Grundzüge des Sicherheitskonzeptes auf Nachweise zum Schutzziel „Durchführung wirksamer Löscharbeiten“ übertragen werden könnten. Für solche Nachweise fehlen jedoch derzeit akzeptierte Modelle und Leistungskriterien sowie passende Eingangsdaten aus der Brandstatistik. Angesichts kontroverser Diskussionen in der Praxis über die Notwendigkeit und den Umfang von Entrauchungsmaßnahmen zur Ermöglichung wirksamer Löscharbeiten der Feuerwehr wird dieses Thema im Referat 4 zukünftig intensiv diskutiert und in der folgenden Auflage des Leitfadens sicher ausführlicher behandelt werden.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Beschreibung des Gebäudes

In Anhang 2 des Leitfadens wird am Beispiel eines Hörsaal- und Bürogebäudes die Bearbeitung eines brandschutztechnischen Problems mit Hilfe des Leitfadens in allen Einzelschritten dargestellt. Das Hörsaalgebäude mit den Abmessungen L x B x H = 34 m x 29 m x 12 m ist eine Versammlungsstätte mit ca. 650 Sitzplätzen. Bei Sonderveranstaltungen können sich durch zusätzliche Stehplätze bzw. Sitzen auf Treppenstufen bis zu 1.000 Personen im Gebäude aufhalten. Die leicht ansteigende Bestuhlung aus Holz wird durch Gänge unterteilt. An der Rückseite der Bestuhlung ist eine Wandscheibe mit Öffnungsflächen angeordnet, durch die man zum Eingang des Hörsaals gelangt. Der Hörsaal wird über eine breite Treppe vom Atrium des Bürogebäudes aus erschlossen (Bild 6). Im Bereich der Bühne befinden sich zu beiden Seiten des Gebäudes Fluchttüren in der Fassade.

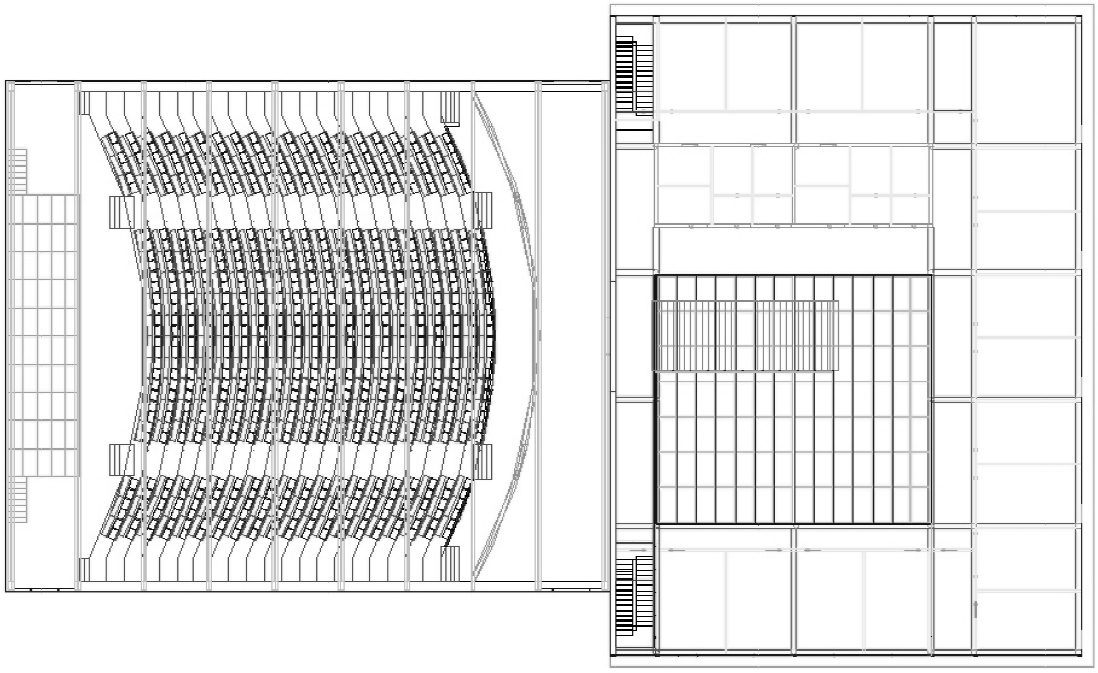


Bild 6 Grundriss des Hörsaal- und Bürogebäudes

Das Hörsaalgebäude besteht aus einer Stahlrahmenkonstruktion (Stützen und Riegel), die Rückwand als Übergang zum Atrium ist als Brandwand ausgeführt. Die Seitenwände sind als Stahl-Glas-Fassade ausgebildet. Das Dach besteht aus einer nichtbrennbaren Sandwichelementdecke. Für die Rauchableitung im Brandfall stehen öffenbare Fenster zur Zu- und Abluft auf beiden Seiten des Gebäudes zur Verfügung.

In den folgenden Beiträgen [6], [7], [8] werden jeweils als Anwendungsbeispiele die einzelnen Nachweisschritte im Rahmen eines schutzzielorientierte Brandschutzkonzeptes für das beschriebene Gebäude – von den Brandszenarien und Bemessungsbränden über die Brandsimulationsrechnungen und die brandschutztechnischen Bemessung der Konstruktion bis hin zur Personensicherheit und Entfluchtung – anwendungsbezogen dargestellt und damit die Ausführungen zu den Schutzzielen und Sicherheitsanforderungen in diesem Abschnitt konsequent weitergeführt.

Schutzziele

Die grundlegenden öffentlich-rechtlichen Schutzziele, die bei dem zu beurteilenden Gebäude durch entsprechende Maßnahmen sicherzustellen sind, können der Musterbauordnung (MBO) [19] entnommen werden. Demnach sind bauliche Anlagen so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in Stand zu halten, dass

1. der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand
2. die Rettung von Menschen und Tieren sowie
3. wirksame Löscharbeiten möglich sind.

Darüber hinaus fällt das Anwendungsbeispiel aufgrund einer Dimensionierung für eine Besucherzahl von weit mehr als 200 in den Geltungsbereich der Versammlungsstättenverordnung des jeweiligen Landes bzw. wie hier gezeigt in den Bereich der Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV) [20]. Hieraus ergeben sich im Hinblick auf das baurechtliche Schutzziel der Personensicherheit besondere Anforderungen an die Rettungswege (Anzahl, Länge und Breite). Demgegenüber stehen Erleichterungen, wenn durch eine größere Raumhöhe vorhanden ist und eine ausreichende Rauchableitung sichergestellt werden kann, sodass die Rettungswege ausreichend lange zur Verfügung stehen, d. h. rauchfrei gehalten werden können. Das Schutzziel einer lange zur Verfügung stehenden und ausreichend hohen rauchgasarmen Schicht ist als derart gewichtig zu betrachten, weil die Verhältnisse in der Heißgasschicht auch in größerer Entfernung vom Brandgeschehen für die Gesundheit und das Leben der Personen eine große Gefahr darstellen. Außerdem ist die rauchgasarme Schicht erforderlich, um einen sicheren und wirkungsvollen Einsatz der Feuerwehr zu ermöglichen. Bei der Betrachtung des Risikos stehen die Anzahl der Besucher und die Größe der Versammlungsräume im Vordergrund.

Gemäß [21] liegt der MVStättV ein von der MBO abweichendes Brandschutzkonzept zu Grunde, in dem eine Einteilung nach Gebäudeklassen in Abhängigkeit von der Größe der Nutzungseinheiten nicht zweckdienlich wäre. Vielmehr wird bei den Versammlungsstätten gefordert, dass die Bauteile im Hinblick auf die Belange des Brandschutzes grundsätzlich wie bei Gebäudeklasse 5 der MBO zu behandeln sind. Dies bedeutet, dass an sie grundsätzlich dieselben Brandschutzanforderungen gestellt werden wie bei Gebäuden mit einer Höhe von über 13 m und Nutzungseinheiten von jeweils mehr als 400 m^2. Damit werden die erhöhten Risiken für die Brandausbreitung und die Brandbekämpfung durch die Feuerwehr berücksichtigt.

Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers

Die erforderliche Zuverlässigkeit für die Bemessung der Konstruktion sowie für den Nachweis der Personensicherheit im Brandfall hängt von der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers in einer Nutzungseinheit eines Gebäudes und den damit verbundenen Schadensfolgen (Schäden an den Bauteilen bzw. Personen) ab.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers in einer brandschutztechnisch wirksam abgetrennten Nutzungseinheit mit der Grundfläche A in einem Bezugszeitraum von 1 Jahr kann mit Gl. (1) ermittelt werden:

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 \tag{1}$$

mit

p_1 jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit,

p_{21} Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Nutzer,

p_{22} Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr,

p_3 Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch eine automatische Löschanlage.

Die jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von mindestens einem Entstehungsbrand in der Nutzungseinheit kann alternativ nach Gl. (2) unter Annahme einer von der Grundfläche unabhängigen flächenbezogenen Brandentstehungshäufigkeit λ_1 oder nach Gl. (3) unter Berücksichtigung der (meist unterproportional) mit der Größe der Nutzungseinheit wachsenden Brandentstehungshäufigkeit bestimmt werden

$$p_1 = 1 - \exp(\lambda_1 \cdot A) \approx \lambda_1 \cdot A \tag{2}$$

$$p_1 = 1 - \exp(a \cdot A^b) \approx a \cdot A^b \tag{3}$$

mit

A Grundfläche der brandschutztechnisch abgetrennten Nutzungseinheit [m^2],

λ_1 mittlere Auftretensrate von Entstehungsbränden je Quadratmeter Grundfläche und Jahr [1/(m^2·a)],

a Basiswert der bezogenen Brandentstehungshäufigkeit je Quadratmeter und Jahr [1/(m^2·a)],

b Exponent, der von der Art der Nutzung und der Unterteilung der Nutzungseinheit (Raumzellen) abhängt.

Als dritte Alternative kann vereinfacht eine durchschnittliche jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 für eine typische Größe (d. h. durchschnittliche Grundfläche) des entsprechend genutzten Bereiches verwendet werden.

Davon haben die zweite und dritte Alternative Eingang in den Nationalen Anhang zum Eurocode 1 Teil 1-2 [15], dort in Anhang BB, gefunden mit den in Tabelle 3 wiedergegebenen Zahlenwerten.

Tabelle 3 Auftretenswahrscheinlichkeit p_1 von mindestens einem Entstehungsbrand je Nutzungseinheit und Jahr in Abhängigkeit von der Nutzung (nach [15])

Zeile	Nutzung	Auftretenswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		$p_1 \approx a \bullet A^b$		p_1
		a [1/(m^2 · a)]	b	[1/a]
		1	2	3
1	Wohngebäude	$4{,}8 \cdot 10^{-5}$	0,9	$3.0 \cdot 10^{-3}$
2	Bürogebäude	$5{,}9 \cdot 10^{-5}$	0,9	$6.2 \cdot 10^{-3}$
3	Krankenhaus, Pflegeheim	$7{,}0 \cdot 10^{-4}$	0,75	3,0E-1
4	Hotel, Beherbergungsstätte	$8{,}0 \cdot 10^{-5}$	1,0	$3{,}7 \cdot 10^{-2}$
5	Schule, Bildungseinrichtung	$2{,}0 \cdot 10^{-4}$	0,75	$4.0 \cdot 10^{-2}$
6	Verkaufsstätte, Geschäftshaus	$6{,}6 \cdot 10^{-5}$	1,0	$8{,}4 \cdot 10^{-3}$
7	öffentl. Versammlungsstätte (Theater, Kino) sonstige Versammlungsstätte (z.B. Diskothek)	$9{,}7 \cdot 10^{-5}$	0,75 1,0	$2.0\text{E} \cdot 10^{-2}$ $1.2 \cdot 10^{-1}$

Für die vorliegende Versammlungsstätte wird nach Tabelle 3 p_1 angesetzt mit

$$p_1 = 2{,}0 \cdot 10^{-2} \quad (4)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{21} berücksichtigt die Erstbekämpfung des Entstehungsbrandes durch die Nutzer, p_{22} gilt analog für die Löschmaßnahmen der alarmierten Feuerwehr. Nach englischen Brandstatistiken werden durchschnittlich 50 – 70 % der Entstehungsbrände durch die Nutzer gelöscht (konservativ p_{21} = 0,5), sodass die Feuerwehr entweder gar nicht alarmiert wird oder lediglich noch Nachlöscharbeiten durchführen muss.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{22} der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr hängt einerseits von der Eingreifzeit und Leistungsfähigkeit der Feuerwehr und andererseits von der Brandausbreitung bis zum Beginn der Löscharbeiten ab. Bei öffentlichen Feuerwehren ist von einer durchschnittlichen Eingreifzeit von ca. 15 Minuten auszugehen. Bei einer Werk- oder Betriebsfeuerwehr ist die Eingreifzeit in der Regel deutlich kürzer als bei der öffentlichen Feuerwehr und ggf. die Stärke und Ausrüstung an das spezielle Objekt angepasst, sodass die Ausfallwahrscheinlichkeit p_{22} geringer anzusetzen ist. Zahlenwerte p_{22} für die Brandbekämpfung durch eine öffentliche Feuerwehr bzw. eine Werkfeuerwehr sind in Tabelle 4 (in Anlehnung an [15]) angegeben. Zwischen den Eingreifzeiten darf linear interpoliert werden.

Tabelle 4 Ausfallwahrscheinlichkeiten p_{21}, p_{22} und p_3 der Brandbekämpfung (in Anlehnung an [15])

Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit		
	p_{21}	p_{22}	p_3
Nutzer	0,5		
öffentliche Feuerwehr mit Eingreifzeit < 15 min > 20 min		 0,2 0,5	
Werkfeuerwehr mit Eingreifzeit [1] < 10 min (vier Staffeln) < 10 min (zwei Staffeln)		 0,02 0,05	
automatische Löschanlage Sprinkleranlage nach VdS/CEA-Standard [2] in anderen Fällen Sonstige Wasserlöschanlage Gaslöschanlage			 0,02 0,05 0,1 0,1

[1] automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt

[2] Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung nach den anerkannten Regeln der Technik

Die Ausfallwahrscheinlichkeit p_3 einer automatischen Löschanlage hängt vom Auslegungsstandard ab. Empfohlene Zahlenwerte p_3 für verschiedene Löschanlagen können ebenfalls der Tabelle 4 entnommen werden.

Für das vorliegende Beispiel wird eine Erstbekämpfung durch die Nutzer mit p_{21} = 0,5 sowie eine Brandbekämpfung durch die öffentliche Feuerwehr mit einer Eingreifzeit von 15 min mit p_{22} = 0,2 angenommen. Insgesamt ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung zu $p_2 = p_{21} \cdot p_{22}$ = 0,1, was im Einklang steht mit früheren Annahmen in [12], [13].

Eine automatische Löschanlage ist in dem Hörsaalgebäude nicht vorhanden, sodass p_3 = 1,0 einzusetzen ist.

Damit ergibt sich die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers nach Gl. (1) zu

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 = 0{,}02 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}2 \cdot 1{,}0 = 0{,}004 \qquad (4)$$

Erforderliche Zuverlässigkeit für die Brandschutzbemessung der Konstruktion

Nach DIN EN 1990 [16] werden die verschiedenen baulichen Anlagen in Schadensfolgeklassen CC eingestuft, denen über Zuverlässigkeitsklassen RC ein erforderlicher Zuverlässigkeitsindex β und eine Versagenswahrscheinlichkeit p_f zugeordnet werden, jeweils bezogen auf 1 Jahr. Diese Werte gelten grundsätzlich für alle Lastfälle einschließlich der außergewöhnlichen Lastfälle wie Brand. Der Zuverlässigkeitsindex β und die Versagenswahrscheinlichkeit p_f sind verknüpft über die Funktion $\Phi(\ )$ der Standard-Normalverteilung

$$p_f = \Phi(-\beta) \qquad (5)$$

Für die außergewöhnliche Situation eines Brandes können aus der Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Schadenfeuer in der betreffenden Nutzungseinheit nach Gl. (1) bzw. Gl. (4) eine bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ im Brandfall und der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wie folgt bestimmt werden

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} \qquad (6)$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) \qquad (7)$$

Dabei ist Φ^{-1} die Umkehrfunktion der Standard-Normalverteilung.

Im Nationalen Anhang [15], Anhang BB, werden für Grenzzustände der Tragfähigkeit im Brandfall nutzungsspezifisch die Zuverlässigkeitsindizes β und Versagenswahrscheinlichkeiten p_f in Abhängigkeit von den zu erwartenden Schadensfolgen nach Tabelle 5 vorgegeben.

Tabelle 5 Richtwerte für den Zuverlässigkeitsindex β und die zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit p_f (Bezugszeitraum 1 Jahr) zur brandschutztechnischen Bemessung der Konstruktion bei verschiedenen Nutzungen (nach [15])

Zeile	Nutzung	Schadensfolgen					
		hoch		mittel		gering	
		β	p_f	β	p_f	β	p_f
		1a	1b	2a	2b	3a	3b
1	Wohngebäude, Bürogebäude und vergleichbare Nutzungen Gebäudeklassen nach MBO	4,7	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	4,2	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$ 4 + 5	3,7	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$ 2 + 3
2 3 4 5 6 7	Krankenhaus, Pflegeheim Beherbergungsstätte, Hotel Schule Verkaufsstätte Versammlungsstätte Hochhaus	5,2	$1{,}0 \cdot 10^{-7}$	4,7	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	4,2	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$
8	Landwirtschaftlich genutzte Gebäude	--	--	4,2	$1{,}3 \cdot 10^{-5}$	3,7	$1{,}1 \cdot 10^{-4}$

Für das Hörsaalgebäude als Versammlungsstätte gilt bei Voraussetzung mittlerer Schadensfolgen für das Haupttragwerk

$$p_f = 1{,}3 \cdot 10^{-6} \tag{8}$$

Damit errechnen sich die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} für die Bemessung im Brandfall wie folgt:

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-6}}{4{,}0 \cdot 10^{-3}} = 3{,}25 \cdot 10^{-4} \tag{9}$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1 - 3{,}25 \cdot 10^{-4}) = 3{,}41 \tag{10}$$

Teilsicherheitsbeiwerte für die Brandschutzbemessung der Konstruktion

Umfangreiche wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen in [14] haben gezeigt, dass die Brandlastdichte q aufgrund ihrer großen Streuungen maßgebenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit im Brandfall hat. Die nächstwichtigere Rolle spielt die maximale Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max}$ (HRR) in der Phase des vollentwickelten Brandes.

Es wird davon ausgegangen, dass für diese beiden Einflussgrößen der Brandeinwirkung jeweils 90 %-Quantile als charakteristische Werte definiert bzw. individuell ermittelt werden. Für die Bemessung werden Bemessungswerte eingesetzt, die sich aus den charakteristischen Werten durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten γ_{fi} errechnen. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden so festgelegt, dass die erforderliche Zuverlässigkeit nach Tabelle 5 im Mittel über alle Bauteile und Bemessungssituationen eingehalten und in der Regel um höchstens $\pm\Delta\beta_{fi} = 0{,}5$ unter- oder überschritten wird [16].

Setzt man (nach internationalen Statistiken) für die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrate eine Gumbel-Verteilung voraus, dann können die Teilsicherheitsbeiwerte mit Gl. (11) als Quotient aus dem Bemessungswert im Brandfall und dem charakteristischem Wert berechnet werden:

$$\gamma_{fi} = \frac{1 - V \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot \left[0{,}5772 + \ln\left(-\ln(\Phi(\alpha \cdot \beta_{fi}))\right)\right]}{1 - V \cdot \sqrt{6}/\pi \cdot \left[0{,}5772 + \ln\left(-\ln(0{,}9)\right)\right]} \tag{11}$$

Wird die Brandlastdichte q pauschal für eine Nutzung aus einer entsprechenden Tabelle in [15] entnommen, werden der Variationskoeffizient zu $V_q = 0{,}3$ und der Sensitivitätsfaktor zu $\alpha = 0{,}6$ angenommen. Für die maximale Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max}$ beträgt der Variationskoeffizient $V_Q = 0{,}2$ und der Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0{,}5$. Vereinfachend darf der Teilsicherheitsbeiwert für die maximale Wärmefreisetzungsrate unabhängig von β_{fi} mit $\gamma_{fi,Q} \approx 1{,}0$ angenommen werden.

Wird die Brandlastdichte im Einzelfall ermittelt (wie z. B. im Industriebau üblich), sind die zufälligen Streuungen kleiner. Dann kann der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} mit dem Variationskoeffizienten $V_q = 0{,}2$ und dem Sensitivitätsfaktor $\alpha = 0{,}5$ berechnet werden.

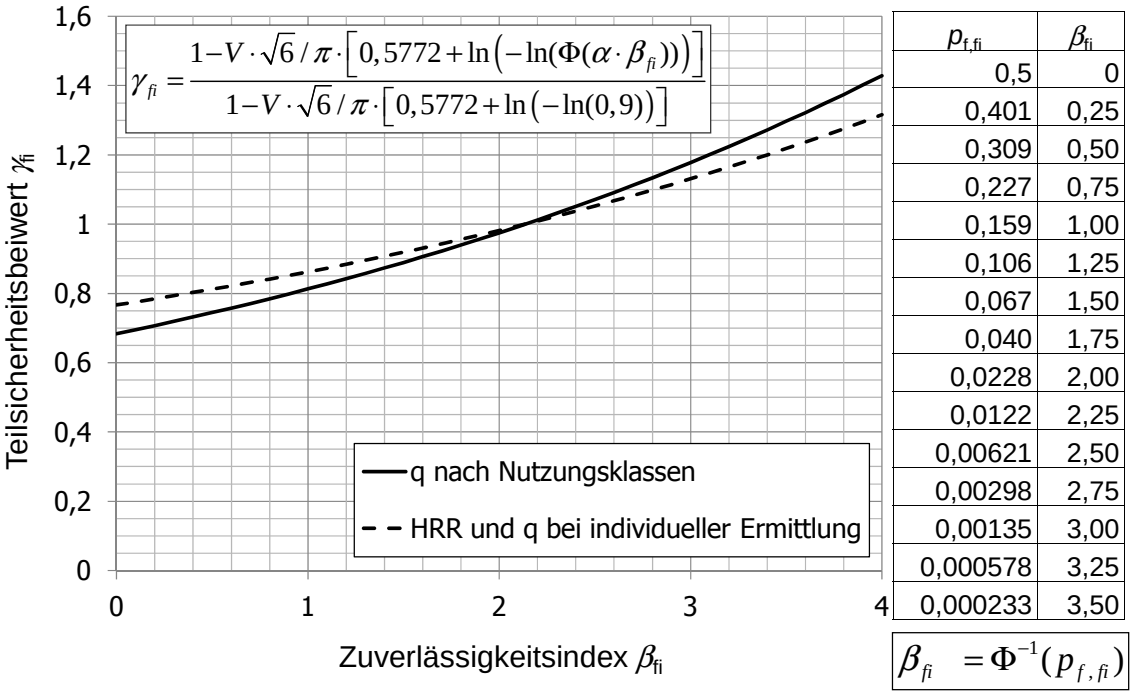
Die so ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte γ_{fi} für die Brandlastdichte und die Wärmefreisetzungsrate können aus Bild 7 in Abhängigkeit vom erforderlichen Zuverlässigkeitsindex β_{fi} abgelesen werden.

Mit $\beta_{fi} = 3{,}41$ nach Gl. (10) erhält man aus Bild 7

$\gamma_{fi,q} = 1{,}27$

$\gamma_{fi,Q} = 1{,}20$

Letztgenannter Wert für die Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}_{max}$ gilt auch für die Brandlastdichte q, sofern diese individuell für das Gebäude ermittelt wird (wie für das Hörsaalgebäude vorgesehen).



$p_{f,fi}$	β_{fi}
0,5	0
0,401	0,25
0,309	0,50
0,227	0,75
0,159	1,00
0,106	1,25
0,067	1,50
0,040	1,75
0,0228	2,00
0,0122	2,25
0,00621	2,50
0,00298	2,75
0,00135	3,00
0,000578	3,25
0,000233	3,50

Bild 7 *Teilsicherheitsbeiwerte für die Einflussgrößen eines Naturbrandes bezogen auf die definierten charakteristischen Werte (90 %-Quantil); durchgezogene Linie: Brandlastdichte nach Nutzungsklassen; gestrichelte Linie: Wärmefreisetzungsrate sowie Brandlastdichte bei genauer Ermittlung im Einzelfall*

Erforderliche Zuverlässigkeit für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall

Analog zum Nachweis der Tragfähigkeit der Konstruktion im Brandfall ist auch beim Nachweis, dass die Flucht der Personen aus der vom Brand betroffenen Nutzungseinheit vor dem Überschreiten von Grenzwerten der Brandwirkungen abgeschlossen werden kann, eine erforderliche Zuverlässigkeit einzuhalten. Diese ergibt sich wiederum aus einer für alle Lastfälle geltenden, von den Schadensfolgen abhängigen Versagenswahrscheinlichkeit p_f und der Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} des für die Entfluchtung maßgebenden Brandszenarios gemäß Gln. (6) und (7).

Bei der Versagenswahrscheinlichkeit p_f ist zu unterscheiden, ob die Flucht aus der betroffenen Nutzungseinheit durch die Brandwirkungen verhindert oder „nur“ behindert wird.

Eine Verhinderung der Flucht z. B. durch die toxische Wirkung der Brandgase bedeutet eine konkrete Gefahr für die Nutzer, die mit derjenigen bei einem brandbedingten Versagen baulicher Brandschutzmaßnahmen vergleichbar ist. Damit kann p_f im Prinzip aus Tabelle 5 entnommen werden. Für den Hörsaal als Versammlungsstätte erhält man bei mittleren Schadensfolgen wie in Gl. (8) $p_f = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ [1/a]. Im vorliegenden Fall sind angesichts der sehr konservativen Vorgabe des Leistungskriteriums FED ≤ 0,3 relativ geringe Schadensfolgen zu erwarten, sodass $p_f = 1{,}3 \cdot 10^{-5}$ akzeptabel erscheint.

Damit können die bedingte Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,fi}$ und der Zuverlässigkeitsindex β_{fi} für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall analog zu Gln. (9) und (10) berechnet werden.

Bei der Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} des maßgebenden Brandszenarios für die Entfluchtung in der Frühphase des Brandes gemäß Gl. (4) darf aber in der Regel nur die Erstbekämpfung des Brandes durch die Nutzer in Ansatz gebracht werden, während Löschmaßnahmen der Feuerwehr zu diesem Zeitpunkt noch nicht wirksam sind (p_{22} = 1,0). Somit ergibt sich für den Hörsaal

$$p_{fi} = p_1 \cdot p_{21} \cdot p_{22} \cdot p_3 = 0{,}02 \cdot 0{,}5 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 = 0{,}01 \tag{12}$$

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1{,}3 \cdot 10^{-5}}{1{,}0 \cdot 10^{-2}} = 1{,}3 \cdot 10^{-3} \tag{13}$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1 - 1{,}3 \cdot 10^{-3}) = 3{,}01 \tag{14}$$

Ist nur eine Behinderung der Flucht z. B. durch Unterschreiten einer geforderten Mindesthöhe der raucharmen Schicht oder einer Mindesterkennungsweite infolge Rauch zu erwarten, kann wegen der deutlich geringeren Schadensfolgen eine höhere Versagenswahrscheinlichkeit in Kauf genommen werden. In Kapitel 10 des Leitfadens wird für diesen Fall eine mittlere Versagenswahrscheinlichkeit $p_f = 1{,}9 \cdot 10^{-3}$ [1/a] empfohlen mit einer Bandbreite von max $p_f = 8{,}2 \cdot 10^{-3}$ bis min $p_f = 3{,}4 \cdot 10^{-4}$.

Mit der Auftretenswahrscheinlichkeit des maßgebenden Brandszenarios nach Gl. (12) ergibt sich dann

$$p_{f,fi} = \frac{p_f}{p_{fi}} = \frac{1{,}9 \cdot 10^{-3}}{1{,}0 \cdot 10^{-2}} = 1{,}9 \cdot 10^{-1} \tag{15}$$

$$\beta_{fi} = \Phi^{-1}(1 - p_{f,fi}) = \Phi^{-1}(1 - 1{,}9 \cdot 10^{-1}) = 0{,}88 \tag{16}$$

Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall

In Kapitel 10 des Leitfadens werden für die Entfluchtung im Brandfall exemplarisch ein Nachweis auf Basis des Leistungskriteriums „raucharme Schichthöhe ≥ 2,5 m“ (stellvertretend für eine Behinderung der Flucht) und ein Nachweis auf Basis des Leistungskriteriums „FED-Wert ≤ 0,3“ (für eine Verhinderung der Flucht) untersucht. Eine Zuverlässigkeitsanalyse lieferte die in Bild 5 dargestellten Anteile der Einflussgrößen an der resultierenden Varianz der Grenzzustandsgleichung *Z = ASET – RSET.* Dominierend ist in beiden Fällen die Brandentwicklungszeit t_g (= Zeit bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von 1 MW). Hierfür ist ein Bemessungswert oder alternativ ein charakteristischer Wert in Verbindung mit einem Teilsicherheitsbeiwert so zu bestimmen, dass die geforderte Zuverlässigkeit gemäß Gl. (14) oder (16) eingehalten wird.

Wenn die Brandentwicklungszeit als lognormal angenommen wird mit einem Variationskoeffizient V_{tg} = 0,2 und der charakteristische Wert $t_{g,k}$ (z. B. 300 s für die Versammlungsstätte) mindestens 50 s niedriger als der Mittelwert definiert ist, wird bei konservativer Vorgabe der Premovementzeit kein zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwert benötigt, um die erforderliche Zuverlässigkeit nach Gl. (16) beim Nachweis der raucharmen Schicht oder der Erkennungsweite sicherzustellen. Für den Nachweis des FED-Wertes muss dann der charakteristische Wert $t_{g,k}$ noch durch einen Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} = 1,4 dividiert werden, um die höhere Zuverlässigkeit nach Gl. (14) zu erreichen. In diesem Fall ist auch die maximale Personensaal in der Versammlungsstätte konservativ vorzugeben (im Hörsaalbeispiel mit max. 1000 Personen).

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Obwohl der vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes in der zurzeit vorliegenden 2. Auflage Mai 2009 die nach dem Stand der Technik verfügbaren Methoden und Eingangsdaten für die Berechnung natürlicher Brandverläufe und Brandeinwirkungen und für Nachweise der Standsicherheit brandbeanspruchter Tragwerke und der Personensicherheit im Brandfall in der Praxis gute Dienste leistet, hielt das vfdb-Referat 4 an einigen Stellen Anpassungen an neuere Erkenntnisse für angezeigt. Nach intensiven Diskussionen und genereller redaktioneller Überarbeitung soll der Leitfaden nun Ende 2013 als 3. Auflage des Technischen Berichts vfdb TB 04-01 wiederum im Internet veröffentlicht und dann auch ins Englische übersetzt werden.

Nach einer Übersicht über die im Wesentlichen unveränderte Struktur und Gliederung des Leitfadens und die vorgenommenen Anpassungen in der 3. Auflage wird kurz auf einige wesentliche inhaltliche Änderungen in einzelnen Kapiteln hingewiesen. Etwas genauer wird auf die Erweiterungen des Sicherheitskonzeptes in Kapitel 10 des Leitfadens im Hinblick auf Nachweise der Personensicherheit im Brandfall eingegangen und es wird darauf hingewiesen, dass grundsätzlich auch eine Übertragung des Sicherheitskonzeptes auf Nachweise zum Schutzziel „wirksame Löscharbeiten“ möglich ist.

Abschließend werden die Vorgaben in Kapitel 3 zu den Schutzzielen und in Kapitel 10 zum Sicherheitskonzept im Brandfall auf das im Anhang 2 des Leitfadens ausführlich behandelte Beispiel eines Hörsaal- und Bürogebäudes angewandt. Dieses wird in weiteren Beiträge der Fachtagung fortgesetzt.

LITERATUR

[1] 9. Internationales Brandschutz-Symposium „Ingenieurmethoden für die Brandsicherheit“, München, 25. und 26. Mai 2001, Kurzreferate. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) und D. Hosser (Hrsg.), Braunschweig 2001.

[2] 10. Internationales Brandschutz-Symposium „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“, Hannover, 6. und 7. Juni 2005, Kurzreferate. Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb) und D. Hosser (Hrsg.), Braunschweig 2005.

[3] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04/01, 1. Auflage Mai 2006. Altenberge, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. und D. Hosser (Hrsg.), 2006.

[4] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Be¬richt vfdb TB 04-01, 2. Auflage Mai 2009. Altenberge, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. und D. Hosser (Hrsg.), 2009.

[5] Hosser, D.: Fortschreibung des vfdb-Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes. In: Jahresfachtagung 2013 der vfdb, Weimar, 27. bis 29. Mai 2013, Tagungsband. Altenberge: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), 2013.

[6] Wiese, J.; Riese, O.: Aktualisierungen bei den Branszenarien, Bemessungsbränden und Simulationsmodellen. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[7] Zehfuß, J.; Paliga, K.: Aktualisierungen bei den Brandschutznachweisen für Bauteile und Tragwerke. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[8] Schneider, V.; Forell, B.: Aktualisierungen bei den Nachweisen zur Personensicherheit und Entfluchtung. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[9] Schleich, J.-B.; Franssen, J.-M.; Twilt, L. et al.: Development of design rules for steel structures subjected to natural fires in large compartments, Final Report EUR 18868, Simulation of the fire tests of the “Parc des Expositions, Paris”, 1999.

[10] Dehne, M.; Klinzmann, C: Berücksichtigung anlagentechnischer und abweh¬render Maßnahmen bei Brandschutznachweisen mit Ingenieurmethoden. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage ‘09, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 208, 2009, ISBN 978-3-89288-191-9.

[11] Purser, D. A.: Assessment of hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th Ed. 2008.

[12] Bub, H.; Kersken-Bradley, M.; Hosser, D.; Nowak, H.; Schneider, U.; Schubert, K.-H.: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. NABau im DIN, März 1979.

[13] Bub, H.; Hosser, D.; Kersken-Bradley, M.; Schneider, U.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz. Berlin: Verlag E. Schmidt, 1983.

[14] Hosser, D.; Weilert, A.; Klinzman, C.; Schnetgöke, R.; Albrecht, C.: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, November 2008, IRB Bauforschung, Band T 3221.

[15] DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1.2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.

[16] DIN EN 1990:2002-10, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.

[17] Albrecht, C.: Grundlagen und Sicherheitskonzept für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011, 27. und 28. September 2011, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 214, 2011, ISBN 978-3-89288-198-8.

[18] Albrecht, C.: A risk-informed and performance-based life safety concept in case of fire. Dissertation TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 217, 2012, ISBN 978-3-89288-202-2.

[19] ARGEBAU: Musterbauordnung – MBO –, Fassung November 2002, zuletzt geändert im Mai 2012.

[20] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV), ARGEBAU Fachkommision Bauaufsicht, Fassung Juni 2005,

[21] Begründung und Erläuterung zur Muster-Versammlungsstättenverordnung (MVStättV), ARGEBAU Fachkommission Bauaufsicht, Fassung Juni 2005.

AKTUALISIERUNGEN BEI BRANDSZENARIEN, BEMESSUNGSBRÄNDEN UND SIMULATIONSMODELLEN

Jürgen Wiese
Halfkann + Kirchner, Erkelenz
Olaf Riese
Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA), Braunschweig

EINLEITUNG

Anlässlich der Braunschweiger Brandschutz Tage 2009 wurde u. a. über die seinerzeitige Fortschreibung des Kapitels 4 „Brandszenarien und Bemessungsbrände“ des vfdb-Leitfadens (2. Auflage, 2009) berichtet [1]. Damals wurde insbesondere auf die sicherheitstechnische Bedeutung der Festlegung des „Lastfalls Brand“ für ingenieurmäßige „Naturbrandnachweise“ ausführlich eingegangen und es wurden Wechselwirkungen mit den Schutzzielen und den Sicherheitsbeiwerten erläutert. Diesen grundlegenden Betrachtungen ist auch aus heutiger Sicht nichts hinzuzufügen.

Der diesjährige Beitrag widmet sich vorzugsweise der Einbindung der Bemessungsszenarien in die Systematik des vfdb-Leitfadens [2] und den Fortschreibungen des Kapitels 4 in den Jahren 2010 bis 2013. Diese betreffen, neben einer redaktionellen Überarbeitung und einer Überprüfung und Ergänzung der Zahlenwerte, vor allem folgende Punkte:

- die Vereinheitlichung und weitergehende Erläuterung der verwendeten Begriffe,
- Hinweise zur Berücksichtigung des Windes als Teil der Bemessungsszenarien,
- einen Vorschlag zur Berücksichtigung von Löschmaßnahmen im Rahmen der Bemessungsbrände,
- die Aktualisierung der „normativen Bemessungsbrände“ und den Abgleich mit Festlegungen des Eurocode 1 [3], [4] für die Heißbemessung von Bauteilen
- die vertiefende Befassung mit dem Flashover-Phänomen bei der Brandentwicklung.

Zahlenwerte, die im vfdb-Leitfaden im Zusammenhang mit der Festlegung von Bemessungsbränden enthalten sind, sind als Orientierungswerte – nicht als normative Vorgaben – zu verstehen und zu verwenden.

Im zweiten Teil dieses Beitrags wird das Anwendungsbeispiel des vfdb-Leitfadens aus der 1. und 2. Auflage (ein Hörsaalgebäude) wird unter Berücksichtigung der zwischenzeitlichen Fortschreibungen des Kapitels 4 aktualisiert.

OBJEKTSPEZIFISCHE ENTWURFSPARAMETER UND BRANDSZENARIEN

Gebäudeparameter

Im Gegensatz zur Brandentwicklung im Freien bestimmen bei Bränden in Gebäuden deren Kubatur und Bauart die Brandentwicklung z. T. entscheidend mit. Wichtig sind insbesondere für fortentwickelte Brandstadien die Bedingungen für den Luftaustausch zwischen dem Brandraum und der äußeren Umgebung (Öffnungen in dem Umfassungsbauteilen; Ventilationsbedingungen für das Brandgeschehen) sowie die Raumhöhe und das Raumvolumen (Rauchgas-Reservoir, Wärmestrahlung aus der Heißgasschicht auf brennbare Gegenstände). Demgegenüber als sekundär wirken sich thermische Eigenschaften der Umfassungsbauteile auf die Bandentwicklung im Brandraum aus.

Brandlasten

Mit der Nutzung unmittelbar verbunden sind die brennbaren Stoffe in ihrer Art, Masse, Verteilung und Anordnung (Brandlasten) sowie in ihren stofflichen Zusammensetzungen. Letzteres gilt insbesondere für Fragestellungen der Personensicherheit, bei denen die Quantifizierung von Brandprodukten und die Verteilung von Rauch und toxischen Zersetzungsprodukten wesentlich sind. Ferner ergeben sich ebenfalls aus der Nutzung für anzunehmende Störfälle „bekannte“ und „sehr unwahrscheinliche“ Zündquellen und Zündinitiale für den außergewöhnlichen Lastfall Brand. Diese Aspekte werden im Zusammenhang mit einer Gefährdungsbewertung erhoben und der Festlegung von Bemessungsszenarien zugrunde gelegt. Neben den Brandlasten aus der Nutzung sind auch die brennbaren Stoffe der Konstruktion und des Innenausbaus der Gebäude zu berücksichtigen (insbesondere bei der Verortung der Brandentstehung).

$$Q = \sum_i (M_i \cdot H_{u,i}) \qquad (1)$$

Mit

Q Gesamt-Brandlast für alle (i) brennbaren Stoffe im Beurteilungsbereich in kWh/m^2

M Masse der jeweiligen brennbaren Stoffe in kg

H_u unterer Heizwert der jeweiligen brennbaren Stoffe in kWh/kg

Werte für H_u können der Fachliteratur (insbesondere [5]) entnommen werden.

Damit die Freisetzung von Rauch und toxischen Verbrennungsprodukten ausreichend realitätsnah rechnerisch abgeschätzt werden kann, werden für die Festlegung der maßgeblichen Brandszenarien die stofflichen Zusammensetzungen der brennbaren Stoffe nach folgenden Masseanteilen benötigt (Tabelle 1 in Anlehnung an Kap. 8 des Leitfadens).

Tabelle 1 Einteilung der Brandlasten in Stoffgruppen

Stoffgruppe nach Kap. 8 des vfdb-Leitfadens		Beispiele
a.	Zellulose:	Holz bzw. Papier
b.	Kunststoff A: („schwach rußend“)	Polyethylen (PE)
c.	Kunststoff B: („stark rußend“)	Polystyrol (PS)
d.	Halogenierte Kunststoffe:	Polyvinylchlorid (PVC)

Den Berechnungen ist bei Mischbrandlasten ein gewichteter Mittelwert unter Berücksichtigung der „stoffspezifischen Abbrandraten“ zugrunde zu legen. Rauchausbeuten für den narkotisierend wirkenden Rauchbestandteil Cyanwasserstoff (HCN) sind bei Vorhandensein stickstoffhaltiger Brandlasten, wie beispielsweise Polyurethan, Nylon oder Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), zu berücksichtigen. Nähere Informationen zur Beurteilung und Berücksichtigung von stofflichen Eigenschaften der Brandlasten sind im Kap. 8 des vfdb-Leitfadens beschrieben.

Brandbekämpfung und Feuerlöschanlagen

Maßnahmen der Brandbekämpfung (Feuerlöschanlagen aber auch die manuelle Brandbekämpfung durch die Feuerwehr und ggf. durch betriebliche Einsatzkräfte) nehmen unmittelbaren Einfluss auf die Brandentwicklung. Sie werden unter den Bedingungen des Einzelfalls in die Festlegung der Brandentwicklung einbezogen. Sofern dies aus sicherheitstechnischen Überlegungen nicht möglich oder nicht gewollt ist, finden diese Einflüsse ihre Berücksichtigung über das Sicherheitskonzept der Nachweisführung mit entsprechenden Sicherheitsbeiwerten.

Brandort

Für viele Nachweise ist die Verortung der Brandentstehung im Brandraum von herausragender Bedeutung. Brandherde an Raumwänden oder in Raumecken führen zu signifikant anderen Brandverläufen als Brandherde in Raummitte. Brände können unter Galerien oder in Nebenräumen mit Raumverbund entstehen. Brände können an Stellen mit großer Brandlastdichte (lokaler Brandbelastung) und großer Brandausbreitungsgeschwindigkeit entstehen oder in Bereichen mittlerer lokaler Brandbelastung und mittlerer Brandausbreitungsgeschwindigkeit. Brandentstehungsorte können im Einflussbereich von Gebäudeöffnungen (Zuluftströmung) oder fernab davon entstehen.

Das Zündinitial beeinflusst die Brandentwicklung in der Anfangsphase eines Brandverlaufs erheblich. Insofern sind die anzunehmenden Brandursachen von Bedeutung für die Beurteilung von Bränden in dieser Phase. Damit geht einher die Möglichkeit zur und Geschwindigkeit der anzunehmenden Brandausbreitung. Fragestellungen in Verbindung mit Brandstiftungen sind in diesem Zusammenhang als Sonderfälle zu bezeichnen.

Sonstige Parameter

Weitere Entwurfsparameter können sich beispielsweise aus der Berücksichtigung von Umwelt- und Witterungsbedingungen (Sommer / Winter, Wind / Luftdruck) oder aus der betrieblichen Gefahrenabwehrplanung (Erstbrandbekämpfung, Prozessunterbrechungen, Öffnung und Schließung von Gebäudeöffnungen) ergeben.

Die möglichen und denkbaren Einflüsse auf das lokale Brandgeschehen sind äußerst vielschichtig und zahlreich. Für die sicherheitstechnische Bewertung von Gebäudeentwürfen müssen Annahmen getroffen werden, die einerseits den Charakter der jeweiligen Situation ausreichend realitätsnah wiedergeben, die aber andererseits auch „auf Dauer ausreichend auf der sicheren Seite“ liegende Beurteilungen ermöglichen. Daher kommt es nicht primär darauf an, ein Höchstmaß an Realitätsnähe für alle denkbaren Ereignisse anzustreben, sondern es ist vielmehr wichtig, die Risikobewertung anhand von charakteristischen Eigenschaften der jeweiligen Gesamtsituation durchzuführen.

Datenbasis zur Berechnung der Wärmefreisetzungsrate

Der Leitfaden enthält im Kapitel 4 Empfehlungen für die Anwendung von Daten über die brennbaren Stoffe bis zur Festlegung von Brandverläufen. Als Rechenbasis sollten eigentlich Versuchsergebnisse verwendet werden, die für eine mit den örtlichen Verhältnissen vergleichbare Brandlast-Anordnung, bei vergleichbaren Zündquellen und Raumverhältnissen ermittelt worden sind. Da solche objektspezifischen Daten in der Regel nicht vorliegen oder ermittelt werden können, werden unter den Aspekten des Realitätsbezuges und der Sicherheit unterschiedliche Kenntnisstände über die brennbaren Stoffe im Hinblick auf die Verwendung als Rechengrundlage bewertet (Tabelle 2).

Annahmen, die durch Gebäude- oder Nutzungsänderungen nicht mehr erfüllt werden, können die Risiken unterschätzen. Die Festlegungen des Lastfalls „Brand“ sollen daher erkennbare, spätere Veränderungen nach Möglichkeit bereits berücksichtigen. Gebäude- und Nutzungsänderungen erfordern mindestens eine Kontrolle der Annahmen und Festlegungen zum Brandgeschehen für die ingenieurgemäßen Brandsicherheitsnachweise. Eine Dokumentation, die diese Kontrolle auch zu späteren Zeitpunkten möglich macht, ist daher zwingend erforderlich.

Tabelle 2 Anwendungshinweise für Daten zur Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate (exemplarisch)

Realitätsbezug	Verfügbare Informationen	Methode	Anwendungshinweise
sehr hoch	Raumkonfiguration Brennbare Stoffe in der zu beurteilenden Lageranordnung Ventilationsbedingungen, Zündquelle	objektspezifische, reproduzierbare Brand- versuche mit risikogerechtem Versuchsaufbau und verwendbaren Messergebnissen	direkt verwendbares Zahlenmaterial ist vorhanden
hoch	Stoffdaten der Brandlasten in der zu beurteilenden Lageranordnung Anordnung der Brandlasten im Raum	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar
mittel	Annahmen zur Brandentwicklung für die Stoffgruppe	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar, unter verschärfenden Rechenannahmen oder Sicherheitsbetrachtungen
gering	Pauschale Angaben zur Nutzungsart des Raumes mit den typischen Brandlasten	Berechnung der zeitlichen Wärmefreisetzung	im Rahmen von Parameterstudien verwendbar, auf der sicheren Seite liegende Schätzwerte verwenden

Schritte zur Festlegung maßgebender Brandszenarien

Der Leitfaden empfiehlt auch in der 3. Auflage ein schrittweises Vorgehen bei der Festlegung maßgeblicher Bemessungs-Brandszenarien, bei dem u. a. die vorstehend aufgeführten Parameter hinterfragt und festgelegt werden:

1. Lage des Brandherdes auswählen
2. Brandlast und Brandentstehung beschreiben
3. Ventilationsbedingungen des Brandraumes beschreiben

4. Art des Brandes festlegen (Brandregime)
5. Einfluss der Anlagentechnik auf den Brandverlauf und das Brandszenarium
6. Brandbekämpfung durch die Feuerwehr
7. Abschätzung des zu erwartenden Schadens

Kriterium für die Auswahl ist das erwartete Schadenausmaß über die Lebensdauer des Gebäudes. Dabei wird – gedanklich – die Auftretenswahrscheinlichkeit der Ereignisse mit den erwarteten Schadenshöhen multipliziert.

BEMESSUNGSBRÄNDE

Bemessungsbrände legen jeweils eine mathematische Formulierung einer angenommenen, theoretischen Brandentwicklung fest. Sie stellen Eingabewerte bzw. Vorgaben für Brandsimulationen dar und sind als Vorgaben notwendig, weil sich das Brandgeschehen selber zurzeit noch nicht hinreichend zuverlässig rechnerisch vorherbestimmen lässt. In der Regel wird die Brandentwicklung als Wärmefreisetzungsrate (engl.: „heat release rate“) über der Branddauer dargestellt und verwendet. Der Leitfaden enthält zur Verdeutlichung die Graphik in Bild 1.

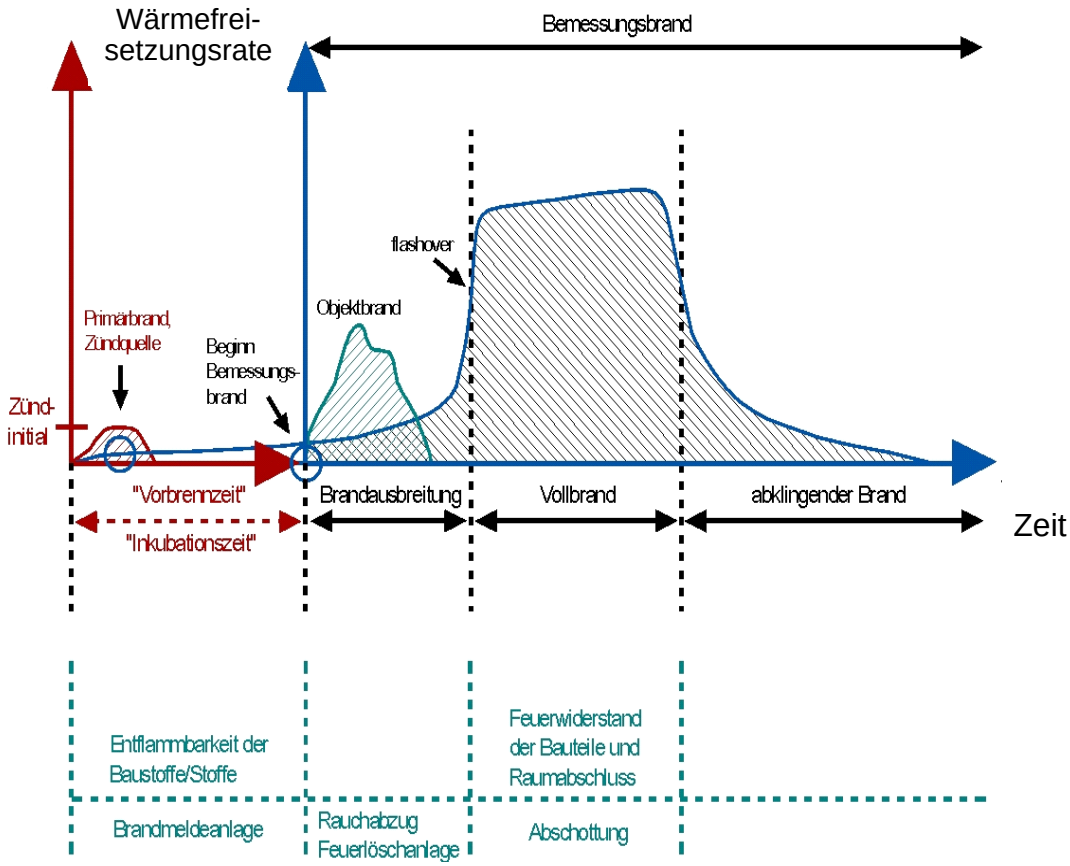


Bild 1 *Brandentwicklungsphasen beim „natürlichen Brand“ (schematisierter Zeitverlauf der Wärmefreisetzungsrate)*

Vorbrennphase

Die erste Phase der Brandentwicklung ist die Zeitspanne zwischen der bestimmenden Wirkung der Zündquelle auf die Entflammung und Brandausbreitung bis zur selbständigen Brandausbreitung über den Ort der Brandentstehung hinaus. Diese Brandphase lässt sich kaum zuverlässig sowohl in ihrer Brandintensität als auch in ihrer zeitlichen Dauer abschätzen. In dieser Brandphase können auch einzelne Gegenstände abbrennen, ohne dass dies zu einer wieteren Brandausbreitung führt. Diese Brandphase wird als Inkubationszeit oder Vorbrennzeit bezeichnet.

Die Vorbrennphase wird in der Praxis häufig vernachlässigt. In diesen Fällen wird der Brandverlauf von Beginn an mit einer Brandausbreitung gerechnet, was für die Beurteilung der Personensicherheit in der Regel sehr weit auf der sicheren Seite liegt, weil die Brandwirkungen beim angenommenen Brandbeginn überschätzt werden. Für eine näherungsweise Berücksichtigung der Vorbrennphase (einschließlich von „Schwelbränden“ und von „Kleinstbränden“) empfiehlt der vfdb-Leitfaden den Ansatz einer konstanten, von der Vorbrenndauer unabhängigen Wärmefreisetzungsrate. Der Brandschutzingenieur entscheidet über die Größe und über die anzunehmende Vorbrenndauer anhand seiner Brandschutz-Planung.

Das Unterschätzen bzw. das Vernachlässigen der Vorbrennphase kann im Einzelfall – insbesondere bei kleinen Räumen – Auswirkungen auf die Bewertung der Brandsicherheit haben:

- Wenn bereits während der Vorbrennphase die Brandentstehung durch automatische Brandmeldeanlagen erkannt wird und Räumungs- und Brandbekämpfungsmaßnahmen eingeleitet werden können, wird die verfügbare Zeit für die Räumung betroffener Gebäudeabschnitte bis zum Erreichen von Erträglichkeitsgrenzen für Personen und Einsatzkräfte unterschätzt und rechnerisch „verschenkt“.
- Dadurch werden ggf. Maßnahmen beispielsweise für die Rauchableitung zur Sicherstellung der Nutzbarkeit von Rettungswegen überdimensioniert.
- Für Situationen ohne diese effektive Brandfrüherkennung werden Gefahren durch Brandrauch – insbesondere in sehr kleinen Räumen – unterschätzt.
- Kleinbrände, die auch keine weitere Brandausbreitung zur Folge haben, können Personen und rauchempfindliche Sachwerte und Einrichtungen stark schädigen.

Bei der Bewertung der Personensicherheit sind in den genannten Situationen somit zwei nicht berechenbare, lediglich grob abschätzbare sicherheitsrelevante Kenngrößen zu bewerten:

a) Dauer und Wärmefreisetzungsrate der Vorbrennphase mit der Freisetzung und Ausbreitung von Brandrauch und Brandprodukten,

b) Dauer der sogenannten „Premovementzeit“, die die Personen bis zum Beginn der aktiven Räumung verstreichen lassen.

Während sich zur Abschätzung der Premovementzeit international bereits tabellierte Richtwerte etabliert haben[1], können äquivalente Richtwerte für die Vorbrennzeit noch nicht empfohlen werden. Für die Beurteilung der Brandsicherheit größerer Räume kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Kleinstbrände der Vorbrennzeit in der Regel auch nicht ausreichen, um automatische Brandmeldeanlagen auszulösen, sodass in diesen Fällen die zuvor für kleine Räume beschriebenen Auswirkungen nicht zutreffen.

Zündinitiale

Das Zündinitial wird in der Regel als „ortsfremder Körper“ aufgefasst und stellt die Verbindung zwischen der Zündquelle und den nutzungsspezifischen Brandstoffen her. In Tabelle 3 ist eine Auswahl von Zündinitialen mit zeitabhängigen Wärmefreisetzungsraten nach nationalen und internationalen Quellen zusammengestellt.

Tabelle 4 enthält entsprechende Angaben für weitere Objekte mit geringer Wärmefreisetzungsrate.

Tabelle 3 Exemplarische Auswahl von Zündinitialen

Zündinitial	Wärmefreisetzungsrate und Zeitbezug	Quelle
Papierkissen, d. h. Knüllpapier einer Zeitung	10 kW nach 1 Minute, Brennzeit: 8 Minuten	DIN E 5510-2
Reisegepäck Reisetasche	75 bis 150 kW nach 4 - 6 Minuten, Brennzeit: 15 Minuten	prEN 45545-2
Papierkorb	30 kW nach Minuten, Brennzeit: 15 Minuten	SBI-Gerät nach EN 13823
Brandflasche, Benzin	ca. 200 kW, Brennzeit: 3 Minuten	[6]
Brandschacht	20 kW, Prüfzeit: 10 Minuten	DIN 4102–1

[1] Diese Werte sind auch im Leitfaden enthalten und werden zur Anwendung empfohlen.

Tabelle 4 Objekte mit geringer, zeitlich begrenzter Wärmefreisetzung

Objekt	Wärmefreisetzungs-rate [kW]	Zeitintervall [s]
Kopiergeräte	600 - 800	2.500 - 2.800
Papierkorb	30 - 45	180 - 450
PC-Bildschirm	45	900 - 1.500
Reisetasche	55 - 100	150 - 300
Schreibtischsessel 2	65	200 – 450
PUR-Weichschaummatratze (deutsche Produktion)	190	60 – 850
Federkernmatratze (U.S.-Produktion)	700	220 - 350

Zündinitiale bestimmen weitgehend, ob sich brennbare Gegenstände unter den jeweiligen Bedingungen überhaupt entzünden lassen und ob es zu einem gefährlichen Brand kommt. Ferner beeinflussen sie wesentlich die Brandentwicklungsgeschwindigkeit in der Brandausbreitungsphase. Sie können entscheidend für die Verwendbarkeit der Ergebnisse von Raumbrandversuchen sein.

Brandausbreitungsphase

Auch die Brandentwicklung in der Brandausbreitungsphase lässt sich kaum realitätsnah beschreiben, wenn keine objektspezifischen experimentellen Erkenntnisse verfügbar sind.

In der Praxis behilft man sich zunächst durch eine Klassifizierung von Nutzungsarten, denen ähnliche charakteristische Brandentwicklungsgeschwindigkeiten (zeitliche Zunahme der Wärmefreisetzungsrate) zugewiesen werden. Für die Brandentwicklungsgeschwindigkeiten „langsam“, „mittel“, „schnell“ und „sehr schnell“ haben sich im internationalen Umfeld Rechenwerte etabliert, die auch im vfdb-Leitfaden wiedergegeben sind. Die Wärmefreisetzungsrate wächst quadratisch mit der Branddauer, bis alle Brandlasten vom Feuer erfasst sind (brandlastgesteuertes Brandregime) oder bis die verfügbare Verbrennungsluft erschöpft ist (ventilationsgesteuertes Brandregime). Die charakteristischen „Regelwerte“ bezeichnen die Brandentwicklungsdauer in s bis zum Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von ca. 1 MW. Diese Regel kann auch jenseits der 1 MW-Grenze angewendet werden.

[2] teils mit sehr starker Rauchentwicklung brennend

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 = \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g} \right)^2 \quad (2a)$$

$$\alpha = \dot{Q}_0 / t_g^{\,2} \quad (2b)$$

mit

$\dot{Q}$ Wärmefreisetzungsrate in kW zum Zeitpunkt t [s],

t Brandentwicklungszeit in s,

α Brandentwicklungsfaktor in kW/s^2,

$\dot{Q}_0$ Wärmefreisetzungsrate in kW, die nach der Branddauer t_g erreicht wird,

t_g charakteristische Brandentwicklungsdauer in s, nach der $\dot{Q}_0$ erreicht wird.

Aus eigenen oder veröffentlichten Versuchen können und dürfen (bei übertragbaren Versuchsbedingungen) auch andere Brandentwicklungsfaktoren (für die Brandentwicklungsgeschwindigkeit) verwendet werden, als für die klassifizierten Situationen angegeben sind.

Dieser Rechenansatz für die Wärmefreisetzungsrate während der Brandausbreitungsphase entspricht einer gleichmäßigen Wärmefreisetzungsrate je Flächeneinheit über der Grundfläche des Raumes mit konstanter, radialer Ausbreitungsgeschwindigkeit v_{aus} [m/min] der Flammenfront (kreisförmige Brandfläche).

Der obige t²-Ansatz lässt danach auch in ein geometrisches Brandmodell umrechnen:

$$\alpha = \dot{q} \cdot \pi \cdot v^2_{aus} \quad (3)$$

mit

$\dot{q}$ flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m^2 bezogen auf die Einheitsgrundfläche, über der sich die Brandlast befindet,

v_{aus} theoretische radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront über der Grundfläche (kreisförmige Brandfläche).

Anhaltswerte für v_{aus} [m/min] und für $\dot{q}$ [kW/m²] werden im Leitfaden angegeben. Bei der Auswahl von Rechenwerten für $\dot{q}$ ist darauf zu achten, dass es sich hierbei um die flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate über der Grundfläche handelt.

$$\dot{Q} = H_u \cdot \dot{m} \cdot \chi \quad (4a)$$

$$\dot{m} = A_F \cdot v_{ab} \quad (4b)$$

mit

H_u unterer Heizwert (Mittelwert der brennbaren Stoffe) in kJ/kg bzw. kWs/kg,

$\dot{m}$ Abbrandrate der brennbaren Stoffe in kg/s über der Grundfläche des Brandes A_F

χ Verbrennungseffektivität [-],

A_F Grundfläche des Brandes in m^2 zum Zeitpunkt t [s],

v_{ab} Abbrandgeschwindigkeit in kg/m^2s, bezogen auf die Grundfläche des Brandes A_F.

Die nachfolgende Tabelle 5 gibt die zusammengehörenden Benennungen der Brandentwicklungsgeschwindigkeit, die Brandentwicklungsfaktoren α und die Brandentwicklungsdauern t_g wieder. In der Praxis und in normativ geregelten Bemessungsbränden verwendete Brandausbreitungsgeschwindigkeiten v_{aus} werden in dieser Tabelle informativ den vorgenannten Werten gegenübergestellt.

Tabelle 5 Standardwerte für α und t_g nach

Brandentwicklungs-geschwindigkeit: Benennung	Brandentwick-lungsfakor α [kW/s²]	Brandentwicklungsdauer t_g [s] 1)	v_{aus} [cm/min]
langsam	0,00293	600	6 - 12
			20 - 30
mittel	0,01172	300	35 - 50
schnell	0,04689	150	70 - 120
sehr schnell	0,18760	75	180 - 300

1) Die Werte für die Brandentwicklungsfaktoren α wurden für eine Wärmefreisetzungsrate von 1000 BTU/s ermittelt und normiert. Dabei gilt folgende Umrechung:
1 BTU (British Thermal Unit) ≈ 1055,056 J; 1 BTU/s ≈ 1055,056 W.
Die Werte für α finden sich im informativen Anhang von NFPA 92 B und wurden im internationalen Regelwerk vielfach übernommen.

Als “Quasi-Materialkennwerte“ aus Abbrandversuchen an brennbaren Stoffen ermittelte Werte beziehen sich in der Regel auf die freien Oberflächen dieser Stoffe und werden im vfdb-Leitfaden als flächenbezogene Wärmefreisetzungsrate $\dot{q}''$ bezeichnet. Ein allgemeingültiges Modell für die Umrechnung zwischen $\dot{q}''$ und $\dot{q}$ kann zurzeit noch nicht angegeben werden. Die Entwicklung von pra-

xistauglichen Verbrennungsmodellen für beliebige Brandlast-Anordnungen ist noch nicht abgeschlossen. Für eine realitätsnahe Modellierung / Beurteilung gegebener Situationen werden daher entsprechende Raumbrandversuche empfohlen.

Der vfdb-Leitfaden enthält für die Phase der Brandausbreitung orientierende (Zahlen-)Angaben für folgende Parameter:

- Zuordnung von Nutzungsarten zu standardisierten Brandentwicklungsgeschwindigkeiten bzw. Brandentwicklungsfaktoren,
- $\dot{q}$ [kW/m²]; flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate für bestimmte Nutzungsarten,
- q [kWh/m²]; Brandbelastung für bestimmte Nutzungsarten,
- t_g [s]; Brandentwicklungsdauer für Q_0 = ca. 1000 [kW] bzw. α [kW/s²] zur Beschreibung der Brandentwicklungsgeschwindigkeit,
- v_{ab} [kg/m²min]; Masseabbrandgeschwindigkeit (flächenbezogen auf die Grundfläche, über der die brennbaren Stoffe angeordnet sind)
- v_{aus} [cm/min]; radiale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flammenfront über der Grundfläche.

Flashover

Ausführungen zum Flashover wurden in vfdb-Leitfaden ergänzt. Dazu wurden u. a. auch neuere Raumbrandversuche aus Deutschland ausgewertet [6].

Der Leitfaden benennt folgende Flashover-Kriterien:

a) Temperaturkriterium: Temperatur der Heizgasschicht T > 450 ℃ bis 600 ℃

b) Wärmefreisetzungsrate des Brandes (nach Thomas und Walton [7]), anwendbar für Räume ≤ 400 m² ohne Dach- bzw. Deckenöffnungen

$$\dot{Q}_{fo} = 7,8 \cdot A_T + 378 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad \text{in kW} \qquad (5)$$

mit

A_T Innenflächen des Raumes gesamt in m²,
A_W Öffnungsfläche in m²,
h_W gemittelte, lichte Höhe der Öffnungen in m

c) Thermischer Impuls aus der Strahlung mit der Wärmestrahlungsdichte zwischen der Flamme oder aus der Heißgasschicht und den betreffenden Gegenständen (Bild 2)

$$\dot{q} = 5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \varepsilon \cdot T^4 \qquad (6)$$

(ohne Berücksichtigung von Konfigurationsfaktoren)

mit

$\dot{q}$ Wärmestrahlungsdichte in kW/m²,
σ $5{,}67 \cdot 10^{-11}$ in kW/(m².K⁴) Stefan-Boltzmann-Konstante,
ε Emissionsgrad [-], zu entnehmen z. B. aus VDI-Wärmeatlas, hier konservativ angenommen mit $\varepsilon = 1$,
T Flammen- bzw. Heißgastemperatur in K.

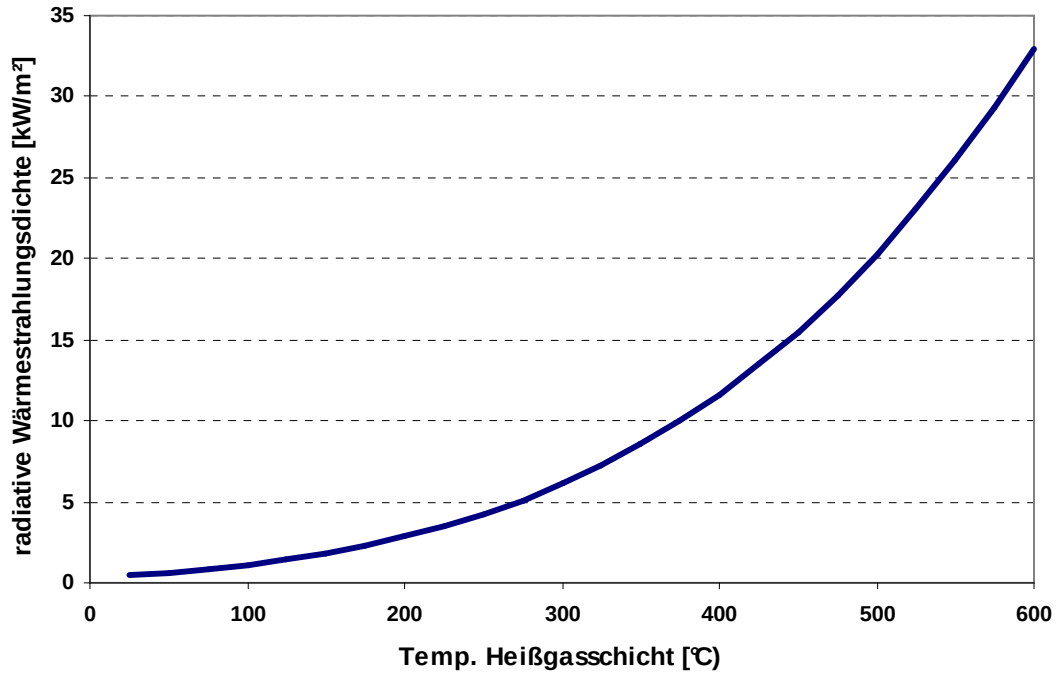


Bild 2 *Wärmestrahlungsdichte für den thermischen Impuls aus der Heißgasschicht in Abhängigkeit von der Temperatur*

Wenn der thermische Impuls ca. 10 % bis 15 % über der kritischen Wärmestromdichte liegt, erfolgt die spontane Zündung. Für die kritische Wärmestromdichte wird für überwiegend zellulosehaltige Stoffe folgende Beziehung angegeben (siehe Bild 3).

$$\dot{q}_{krit} = 65 \cdot t^{-0,23} \quad \text{in kW/m}^2 \tag{7}$$

Die Anwendung dieser Beziehungen wird für die Bewertung der Brandausbreitung durch Wärmestrahlung zwischen einzelnen brennbaren Gegenständen empfohlen (Brandausbreitungsmodelle).

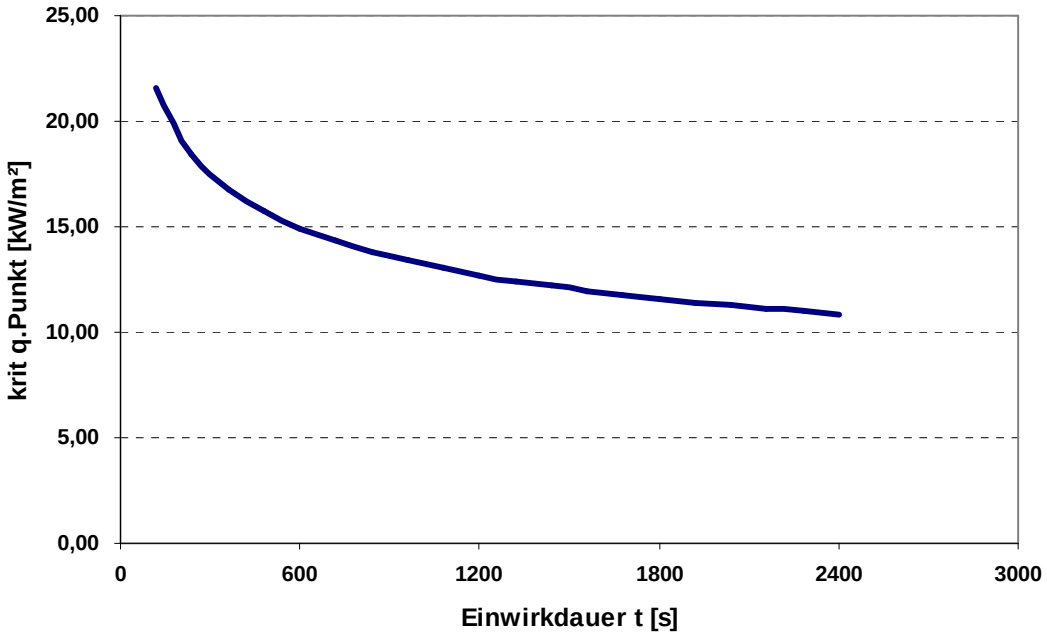


Bild 3 Kritische Wärmestromdichte zur Entzündung von zellulosehaltigen Stoffen

Beim rechnerischen Eintritt des Flashovers empfiehlt der vfdb-Leitfaden, einen linearen Anstieg der Wärmefreisetzungsrate anzunehmen (Bild 4). Für diesen Anstieg während des Flashovers werden für sich ursprünglich „langsam“, „mittel“ und „schnell“ entwickelnde Brände unterschiedliche Werte gemäß [6] angegeben. Dieser lineare Anstieg wird als „Feuerwachstumsrate“ v_{fo} [kW/s] bezeichnet (siehe Tabelle 6). In Einzelfällen kann der lineare Anstieg der Wärmefreisetzungsrate auch unterhalb der parabolischen „Ursprungskurve“ verlaufen.

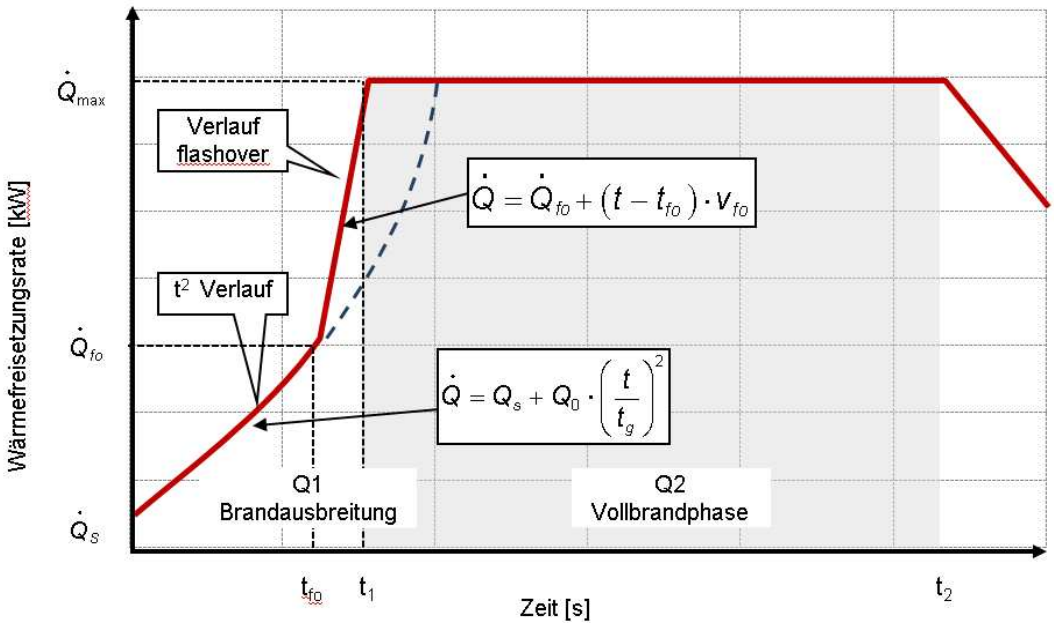


Bild 4 Schematisierter Brandverlauf für einen „natürlichen Brand“ unter Berücksichtigung eines Flashover in der Brandausbreitungsphase

Tabelle 6 Feuerwachstumsrate beim Flashover nach [6]

Brandentwicklungs-geschwindigkeit: Benennung	t_g [s]	Feuerwachstumsrate beim Flashover v_{fo} [kW/s]
langsam	600	18,1
mittel	300	23,9
schnell	150	32,6

Vollbrandphase

Zur Beschreibung der Vollbrandphase greift der vfdb-Leitfaden insbesondere auf den Eurocode 1 und auf dessen Nationalen Anhang zurück [3], [4]. Dieses Formelwerk wird im Leitfaden abgedruckt. Hierzu gehört die schematische Darstellung in Bild 5.

Kriterien zur Überprüfung des Brandregimes (brandlastgesteuerter oder ventilationsgesteuerter Brand) sind im Leitfaden ebenfalls enthalten; diese Formeln gelten allerdings „nur“ in den Anwendungsgrenzen des EC 1 – also für kleine Räume bis etwa 200 m² ohne Dach- bzw. Deckenöffnungen. Die Dauer der Vollbrandphase hängt i. W. neben den Ventilationsbedingungen von der Menge der Brandlast ab.

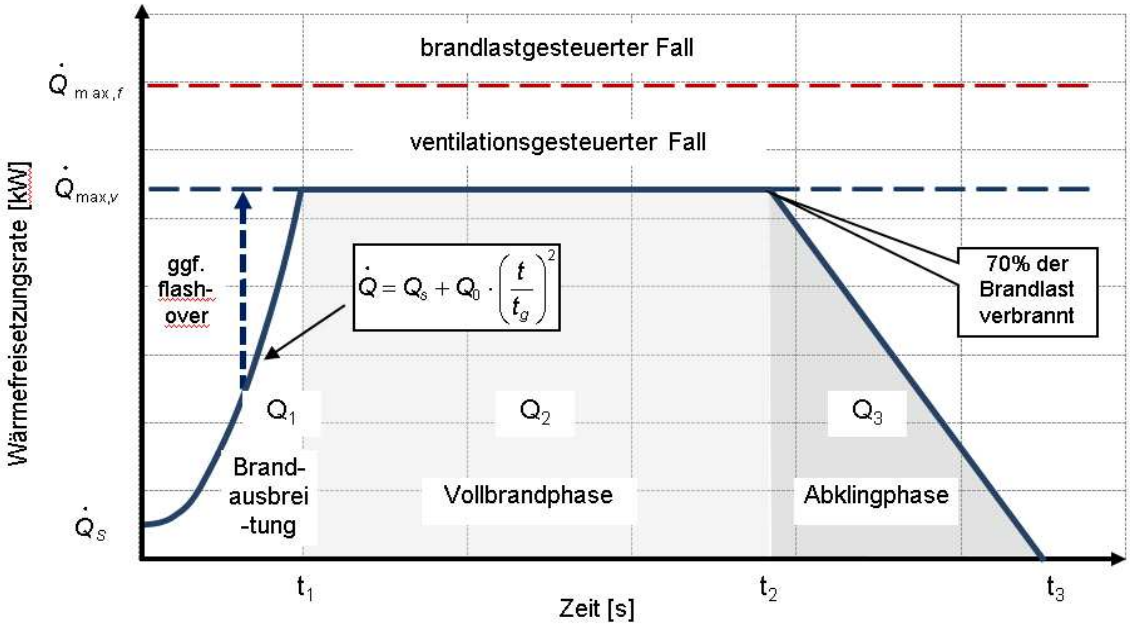


Bild 5 Schematisierter Brandverlauf für einen „natürlichen Brand“ mit den Brandphasen Brandausbreitung, Vollbrand und abklingender Brand

Phase des abklingenden Brandes

Für die Phase des abklingenden Brandes wird ein sehr schneller Abfall der Wärmefreisetzungsrate gem. einer Exponentialfunktion angenommen. Die während dieser Brandphase verbrennenden Brandlast-Anteile umfassen etwa 15 % bis 30 % der gesamten Brandlasten.

Berücksichtigung der Brandbekämpfung

Maßnahmen der Brandbekämpfung verringern die Wärmefreisetzungsrate. Je nach Löscherfolg liegt eine mäßige Reduzierung vor (Brandunterdrückung), eine Verhinderung der weiteren Brandausbreitung (Brandbeherrschung) oder ein effektiver Rückgang der Wärmefreisetzungsrate (Brandlöschung). Die verschiedenen Möglichkeiten sind in Bild 6 schematisch dargestellt.

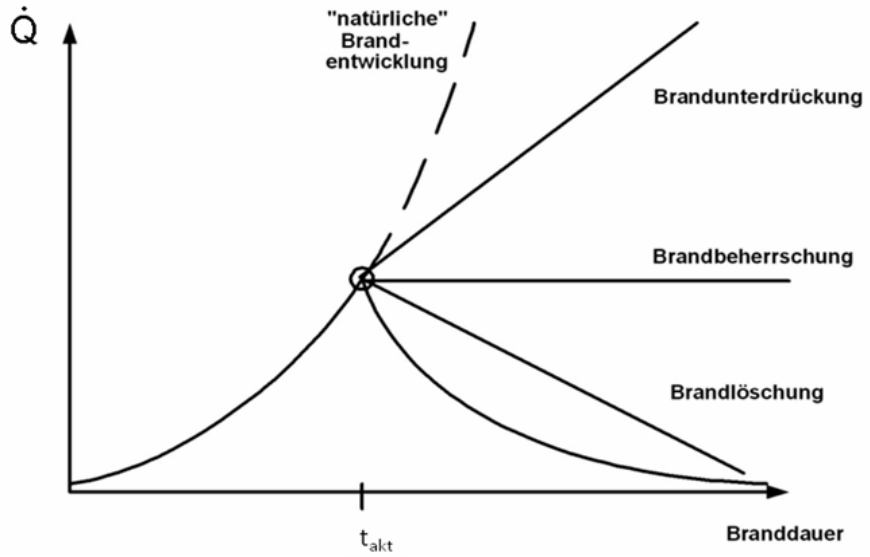


Bild 6 Modellcharakteristiken für den Einfluss von Löschmaßnahmen auf die Entwicklung des Bemessungsbrandes

Bislang wurde empfohlen, nach Aktivierung effektiver Löschmaßnahmen weiterhin mit konstanter Wärmefreisetzungsrate auf dem Niveau zum Zeitpunkt t_{act} der Aktivierung zu rechnen (Brandbeherrschung). Damit wurde die nominelle Zweckbestimmung von Sprinkleranlagen aufgegriffen, die für die Verhinderung einer weiteren Brandausbreitung ausgelegt werden.

Im Zuge der Fortschreibung des Leitfadens wurde dieses Grundmodell dahingehend erweitert, dass nunmehr auch die Wirksamkeit der Löschmaßnahmen berücksichtigt werden kann.

Die Löschwirkung LW nimmt ab, wenn sich die Brandfläche $A_F(t_{act})$ der maximal von der Feuerwehr beherrschbaren Brandfläche $A_{F,max}$ nähert:

$$LW = 1 - A_F(t_{act}) / A_{F,max} \quad (8)$$

Je früher die effektive Brandbekämpfung einsetzt, desto mehr Brandlast-Anteile werden auf der momentanen Brandfläche A_F vor dem Verbrennen geschützt. Die reduzierte Brandlast $Q_{F,red}$ kann dann mit Gleichung (9) abgeschätzt werden:

$$Q_{F,red} = (1 - LW^2) \cdot Q_F \quad \text{in kWh} \tag{9}$$

Wenn 70 % dieser reduzierten Brandlast $Q_{F,red}$ zum Zeitpunkt $t_{con,red}$ verbrannt sind, ist der Brand unter Kontrolle und das Szenarium beendet (Bild 7).

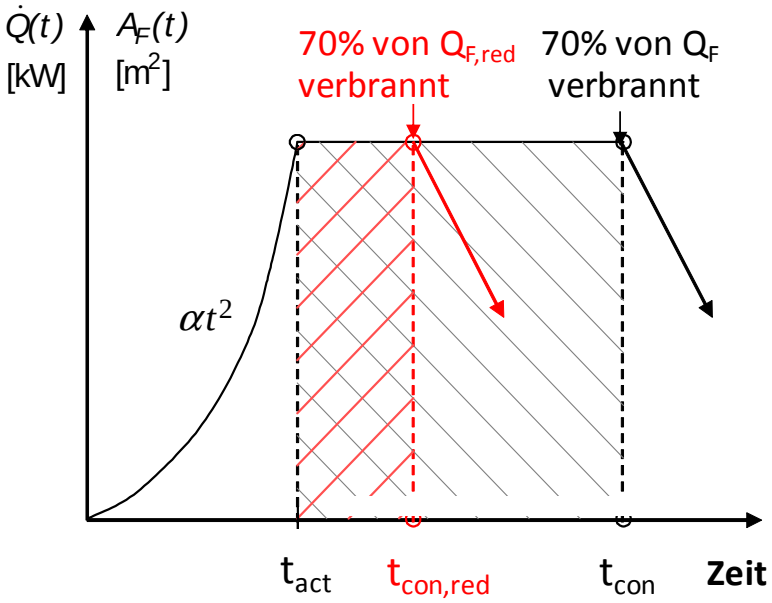


Bild 7 *Berücksichtigung von Löschmaßnahmen beim Bemessungsband; der Löscheffekt reduziert die Masse der Brand*

Problematisch ist es, die beherrschbare Brandfläche $A_{F,max}$ im Einzelfall zutreffend festzulegen, weil diese sowohl von den Gegebenheiten des Gebäudes als auch von der Stärke und Leistungsfähigkeit der Feuerwehr abhängt. Daher nennt der Leitfaden hierfür lediglich Orientierungswerte, die noch durch Erfahrungswerte aus der Einsatzpraxis und bevorzugt anhand von Daten aus der Brandstatistik abzusichern sind.

Das vereinfachte Löschmodell wurde im Zusammenhang mit den Brandszenarien erarbeitet, findet sich im Leitfaden jedoch im Kapitel 7.5 bei den Modellen und Daten zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit des abwehrenden Brandschutzes.

FAZIT ZUM NEUEN KAPITEL 4 DES LEITFADENS

Vorgaben für Brandsimulationen definieren zunächst die Kubatur der zu beurteilenden Gebäudeabschnitte sowie die während der vorgesehenen Nutzungsdauer zu berücksichtigenden kritischen Brandszenarien. Diese Festlegungen

bestimmen das rechnerische Brandgeschehen und damit unmittelbar die Brandwirkungen im Nah- und Fernbereich des Brandherdes entscheidend.

Von herausragender Bedeutung ist – vor allem für Fragestellungen der Personensicherheit – wie schnell sich ein Brand entwickelt sowie welche und wie viel Brandprodukte er freisetzt. Der Brandentwicklungsgeschwindigkeit in der Brandausbreitungsphase (Faktor α im t^2-Modell) kommt in den meisten Untersuchungen die dominierende Rolle zu. Dies schließt die Wirkung der angenommenen Zündquelle und des Zündinitials mit ein.

Für Fragen der Standsicherheit von Bauteilen ist dem gegenüber die Vollbrandphase entscheidend, die durch ihre Dauer und die Höhe der Wärmefreisetzungsrate gekennzeichnet ist. Bestimmend hierfür sind die Größe der Brandbelastung und die Ventilationsverhältnisse.

Der vfdb-Leitfaden stellt als Orientierungswerte Zahlen für brennbare Stoffe als Brandlasten auch in Verbindung mit üblichen Nutzungsarten zur Verfügung.

Da diese sicherheitstechnischen Vorgaben zum Brandgeschehen auf Annahmen und auf theoretischen Vorüberlegungen beruhen müssen, sind sie ausreichend konservativ festzulegen und im Rahmen von geeigneten Parameterstudien zu variieren. Die Vielzahl der denkbaren Szenarien muss für praktische Anwendungen durch die Festlegung einer begrenzten Anzahl, objektbezogener „Bemessungs-Brandszenarien“ auf ein vertretbares Maß reduziert werden. Hierbei ist von den „wahrscheinlich schlimmsten“ Brandfällen auszugehen, die mit ausreichender Eintrittswahrscheinlichkeit während der gesamten Nutzungsdauer des Beurteilungsobjektes auftreten können („worst credible scenarios“).

Maßnahmen der Brandbekämpfung und andere Beeinflussungen des Brandgeschehens – beispielsweise Veränderungen der Ventilationsverhältnisse während des Brandes – werden im Bemessungsbrandszenarium berücksichtigt und fließen ebenfalls in die Festlegung von Sicherheitsbeiwerten ein.

Der praktische Umgang mit den vorgenannten Aspekten und die Anwendbarkeit des vfdb-Leitfadens werden anhand des nachfolgenden Anwendungsbeispiels demonstriert.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Allgemeines

Im Kapitel 5 „Modelle für die Brandsimulation“ des Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes [2] werden wesentliche Aspekte ingenieurmäßiger Methoden für die Brandsimulation beschrieben. Der Einsatz solcher Methoden ist insbesondere dann geboten, wenn bestehende baurechtliche Anforderungen nicht eingehalten werden können oder für bestimmte Sonderbauten keine entsprechende Regelanforderung besteht. Die Grenzen der Anwendbarkeit von

Regelanforderungen können in bestimmten Fällen auch aus wirtschaftlichen oder architektonischen Gründen gegeben sein.

Die Methoden für die Brandsimulation stellen eine Möglichkeit dar, Brandschutzkonzepte für Bauten zu entwickeln, die nicht durch genormte Verfahren wie DIN 18230-1 (Bauteilbemessung im Industriebau) oder DIN 18232 (Bemessung von Rauchabzugsanlagen) abgedeckt werden oder die einer Rechtsverordnung wie der Versammlungsstättenverordnung (z. B. MVStättV [9]) oder der Verkaufsstättenverordnung (z. B. MVKV) nicht voll genügen.

Die Brandsimulation soll im Allgemeinen folgende Ergebnisse liefern:

- lokale und globale Temperaturwerte zur Beurteilung des Verhaltens von Bauteilen, Baustoffen und der Gefährdung von Personen und
- die Beschreibung der Rauchausbreitung und der damit verbundenen Schadgaskonzentration für die Auslegung von Entrauchungsmaßnahmen.

In diesem Anwendungsbeispiel „Hörsaalgebäude“ aus Anhang 2 des vfdb-Leitfadens (siehe Bild 8) soll die Ermittlung von Brandwirkungen mit Brandmodellen als Grundlage für die nachfolgende Bemessung des Tragwerks in [10] und die Nachweise zur Personensicherheit in [11] erläutert werden. Das Hörsaalgebäude wird ausführlicher in [2] und verkürzt in [12] beschrieben. Die Bandsimulation wird beispielhaft unter Verwendung eines Feldmodells durchgeführt. Die Untersuchung der Brandwirkungen konzentriert sich in diesem Beitrag auf den Verlauf der Gastemperaturen im Bereich wichtiger Bauteile.

Bild 8 Animation Hörsaal nach vfdb-Leitfaden, 2. Auflage [2]

Auf eine detaillierte Beschreibung der mathematischen Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Temperaturverteilung und der Rauchausbreitung wird hier verzichtet; dazu wird auf die Darstellungen in [2] verwiesen.

Bemessungsbrandszenario für die Tragwerksbemessung

Das zu Grunde gelegte Bemessungsbrandszenario für den brandschutztechnischen Nachweis der Tragkonstruktion klammert eine Schwelbrandphase und das Wirksamwerden von Löschmaßnahmen aus. Die Berücksichtigung eines Flashovers ist in der aktuellen Fassung des Leitfadens für Räume bis 400 m² beschrieben. Für den Hörsaal mit knapp 1000 m² erfolgt daher keine gesonderte Betrachtung. Dies ist auch deswegen zu Grunde zu legen, da Erkenntnisse über Flashover bei größeren Räumen in der Literatur kaum zu finden sind und im Allgemeinen davon ausgegangen werden kann, dass die nutzungsabhängigen Brandentwicklungszeiten bzw. das α für den α*t² Ansatz dieses Szenario bereits berücksichtigen.

Das maßgebende Bemessungsbrandszenario für die Beurteilung der Personenrettung im Brandfall weicht von dem zuvor definierten Szenario ab, da die Entfluchtung des Hösaalgebäudes in der Frühphase des Brandes innerhalb von 10 Minuten abgeschlossen sein sollte und wirksame Löschmaßnahmen der Feuerwehr zu diesem Zeitpunkt sehr unwahrscheinlich sind (vgl. [2], [12]).

Im Hinblick auf die Bauteilbemessung werden acht Rahmen in Stahlbauweise bestehend aus Stützen und Riegeln im Hörsaal betrachtet. Folgende Überlegungen wurden in den Parameterstudien für die Bauteilauslegung berücksichtigt:

- Rauchabzugsflächen im Bereich der oberen Fensterfront an beiden Längsseiten des Hörsaals auf der Seite des Atriums: 2% der Grundfläche (MVStättV [9]),
- Entsprechende Zuluftflächen im unteren Bereich der Halle, jeweils unterhalb der Rauchabzugsflächen angeordnet,
- Die Rauchabzugs- und Zuluftflächen werden 2 Minuten nach Brandbeginn geöffnet,
- Die Verbindungstür zum Atriumgebäude (Brandabschnitt) im oberen Bereich des Hörsaals ist bei der Betrachtung der Bauteilauslegung in jedem Fall geschlossen, was auch dem kritischeren Fall für die Entwicklung der Temperaturen bei einem Brand im Hörsaal entspricht,
- Ein Angriff der Feuerwehr erfolgt nach 10 Minuten und führt zur Öffnung einer der unteren Fluchtwegetüren. Ein Angriff mit Löschwasser wird aber im Verlauf der vorgegeben Wärmefreisetzungsrate nicht berücksichtigt, was als ungünstigster Fall angesehen werden kann.

Bemessungsbrand im Vergleich

In Kapitel 4 des Leitfadens sind die Vorgaben für die Bestimmung des zeitlichen Verlaufs des Bemessungsbrandes gegenüber der 2. Auflage unverändert. Auf dieser Grundlage sind folgende Angaben relevant:

- Ein $\alpha \cdot t^2$-Ansatz wird für die Brandentwicklungsphase gewählt, da der alternative Ansatz einer flächigen Brandausbreitung nach den Berechnungen zur 2. Auflage des Leitfadens nicht den kritischsten Fall abdeckt [16].
- Der Brandherd befindet sich im mittleren Sitzbereich des Hörsaals.
- Es erfolgt eine schnelle Brandausbreitung (α = 0,04689) über die gesamten Stuhl- und Tischreihen aus Holz.
- Es wird ein Brandrückstand (unverbrauchte Brandlast) von 10 % berücksichtigt.
- Teilbereiche der Fensterscheiben versagen ab 300 °C.
- Das Sicherheitskonzept wird nach Kapitel 10 des Leitfadens berücksichtigt.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Ermittlung der auf die Grundfläche bezogenen Brandlastdichte q und der maximalen Wärmefreisetzungsrate ergeben sich auf Grundlage der Ausführungen in dem Beitrag von Hosser und Siemon [12] zu

$$\gamma_{fi,q} = \gamma_{fi,HRR} = 1{,}2 \qquad (10)$$

Zur Ermittlung der relevanten Bemessungswerte der Brandlastdichte q und der maximalen flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate $\dot{q}$ (auch: HRR) werden folgende Überlegungen zu Grunde gelegt. Die Stuhl- und Tischreihen aus Holz stellen die zu berücksichtigende Brandlast dar, die auf einer Fläche von etwa 20,5 m x 20,0 m = 410 m² angeordnet sind (vgl. Bild 9). Werden hiervon etwa 22 % für die vorhandenen Zwischenräume zwischen Stuhl und Tisch bzw. zwischen den einzelnen Sitzreihen abgezogen, ergibt sich die gesamte Brandfläche A_F zu

$$A_F = 0{,}78 \cdot 410\ m^2 = 320\ m^2 \qquad (11)$$

Die Grundfläche A des Hörsaals errechnet sich zu

$$A = 28{,}9\ m \cdot 34{,}0\ m \approx 1.000\ m^2 \qquad (12)$$

Bei einer Dichte des Holzes von etwa 500 kg/m³ und einer angenommenen Gesamtdicke aller Holzteile (Sitzfläche, Tischfläche, Lehne, usw.) von 12,5 cm beträgt demnach die brennbare Masse

$$M_F = 500\ kg/m^3 \cdot 0{,}125\ m \cdot 320\ m^2 = 20.000\ kg \qquad (13)$$

Der untere Heizwert von Holz (Möbel) kann (nach Tabellen A4.1 des Leitfadens für Schule/Klassenräume) mit H_u = 18,2 MJ/kg angenommen werden. Unter

Berücksichtigung eines geschätzten Brandrückstandes (unverbrauchte Brandlast) von 10 % ergibt sich die gesamte Brandlast zu

$$Q_{max} = 0{,}9 \cdot 20.000 \text{ kg} \cdot 18{,}2 \text{ MJ/kg} = 327.600 \text{ MJ} \approx 328 \text{ GJ} \quad (14)$$

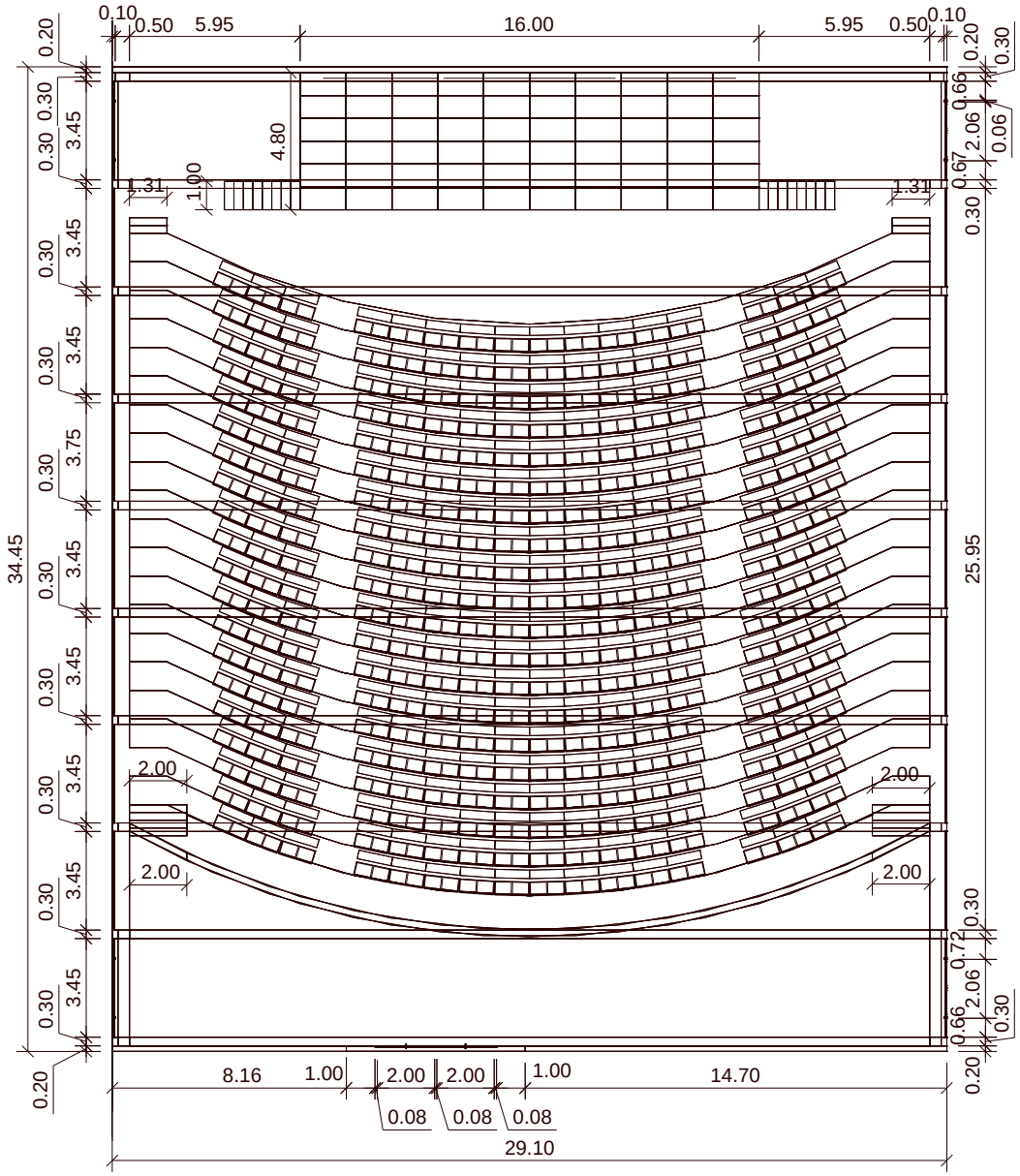


Bild 9 Grundriss des Hörsaalgebäudes

Der charakteristische Wert der mittleren Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche beträgt demnach

$$q_{f,k} = Q_{max} / A = 328.000 \text{ MJ} / 1.000 \text{ m}^2 = 328 \text{ MJ/m}^2 \quad (15)$$

Der Bemessungswert der Brandlastdichte ist definiert als:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot \chi \cdot \gamma_{fi,q} \quad \text{in MJ/m}^2 \quad (16)$$

Dabei ist:

$q_{f,k}$ die charakteristische Brandlastdichte bezogen auf die Grundfläche in MJ/m²;

γ_{fi} ein Teilsicherheitsbeiwert, der die Auftretenswahrscheinlichkeit eines vollentwickelten Brandes in der Nutzungseinheit sowie die erforderliche Zuverlässigkeit der Bauteile berücksichtigt

χ die Verbrennungseffektivität, die in der Regel die unvollständige Verbrennung pauschal berücksichtigt; für feste Brandlasten darf χ = 0,8 angenommen werden.

Mit den entsprechenden Werten und unter Berücksichtigung des Eingangs erwähnten Teilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_{fi,HRR}$ = 1,2 aus Gl. (10) ergibt sich aus (10) der Bemessungswert der auf die Grundfläche des Hörsaals bezogenen, mittleren Brandlastdichte für das Anwendungsbeispiel zu

$$q_{f,d} = 328 \cdot 0{,}8 \cdot 1{,}2 = 315 \ \text{MJ/m}^2 \qquad (17)$$

bzw. der Bemessungswert der gesamten Brandlast zu

$$Q_{f,d} = 315 \cdot 1.000 = 315 \ \text{GJ} \qquad (18)$$

Vergleicht man diesen Wert mit den 90 %-Fraktilen der Brandlastdichten bei unterschiedlichen Nutzungen, wäre auf Grundlage des Beitrages von Hosser und Siemon [12] für die pauschalierte Annahme der Brandlastdichte der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{fi} = 1{,}27$ anzusetzen.

Es zeigt sich damit, dass der individuell ermittelte Wert $q_{f,k}$ ² bei Annahme einer identischen Verteilung mit einem identischen Variationskoeffizienten zwischen den in Tabelle A4.1 des Leitfadens angegebenen Werten für Theater/Kino und für Hörsäle liegt:

$$1{,}27 \cdot 0{,}8 \cdot 417 \ \text{MJ/m}^2 = 424 \ \text{MJ/m}^2 > q_{f,k} > 1{,}27 \cdot 0{,}8 \cdot 195 \ \text{MJ/m}^2 = 198 \ \text{MJ/m}^2$$

Dies kann als gute Übereinstimmung und Bestätigung angesehen werden.

Zur Bestimmung der maximalen Wärmefreisetzungsrate und der Geschwindigkeit, mit der sich der Brand entwickelt, werden gestapelte Holzpaletten als äquivalente Brandlast zu Grunde gelegt. Die Tabelle A4.3 des Leitfadens enthält die hierfür benötigten Angaben. Als realistische Annahme der äquivalenten Brandlast wird eine Stapelung von maximal zwei Holzpaletten betrachtet. In Verbindung mit dem Teilsicherheitsbeiwert nach Gl. (10) $\gamma_{fi,HRR}$ = 1,2 ergibt sich die maximale flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate zu

$$\dot{q} = (2 \cdot 0{,}14 \ \text{m}) / 0{,}5 \ \text{m} \cdot 1.249 \ \text{kW/m}^2 \cdot 1{,}20 = 840 \ \text{kW/m}^2 \approx 0{,}8 \ \text{MW/m}^2 \qquad (19)$$

Dieser Wert kann wiederum mit Tabellenwerten zur maximalen flächenspezifischen Wärmefreisetzungsrate für verschiedene Brandlastanordnungen ver-

glichen werden. Demnach erhält man für waagerecht gelagertes Holz / PMMA, bei dem die obere Fläche des Stapels brennt,

$\dot{q}$ = 0,720 MW/m² · 1,20 = 0,864 MW/m²,

sodass auch hier die realistische Annahme mit Erfahrungswerten auf experimenteller Basis übereinstimmt.

Um letztlich die maximale Wärmefreisetzungsrate auf der Brandfläche zu bestimmen, muss der flächenspezifische Wert $\dot{q}$ mit der Brandfläche A_F multipliziert werden. Wird entsprechend der Herangehensweise bei der Ermittlung der Brandlastdichte eine unverbrauchte Brandlast von etwa 10 % bei der Fläche als nicht brennend berücksichtigt, ergibt sich mit:

$$\dot{Q}_{max} = 0{,}8 \text{ MW / m}^2 \cdot 0{,}9 \cdot 320 \text{ m}^2 = 230 \text{ MW} . \quad (20)$$

Zum Vergleich: Tabelle A4.1 gibt beispielsweise für eine Büronutzung (ohne Sprinkleranlage) eine flächenspezifische Wärmefreisetzungsrate von 250 kW/m² an. Daraus ergibt sich bei 1.000 m² Grundfläche des Hörsaals eine nutzungsbezogene maximale Wärmefreisetzungsrate von

$$\dot{Q}_{max} = 1{,}2 \cdot 250 \text{ MW} = 300 \text{ MW}$$

Bild 10 zeigt den Verlauf der Wärmefreisetzungsrate des Bemessungsbrandes als Ergebnis der Untersuchung, wie sie entsprechend der Angaben ausgewertet wurde.

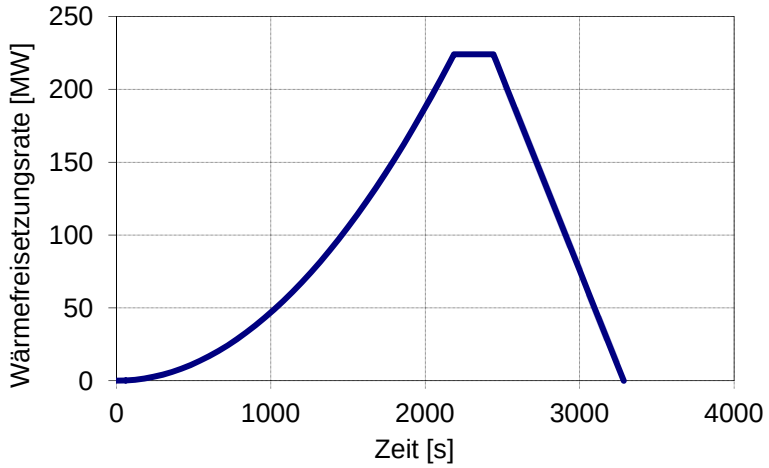


Bild 10 Bemessungsbrand Tragkonstruktion Hörsaal, Verlauf der Wärmefreisetzungsrate [MW]

Darüber hinaus werden auf Grundlage des Modells unterschiedliche Zu- und Abluftsituationen kontrolliert und abgeschätzt, die sich ergeben, wenn das Versagen von Fensterscheiben durch die Einwirkung des Brandes berücksichtigt wird.

Modellierung im Vergleich

Die Auswahl des Modelltyps ist direkt mit der Fragestellung verknüpft. Immer wenn Ergebnisse mit hoher räumlicher Genauigkeit gefragt sind (z. B. zur weiteren Bauteilbemessung) und wenn die Ergebnisse von den Strömungsbedingungen im Raum abhängen, sind Feldmodelle den Zonenmodellen vorzuziehen, auch wenn deren Einsatz mit erheblichem Aufwand verbunden ist.

Für die Berechnung der am Bauteil vorliegenden Rauchgastemperaturen wurde im Rahmen der Berechnungen zur 1. und 2. Auflage des Leitfadens der Fire Dynamics Simulator in der Version 4 (FDS, [17]) herangezogen. Für die aktuelle Darstellung in der 3. Auflage des Leitfadens wurde nun der Fire Dynamics Simulator in der aktuellen Version 6 (RC Canidate 3, FDS, [18]) gewählt. Im Leitfaden (Kapitel 5) wird FDS zu den validierten Modellen gezählt; es weist bei der Berechnung der Rauchgastemperaturen im Vergleich zum Validierungsversuch 1 (Tabelle 5.2 im Leitfaden) nur geringe Abweichungen auf. Darüber hinaus wird das Modell regelmäßig einer Validierung durch das NIST (National Institute of Standards and Technology) unterzogen [19]. Die Berechnung von Temperaturen auf der Grundlage von vorgegeben Verläufen der Wärmefreisetzungsrate führt zu den besten Übereinstimmungen, die Abweichungen liegen hierbei maximal im Bereich von 15 %.

Das Modell eignet sich auch für spätere Fragestellungen, z. B. zur Berechnung der Rauchausbreitung und zur Berechnung der Höhe der rauchgasarmen Schicht, wie sie in [11] betrachtet werden. Bild 11 zeigt den simulierten Hörsaal im Modell. Für die Bauteilberechnung wurde von einer geschlossenen Verbindungstür zum anschließenden Atrium ausgegangen.

Bei der Erstellung des Modells für die Berechnung mit FDS, wurden folgende generelle Annahmen für die Geometrie und die Umfassungsbauteile gemacht:

- Alle geometrischen Angaben wurden in einem Raster mit der Genauigkeit von 50 cm berücksichtigt. Die Binder haben Querschnitte von 50/100 cm, die Stützen Querschnitte von 50/50 cm,
- Die Wände an der oberen und unteren Stirnseite, die Decke und der Boden wurden mit thermophysikalischen Daten entsprechend einem gedämmten Normalbeton gerechnet,
- Für die Stirnseiten des Hörsaals (Fensterfronten) wurde ein thermisch „dünnes“ Material mit den Eigenschaften von Glas angenommen,
- Die Sitzreihen wurden durch 5 Stufen à 4 m Breite angenähert, die obere Plattform (Zugang über Atrium) hat eine Höhe von 3,5 m, die Brandlast wurde auf einer Fläche von 320 m² angenommen, die sich auf diese 5 Stufen gleichmäßig verteilt.
- Die vorgegebene Wärmefreisetzungsrate wird in der Simulation berücksichtigt und nicht durch den in FDS bestehenden „Suppression“-Algorithmus begrenzt.

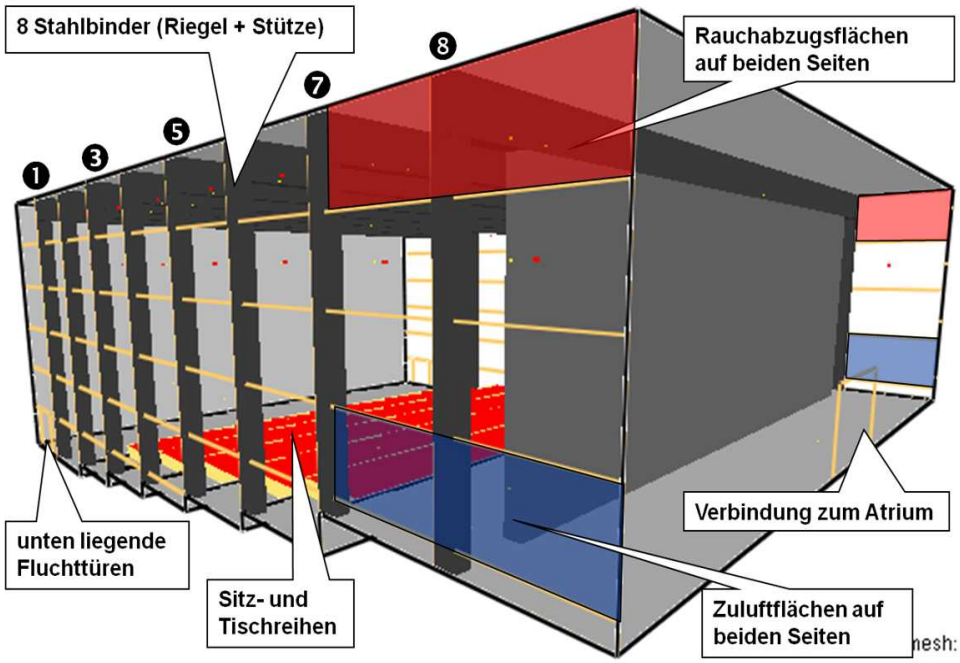


Bild 11 *Modell des Hörsaals für die Berechnung mit FDS Version 4, dargestellt mit Smokeview*

Bild 12 zeigt das Modell des Hörsaals für die Berechnung mit FDS Version 6.

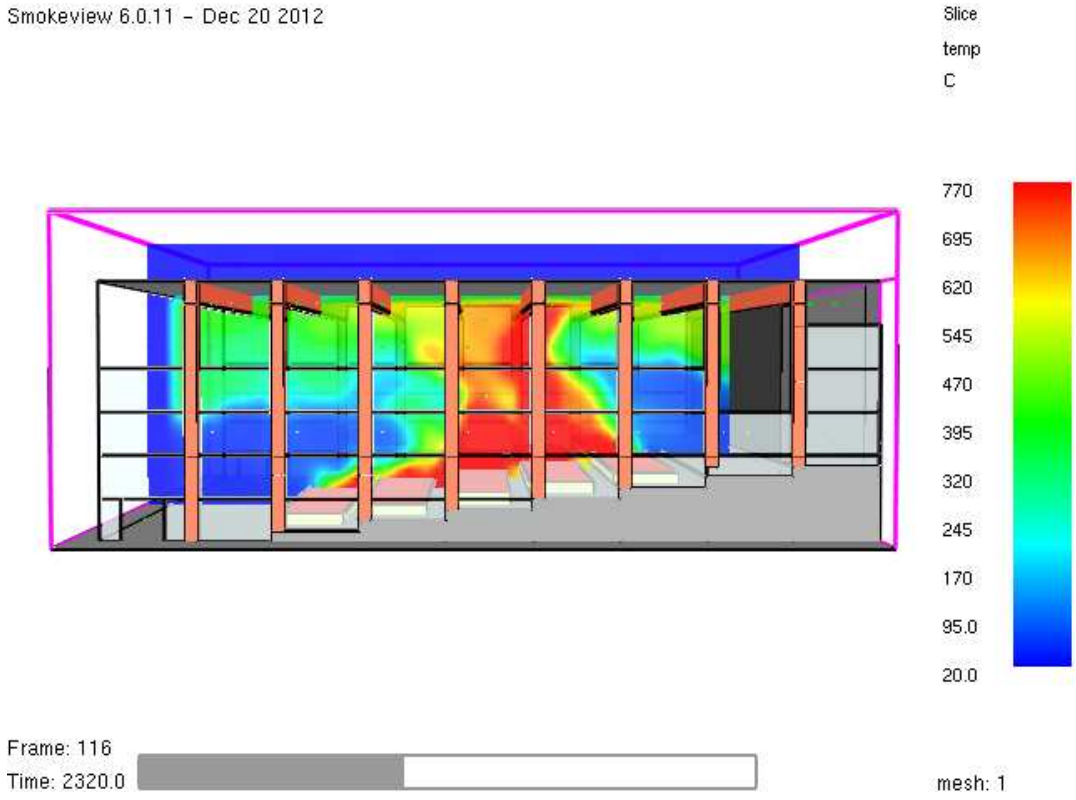


Bild 12 *Modell des Hörsaals für die Berechnung mit FDS Version 6, dargestellt mit Smokeview, Darstellung mit Außenraum außerhalb des Hörsaals*

Folgende Änderungen bzw. Ergänzungen gegenüber der 2. Auflage des Leitfadens haben sich auf Grundlage der Berechnungen mit FDS 6 und geänderter Eingangsdaten ergeben:

- Der Außenraum des Hörsaals wird umlaufend berücksichtigt.
- Um Berechnungsfehler an Gittergrenzen auszuschließen, wird nur ein (globales) Berechnungsgitter in FDS verwendet .
- Als Modell kommt der Fire Dynamics Simulator als FDS 6 Release Candidate 3 (RC3) zum Einsatz.

Im Hinblick auf die weitere Bauteilbemessung wurden bestimmte Messpunkte festgelegt, an denen die Gastemperaturen im Bereich der Binder alle 10 Sekunden in eine Datei gespeichert wurden. Bild 13 zeigt diese Messpunkte exemplarisch für einen der 8 Dachbinder.

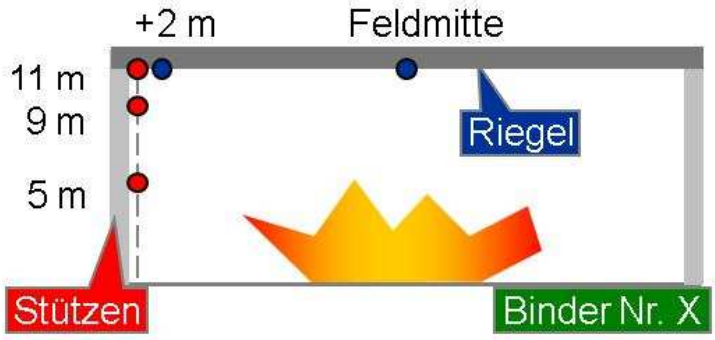


Bild 13 Systemskizze, Bezeichnung der Messstellen für die Gastemperaturen des Systems der Binder (Stütze + Riegel)

Parameterstudienläufe

Für die 1. und 2. Auflage des Leitfadens waren folgende Untersuchungen durchgeführt worden, die auch Grundlage für die Simulationen mit FDS 6 in der 3. Auflage des Leitfadens sind:

- Typ A: $\alpha \cdot t^2$ Ansatz, keine Berücksichtigung des Versagens von Fenstern
- Typ B: Brandausbreitung über Stuhlreihen
- Typ C: wie Typ A, aber Berücksichtigung des Versagens von Fenstern

Die Rechenläufe mit unterschiedlichen Parametern sind in [13] zusammengefasst. Grundlage war eine Analyse der Abhängigkeit der Ergebnisse von der Zellfeinheit, die zu guten Ergebnisse bei der Verwendung von Gitterzellen mit 50 cm Kantenlänge führen. Insgesamt wird eine Feinheit der Zellen von bis zu 25 cm als sinnvoll betrachtet. Für den Fall B wurde eine schnelle Brandausbreitung von 100 cm/min angesetzt (Leitfaden, Tabelle 4.2). Eine Ausbreitung über die Mittellachse der unteren Sitzreihe (20 m) nach oben dauert daher 20 Minuten.

Ergebnisse der Brandsimulationsrechnungen

Als Ergebnis der Berechnungen wir auszugsweise in Bild 14 der Verlauf der Gastemperaturen im Bereich des Riegel Nr. 4 in Feldmitte gezeigt.

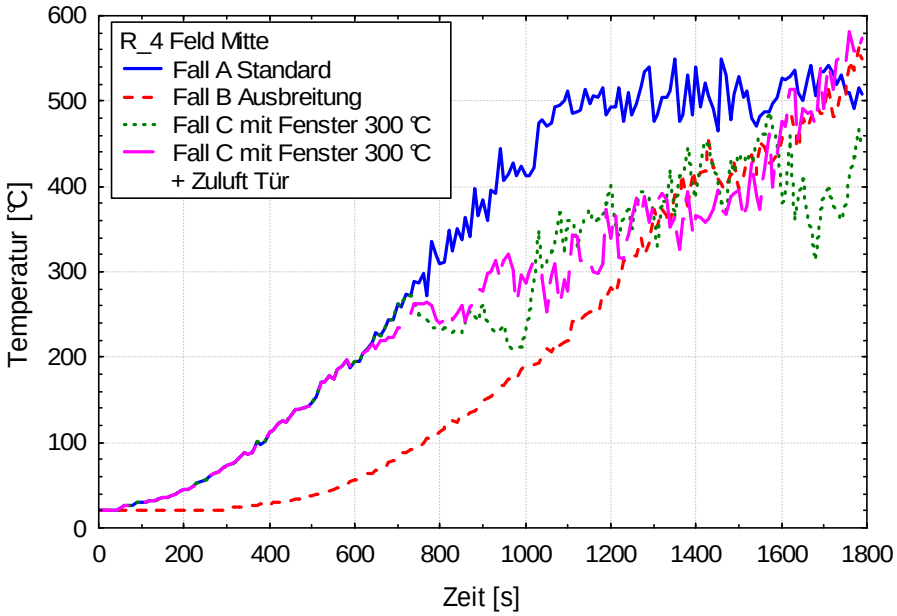


Bild 14 *Verlauf der Temperatur am Riegel 4 in Feldmitte für 4 verschiedene Brandszenarien berechnet mit FDS 4*

Bleibt die untere Fluchttür geschlossen, liegen die höchsten Temperaturen im Bereich der Binder 2 und 3; im Falle der geöffneten Fluchttür (durch Eingreifen der Feuerwehr nach 10 Minuten) sind die Temperaturen im Bereich der Binder 4 und 5 am höchsten.

Der Einfluss der zusätzlichen Zuluftflächen durch „herausfallende“ Fensterscheiben ab der 800. Sekunde ist deutlich zu erkennen, er führt zuerst zu einem Plateau bei der Temperaturentwicklung. Ab der 1000. Sekunde steigen die Temperaturen aber wieder deutlich an, da die Wärmefreisetzungsrate weiterhin deutlich ansteigt.

Bild 15 schließlich zeigt den Verlauf der Temperaturen im Bereich des Riegels 3 und an den Stützen 3 für den Fall C mit einer Zellengröße von 25 * 25 * 25 cm³ für 90 Minuten Berechnungszeit. In Feldmitte werden am Riegel 3 Temperaturen bis knapp über 800 ℃ berechnet. Die Temperatur en an den Stützen liegen über den gesamten betrachteten Zeitraum unterhalb der Werte, die in Feldmitte unterhalb der Decke berechnet wurden. In Bild 16 wird das Ergebnis der Berechnung mit der aktuellen Version FDS 6 im Vergleich gezeigt. Es stellt sich eine geringfügige Verschiebung des Anstiegs der höchsten Temperaturen dar, die ebenfalls am Riegel 3 vorliegen. Der leicht veränderte Verlauf, bzw. der etwas verzögerte Anstieg der Temperatur wird auf die Berücksichtigung der Umgebung im Modell und damit der Möglichkeit des Einflusses von Strömungsef-

fekten über das Gebäude gesehen. Eine weitere Möglichkeit ist die veränderte Berücksichtigung des Plumes im Modell (Version 6), die Einfluss auf die Entwicklung der Temperaturentwicklung über der Höhe hat.

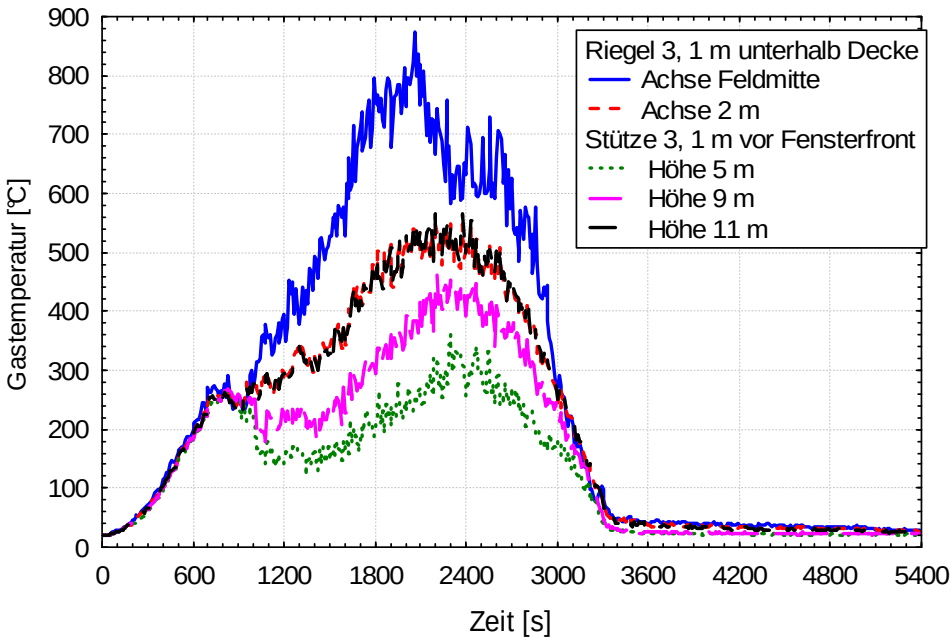


Bild 15 *Temperaturverlauf an dem Riegel und den Stützen 3 an verschiedenen Messstellen (siehe Bild 13) für den Fall C_25 [2]), 1 m unterhalb der Decke, Mittelachse für 90 Minuten Berechnungszeit*

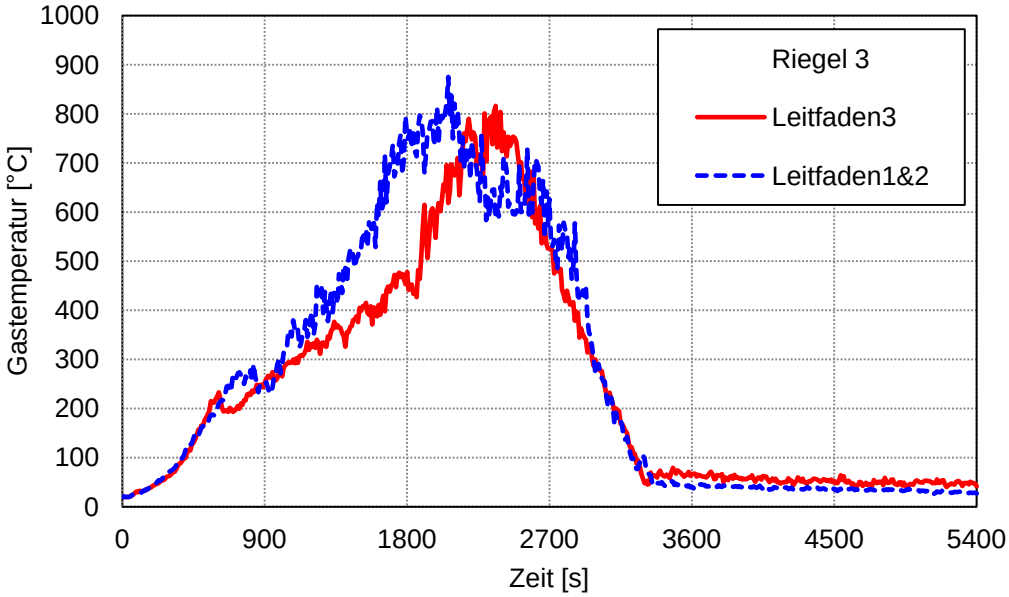


Bild 16 *Temperaturverlauf am Riegel 3: Berechnungen zum Stand des Leitfadens, 1. und 2. Auflage sowie 3. Auflage, 1 m unterhalb der Decke, Mittelachse für 90 Minuten Berechnungszeit*

FAZIT ZUM ANWENDUNGSBEISPIEL

Mit Hilfe des CFD-Modells Fire Dynamics Symulator (FDS) wurde die Wirkung eines Brandes auf die Gastemperaturen in einem Hörsaalgebäude untersucht. Für die Auslegung einer Stahlrahmen-Konstruktion wurde als „ungünstigster Fall“ ein Brandszenario festgelegt, bei dem die gesamte Fläche der Stuhlreihen im Zuhörerbereich als Brandlast berücksichtigt wird.

Zusätzliche Annahmen zur Rauchabzugsanlage und Zuluft wurden nach Vorgabe der MVStättV [9] getroffen, und es wurde ein brandbedingtes Versagen der Scheiben auf den Längsseiten des Hörsaals bei 300 ℃ angenommen. In diesem Beitrag werden die notwendigen Schritte beschrieben, um mit FDS den Verlauf der benötigten Temperaturen zu berechnen. Hierzu ist es erforderlich,

1) das Modell auf eine Konvergenz der Lösung bei der gewählten Feinheit (Größe) der Zellen zu überprüfen und
2) zur Festlegung des kritischsten Szenarios die Parameter zu variieren und die sich ergebenden Lösungen zu vergleichen.

Ein Gitter mit 25 cm Kantenlänge der Zellen hat sich bei der Simulation mit dem Feldmodell als ausreichend hinsichtlich der Konvergenz der Ergebnisse erwiesen. Es konnte gezeigt werden, dass Strömungen durch zusätzlich geöffnete Türen zu sehr unterschiedlichen Temperaturverteilungen im Raum führen und die höchsten Temperaturen nicht immer direkt über dem Brandherd erreicht werden müssen.

Eine Auslegung der Stahlbinder sollte daher durch eine abdeckende gleiche Temperaturbeanspruchung erfolgen. Die maximalen Temperaturen die an Riegel 3 anliegen wurden mit über 800 ℃ berechnet. Die an diesem Binder und den zugehörigen Stützen berechnete Temperaturzeitkurve dient als Grundlage für die weitere Bauteilauslegung, die in [10] zu finden ist.

LITERATUR

[1] Wiese, J.; Riese, O.: „Brandszenarien und Bemessungsbrände für die numerische Brandsimulation“; Braunschweiger Brandschutz Tage 25.09.2009; Tagungsband; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) an der TU Braunschweig

[2] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01, 2. Auflage Mai 2009. Altenberge, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) e. V., 2009

[3] DIN EN 1991-1-2: 2010-12, Einwirkungen auf Tragwerke“ – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke

[4] DIN EN 1991-1-2/NA: 2010-12, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1, Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke

[5] DIN 18230-3: 2002-08, Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 3: Rechenwerte

[6] Wilk, E.; Kotthoff, I.: Der Brand in Räumen – Auswertung von Originalbrandversuchen im Vergleich mit analytischen Rechenverfahren“ - Teil 2 und Teil 3; vfdb Zeitschrift, Jahrgang 2013, Heft2 1 und 3

[7] Walton, Thomas: Estimating Temperatures in Compartment Fires

[8] DiNenno, P. J. et al. (Hrsg.). The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Fourth Edition, Quincy, Massachusetts (USA), S. 3-204 – 3-221. 2008.

[9] MVStättV: Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung), ARGEBAU, Fachkommision Bauaufsicht, Juni 2005.

[10] Zehfuß, J.; Paliga, K.: Aktualisierungen bei den Brandschutznachweisen für Bauteile und Tragwerke. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft Nr. 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[11] Schneider, V.; Forell, B.: Aktualisierungen bei den Nachweisen zur Personensicherheit und Entfluchtung. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft Nr. 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[12] Hosser, D. ; Siemon, M.: Fortschreibung des vfdB-Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft Nr. 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[13] Riese, O.: Ermittlung der Brandwirkung mit Brandmodellen, In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage ’05, 11. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 28. und 29. September 2005. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft Nr. 185, 2005.

[14] Olenick, S. M.; Carpanter, D. J.: An Updated International Surveys of Compurter Smoke Models for Fire and Smoke, Journal of Fire Protection Engineering, Vol. 13, May 2003.

[15] Xue, H.; Ho, J. C.: Comparison of Different Combustion Models in Enclosure Fire Simulation, Fire Safety Journal 36, Page 37-54 Elsevier Ltd, 2001.

[16] Hohm, V.: Schutzziele, Brandszenarien und Bemessungsziele, In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage ’05, 11. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 28. und 29. September 2005, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft Nr. 185, 2005.

[17] McGrattan, K. B.; Forney, G.: Fire Dynamics Simulator (Version 4), Users Guide, NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaitherburg, Maryland, USA, 2004.

[18] McGrattan, K. B.; Forney, G.: Fire Dynamics Simulator (Version 6), Users Guide, SVN Respository Revision : 14173, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaitherburg, Maryland, USA, 2012.

[19] McGrattan, K. B.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, Volume 3: Validation, SVNRespository Revision : 7033, NIST Special Publication 1018-5, National Institute of Standards and Technology, Gaitherburg, Maryland, USA, 2010.

AKTUALISIERUNGEN BEI DEN BRANDSCHUTZNACHWEISEN FÜR BAUTEILE UND TRAGWERKE

Jochen Zehfuß
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig
Karen Paliga
hhpberlin Ingenieure für Brandschutz, Braunschweig

EINLEITUNG

Der brandschutztechnische Nachweis von Bauteilen und Tragwerken umfasst den Nachweis der Tragfähigkeit, des Raumabschlusses und der Wärmedämmung. Er kann mit Hilfe von Bemessungstabellen oder durch Anwendung von vereinfachten oder allgemeinen Rechenverfahren geführt werden. Der Nachweis mit Hilfe von Bemessungstabellen liegt im Allgemeinen auf der sicheren Seite und weist häufig Reserven auf. Die vereinfachten und allgemeinen Rechenverfahren erfassen das Tragverhalten realistischer, gestalten sich allerdings aufwändiger.

Im vorliegenden Beitrag werden kurz die Neuerungen im Kapitel 6 des vfdb-Leitfadens vorgestellt, welches die brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerken behandelt. Ausführlicher wird am Beispiel des im Anhang 2 des Leitfadens untersuchten Hörsaalgebäudes erläutert, wie die Brandschutznachweise für das Tragwerk mit Rechenverfahren auf Basis einer Naturbrandbeanspruchung geführt werden können. Da sich in den letzten Jahren mit der Einführung der Eurocodes die normative Grundlage insbesondere für die Anwendung von Naturbrandverfahren verändert hat und auch neue Erkenntnisse zum Tragwerksverhalten bei Naturbränden zu berücksichtigen sind, werden die Tragwerksnachweise für das Hörsaalbeispiel mit den in [1] ermittelten Brandwirkungen neu durchgeführt. Die Darstellung der Nachweisführung und der Ergebnisse wird in leicht modifizierter Form in die 3. Auflage des vfdb-Leitfadens übernommen.

NEUERUNGEN IM KAPITEL 6

Im Jahr 2012 wurden die Eurocodes und ihre zugehörigen Nationalen Anhänge mit Übernahme in die Liste der Technischen Baubestimmungen der Bundesländer bauaufsichtlich eingeführt. Die Eurocode-Brandschutznachweise für Bauteile und Tragwerke stellen somit die Regelnachweise dar, Nachweise nach DIN 4102-4 können nur noch für solche Konstruktionen angewendet werden, für die in den Eurocodes keine Bemessungsregeln existieren, z. B. für historische Bauteile oder Sonderkonstruktionen. Folglich sind im Kapitel 6 des Leitfadens die Eurocode-Nachweise in den Vordergrund gerückt. Die möglichen Kombinationen der verschiedenen Nachweisverfahren nach den Brandschutzteilen der Eurocodes sind dem Bild 1 zu entnehmen.

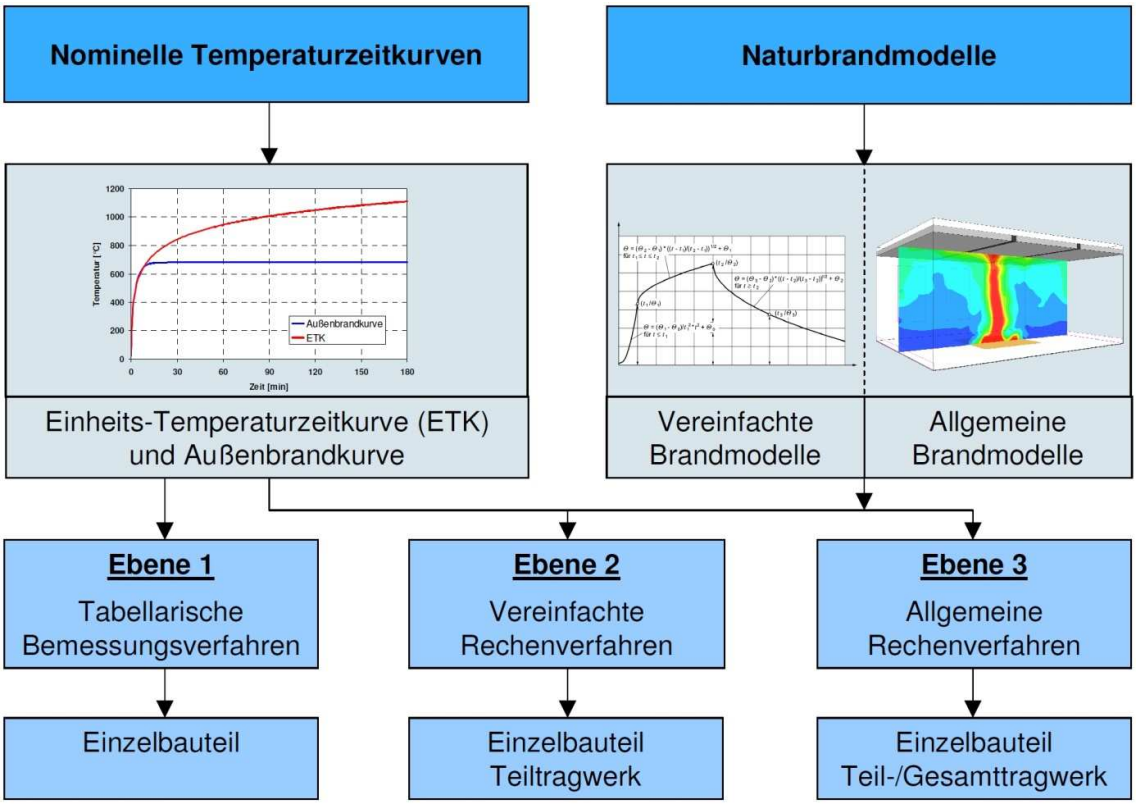


Bild 1 Brandschutztechnische Nachweisverfahren nach den Eurocodes

Neben einer zusammenfassenden Beschreibung der drei Nachweisebenen in den Eurocode-Brandschutzteilen wurden Schwerpunkte auf den Umgang mit Naturbrandmodellen als thermische Beanspruchung, abkühlende Bauteiltemperaturen sowie die Definition von Versagenskriterien gelegt.

Bei der Anwendung von Naturbrandmodellen zur Ermittlung der thermischen Einwirkung auf die zu bemessenden Bauteile darf der Strahlungsanteil nicht vernachlässigt werden. Insbesondere für Bauteile in der Nähe von Brandquellen (z. B. Stützen) ist darauf zu achten, dass als Einwirkung nicht nur der konvektive Wärmestrom angesetzt wird. Bei der Berechnung des radiativen Nettowärmestroms ist neben dem Anteil aus der Strahlung der Heißgasschicht auch die Strahlung der Flamme bzw. des Plumes zu berücksichtigen. In Kapitel 6 wird ein auf schwedischen Forschungen basierender Ansatz beschrieben, mit dem die thermische Einwirkung auf die Bauteile unter Berücksichtigung der radiativen Anteile durch die sogenannte „adiabatic surface temperature“ (AST) vereinfacht berechnet werden kann. Die AST ist eine ideale Oberflächentemperatur, die unter der Annahme ermittelt werden kann, dass der Wärmetransfer in eine Oberfläche der Wärmeabgabe von dieser gleich ist.

Neu in Kapitel 6 aufgenommen wurden Hinweise zur Vorgehensweise bei Verwendung von Hochleistungsbaustoffen wie ultrahochfester Beton und hochfeste Bau- und Betonstähle sowie zu den bisher fehlenden Materialkennwerten für Konstruktionsbaustoffe in der Abkühlphase von Naturbränden.

In der mechanischen Analyse wird die plastische Tragfähigkeit des Bauteilquerschnitts berechnet und mit den im Brandfall maßgebenden Einwirkungen verglichen. Bei den Gesamttragwerks- oder Teiltragwerksberechnungen für den Brandfall muss die bei Brandbeanspruchung maßgebende Versagensart erfasst werden. Zusätzlich müssen die im Grenzzustand der Tragfähigkeit entstehenden Verformungen begrenzt werden, um das Zusammenwirken aller Teile des Tragwerks sicherzustellen. Dabei stellt sich die Frage nach geeigneten Versagenskriterien. Diese können nicht abhängig von den gewählten numerischen Verfahren der Programme für die allgemeinen Rechenverfahren sein. Im Kapitel 6 werden Versagenskriterien für tragende Bauteile vorgestellt, die sich an der Verformung bzw. der Verformungsgeschwindigkeit orientieren.

Für den Anwender wurden in Tabellenform Anwendungshilfen zusammengestellt. Sie geben einen Überblick über die vorhandenen Nachweisverfahren in den einzelnen baustoffbezogenen Eurocodes und enthalten Empfehlungen zur Auswahl des geeigneten Nachweisverfahrens für das jeweilige Bauteil.

Das Kapitel 6 wird mit einer kurzen Vorstellung der voraussichtlich Ende 2013 als Entwurf erscheinenden „Restnorm“ DIN 4102-4, den Validierungsbeispielen für die allgemeinen Rechenverfahren der Eurocodes sowie den brandschutztechnischen Bemessungsverfahren von Bauteilen für den Industriebau mit dem vereinfachten Verfahren nach DIN 18230-1 und dem Entwurf der DIN 18230-4 abgerundet.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Im Folgenden soll die Vorgehensweise bei der brandschutztechnischen Bemessung eines Tragwerks nach dem allgemeinen Rechenverfahren auf Basis einer Naturbrandbeanspruchung gezeigt werden. Die thermischen Einwirkungen für das Auditorium des Hörsaalgebäudes in Anhang 2 des vfdb-Leitfadens werden dem Beitrag von Wiese und Riese [1] entnommen.

Bei der Tragkonstruktion des Auditoriums handelt es sich um 10 Stahlrahmen mit den Abmessungen b = 29,10 m und h = 12 m. Die Rahmen sollen als Zwei-Gelenk-Rahmen mit den Gelenken in den Fußpunkten vorgesehen werden. Der Achsabstand der Rahmen beträgt 3,75 m.

Die Stiele der Rahmen bestehen aus HEA 500-Profilen, die Riegel aus HEA 700-Profilen aus Baustahl S235. Riegel und Stiel sind über geschraubte Stirnplattenstöße biegesteif miteinander verbunden. Die Kopfplatten haben eine Dicke von 25 mm. In der Rahmenecke befinden sich im Stiel zwei Steifen mit einer Dicke von ebenfalls 25 mm in Verlängerung der Riegelflansche. Die Fußplatte hat eine Dicke von 20 mm.

Die Außenwand des Gebäudes besteht aus einer Glasfassade. Das Dach wird aus Sandwichelementen mit 100 mm Mineralwolle-Dämmung errichtet.

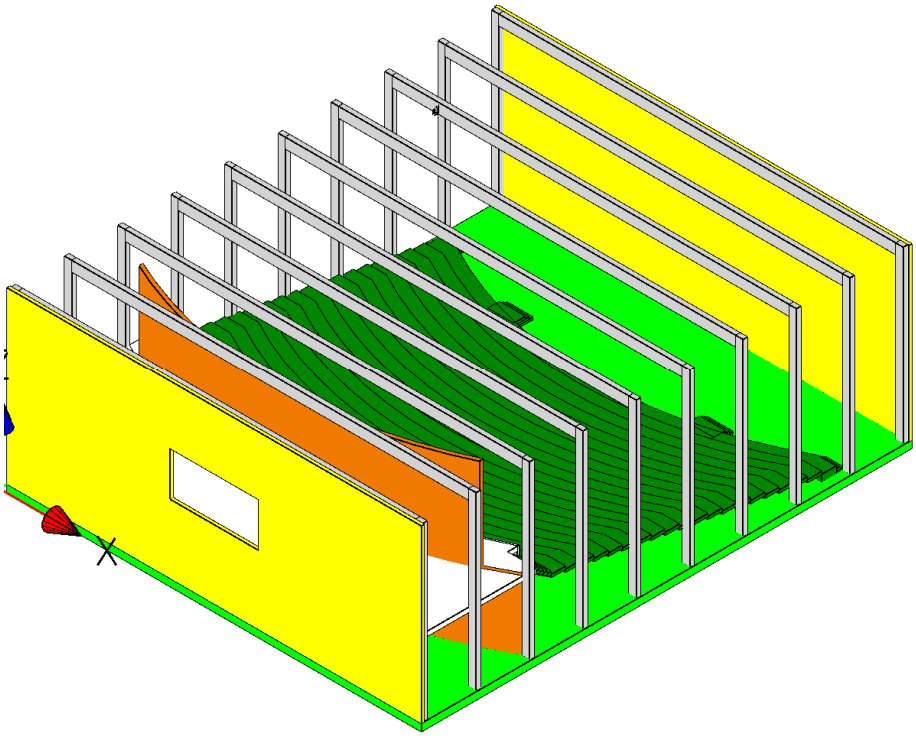


Bild 2 Tragkonstruktion des Auditoriums mit Stahlrahmen

EINWIRKUNGEN

Die Einwirkungen nach DIN EN 1991 [2] sind nachfolgend aufgeführt. :

Linienlast infolge Eigengewicht Dach: $g_{k,1}$	2,21	kN/m
Eigengewicht Stahl-Glas-Fassade: $g_{k,2}$	1,88	kN/m
Schneelast: $s_k = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k \cdot b = 0{,}8 \cdot 1{,}0 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}95\ kN/m^2 \cdot 3{,}75\ m =$	2,85	kN/m
Wind zugewandte Seite: $w_{k,z} = q_p\ (z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0{,}8 \cdot 0{,}72 \cdot 3{,}75 =$	2,16	kN/m
Wind abgewandte Seite: $w_{k,a} = q_p\ (z_e) \cdot c_{pe} \cdot b = 0{,}8 \cdot (-0{,}35) \cdot 3{,}75 =$	-1,05	kN/m

Lastfallkombination für die „kalte“ Bemessung: Grundkombination

$$E_d = E\ [\sum \gamma G_j \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}] \qquad (1)$$

Lastfallkombination für die „heiße“ Bemessung: Außergewöhnliche Situation

$$E_d = E\,[\sum \gamma G_i \cdot G_{ki} + A_d + \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \qquad (2)$$

Anmerkung: In der Regel darf die quasi-ständige Größe $\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$ verwendet werden. Dies gilt nicht für Bauteile, deren Leiteinwirkung der Wind ist. In diesem Fall ist für die Einwirkung aus Wind die häufige Größe $\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$ zu verwenden.

Nach DIN EN 1991-1-1 [2] sind folgende Teilsicherheitsbeiwerte sowie die Kombinationsbeiwerte nach Tabelle 1 für den Grenzzustand der Tragfähigkeit des Tragwerkes oder der tragenden Bauteile anzusetzen:

Ständige Einwirkungen (günstig): $\gamma_{G,sup} = 1{,}35$

Ständige Einwirkungen (ungünstig): $\gamma_{G,inf} = 1{,}00$

Veränderliche Einwirkungen (ungünstig): $\gamma_{Q} = 1{,}50$

Außergewöhnliche Einwirkungen (ungünstig): $\gamma_{A} = 1{,}00$

Tabelle 1 Kombinationsbeiwerte nach Tabelle A.1.1 aus DIN EN 1990 [3]

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten in Versammlungsräumen	0,7	0,7	0,6
Schneelasten für Hochbauten < 1000 m ü. NN	0,5	0,2	0,0
Windlasten für Hochbauten	0,6	0,2	0,0

Daraus ergibt sich folgendes Belastungsbild. Es wird angenommen, dass die Lasten aus dem Riegel ohne eine planmäßige Ausmitte in die beiden Stiele eingeleitet werden.

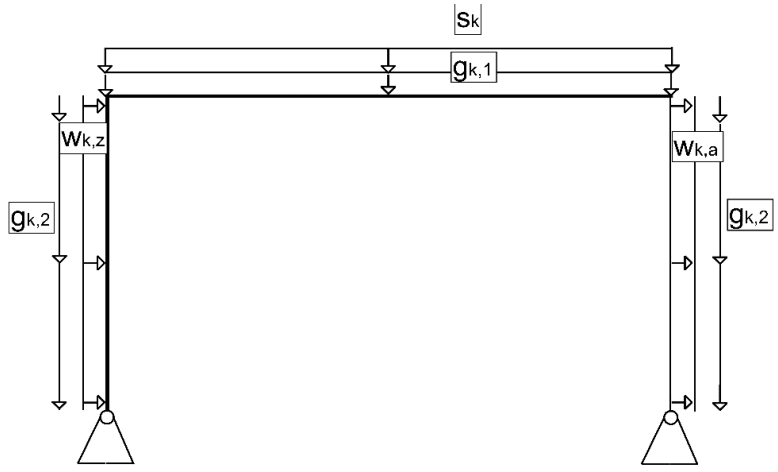


Bild 3 Charakteristische Belastung des Rahmens

Für die Berechnung bei Normaltemperatur werden die Rahmenriegel durch die Dachpaneele quer zur Rahmenachse gehalten. Im Anwendungsfall ist dieser Nachweis speziell zu führen oder es müssen andere Maßnahmen zur Verhinderung des Biegedrillknickens ergriffen werden. Für die Berechnung im Brandfall wird die seitliche Halterung der Rahmenriegel durch die Dachpaneele weiter vorausgesetzt, da die Dachpaneele durch die wärmedämmende Isolierung der oberen Blechebene ihre Steifigkeit praktisch nicht verlieren. In der Modellierung, wird der Rahmenriegel in der Mitte des Obergurtes an der gesamten Flanschaußenseite gegen Verschiebung quer zur Rahmenachse gehalten. Bei den Rahmenstielen fehlt eine seitliche Halterung, so dass hier der Nachweis Biegedrillknicken geführt werden muss.

Für die Bemessung der Stahlrahmen wird als maßgebende Temperaturbeanspruchung der Verlauf mit den höchsten Brandraumtemperaturen aus dem vorherigen Beitrag [1] ausgewählt (s. Bild 4). Auf der sicheren Seite liegend werden diese Brandraumtemperaturen unverändert über die Höhe der Rahmenstiele und über die Länge des Rahmenriegels angesetzt. Dabei wird in diesem Beitrag aus Gründen der Übersichtlichkeit vernachlässigt, dass der untere Teil des Rahmenstiels teilweise durch die Tragkonstruktion für die Stuhlreihen vor dem direkten Brandangriff abgeschirmt wird. Hier sind im Anwendungsfall ggf. weitere Berechnungen auf Grundlage lokaler Brandszenarien erforderlich.

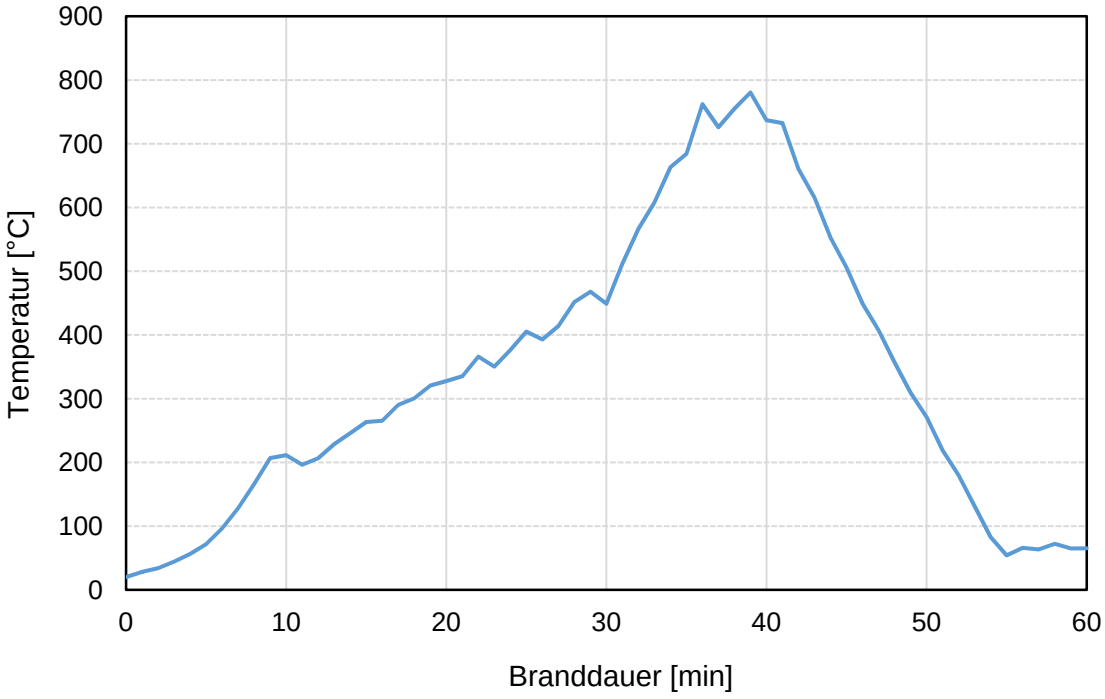


Bild 4 *Zeitabhängige Temperatureinwirkung auf die Konstruktion im Riegel 3 (aus [1])*

MATERIALGESETZE

Die Erwärmung eines Bauteils ist abhängig vom Wärmeübergang am Bauteilrand und der Wärmeströmung im Bauteilinnern. Der durch ein Temperaturgefälle im Bauteil hervorgerufene Wärmestrom wird in seiner Geschwindigkeit von den temperatur- und werkstoffabhängigen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)], spezifische Wärme c_p [J/(kgK)] und Rohdichte ρ [kg/m³] beeinflusst. Als Wärmeübergangsbedingungen werden für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der beflammten Oberfläche α_c = 35 W/(m²K) und an der brandabgekehrten Oberfläche α_c = 9 W/(m²K) sowie ein resultierender Emissionsgrad von ε_{res} = 0,7 angenommen [4].

Die temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften für Baustahl sind in Eurocode 3 Teil 1-2 [5] als temperaturabhängige Rechenfunktionen angegeben. Bild 5 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf von Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifischer Wärme (c_p) und Rohdichte von Baustahl. In Bild 6 sind temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl S235 nach [5] dargestellt. Bild 7 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit (λ), spezifischer Wärme (c_p) und Rohdichte (ρ) von Mineralwolle.

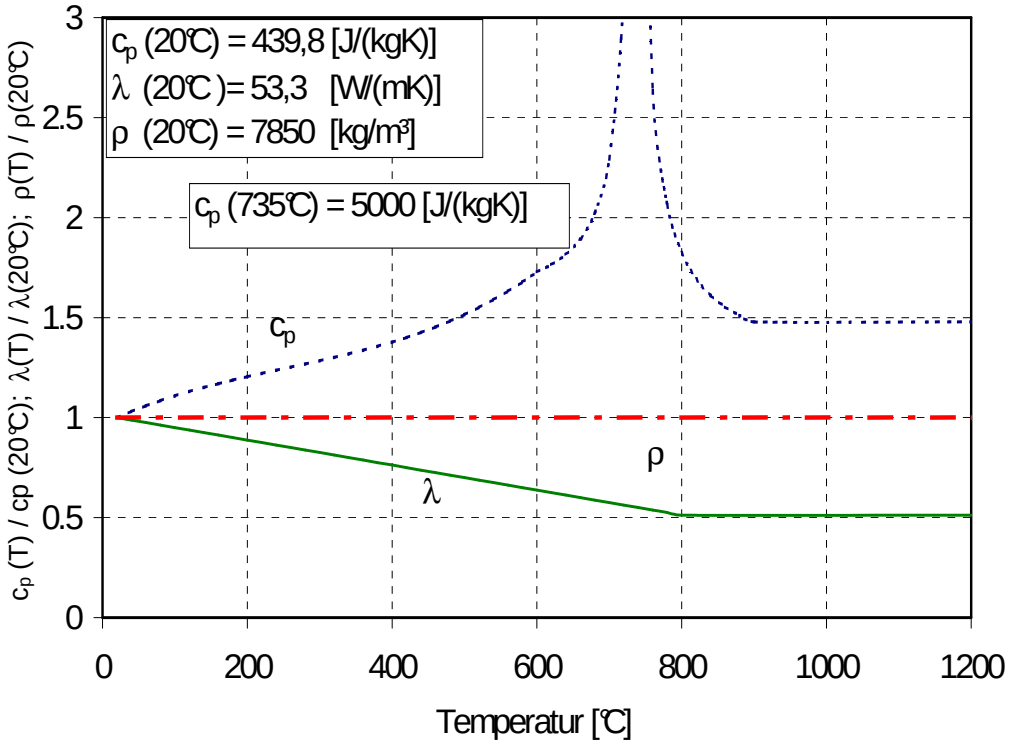


Bild 5 *Temperaturabhängiger Verlauf thermischer Materialeigenschaften von Baustahl*

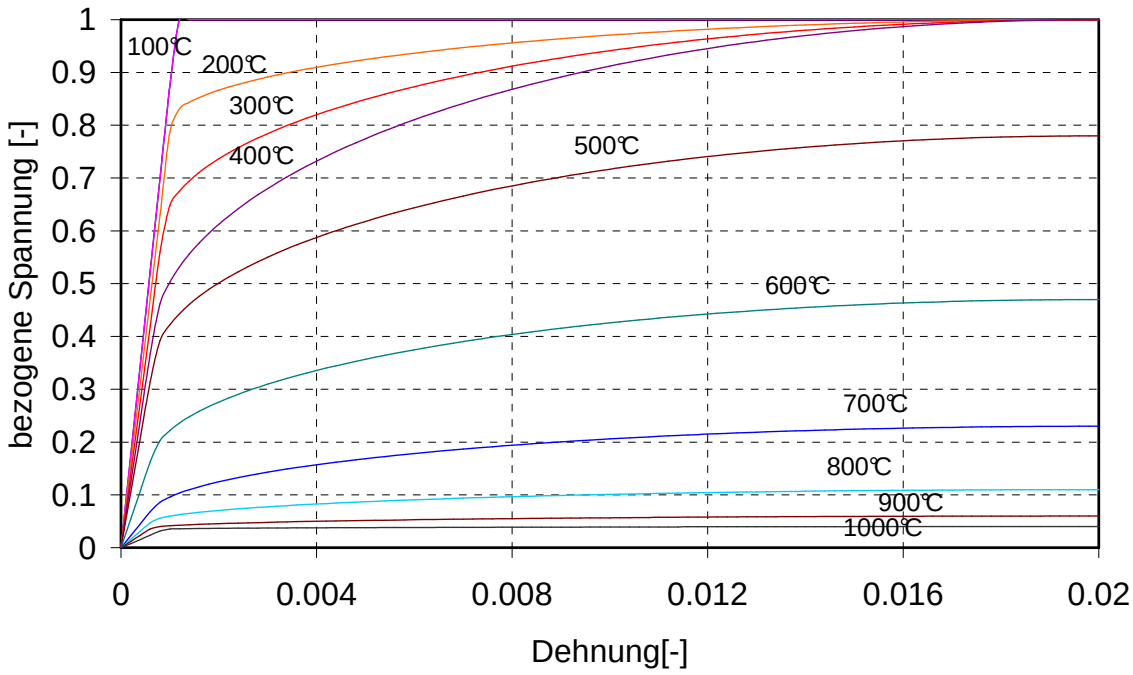


Bild 6 *Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien für Baustahl S235*

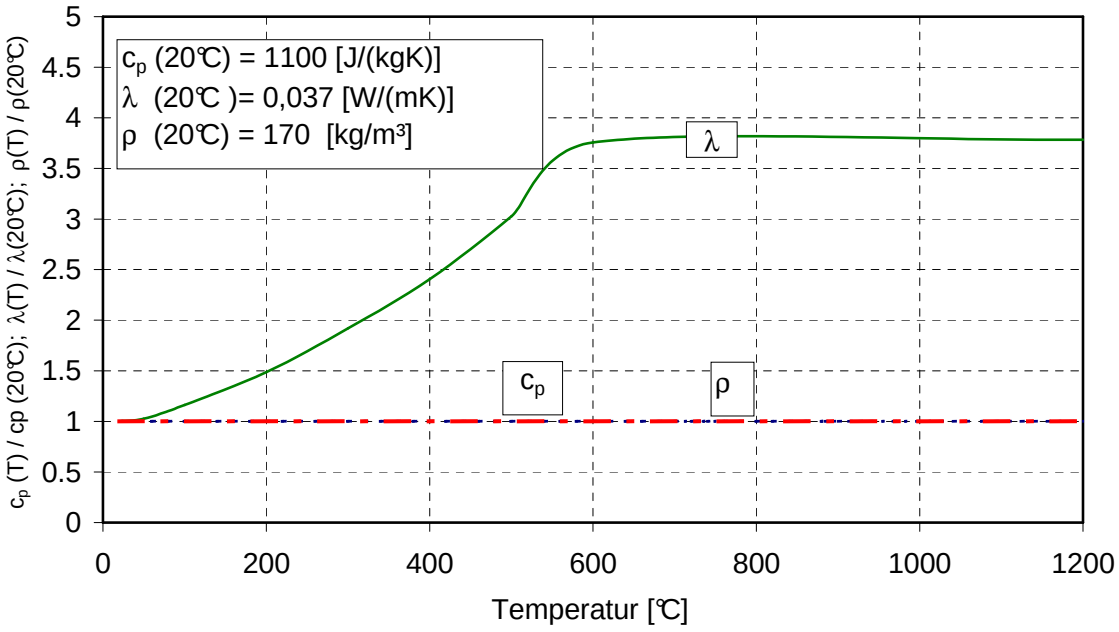


Bild 7 *Temperaturabhängiger Verlauf thermischer Materialeigenschaften von Mineralwolle [6]*

BEMESSUNG DER KONSTRUKTION MIT DEM VEREINFACHTEN RECHEN-VERFAHREN NACH EUROCODE 3 TEIL 1-2

Bemessung auf Temperaturebene

Das vereinfachte Rechenverfahren nach Eurocode 3 Teil 1-2 [5], Abschnitt 4.2.4 erlaubt die Bestimmung der kritischen Temperatur in Abhängigkeit des Lastausnutzungsgrades μ_0, sofern nicht Verformungskriterien oder Einflüsse aus Stabilitätsproblemen zu beachten sind. Aus diesem Grund darf lediglich der Riegel auf Temperaturebene bemessen werden, da hier seitliche Halterungen vorhanden sind, die das Biegedrillknicken verhindern. Der Lastausnutzungsgrad der Rahmen $\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$ beträgt für den Riegel 0,59. Damit ergibt sich die kritische Stahltemperatur für die Riegel zu 557 °C.

Zur Ermittlung der Bauteiltemperatur bietet der Eurocode 3 Teil 1-2 [5], Abschnitt 4.2.5.1 ein Verfahren an, mit dem der Temperaturanstieg $\Delta\theta_{a,t}$ eines ungeschützten Stahlbauteils während eines Zeitintervalls Δt berechnet werden kann.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \Delta t \qquad (3)$$

Dabei ist:

$\dot{h}_{net,d}$	der flächenbezogene Bemessungswert des Nettowärmestroms
k_{sh}	Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt
A_m/V	der Profilfaktor des ungeschützten Stahlbauteils
A	die dem Brand ausgesetzte Oberfläche des Bauteils pro Längeneinheit
V	das Bauteilvolumen pro Längeneinheit
c_a	die spezifische Wärme von Stahl
Δt	das Zeitintervall
ρ_a	die Dichte von Stahl

Bei I-Querschnitten unter anderer als der nominalen Brandeinwirkung darf der Abschattungseffekt bestimmt werden mit:

$k_{sh} = [A_m/V]_b / [A_m/V]$

Dabei ist $[A_m/V]_b$ der Profilfaktor für den gedachten, das Profil umschließenden Kasten. Konservative Ergebnisse werden erzielt, wenn der Abschattungseffekt wie in diesem Beispiel nicht berücksichtigt wird (d. h. $k_{sh} = 1$). Bei A_m und V handelt es sich um profilabhängige konstante Größen. ρ_a darf mit 7.850 kg/m^3 ebenfalls als konstant angenommen werden. Die spezifische Wärme c_a wird

temperaturabhängig gemäß Bild 5 angesetzt. Die Stahltemperatur θ_a wird in ℃ angegeben.

Der Netto-Wärmestrom $h'_{net,d}$ auf der brandbeanspruchten Oberfläche kann nach [4] unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung berechnet werden. Der konvektive Anteil des Netto-Wärmestroms ergibt sich dabei nach [4], wobei $\varepsilon_m = 0{,}7$ und $\varepsilon_f = 1{,}0$ [4], [5], sowie $\phi = 1{,}0$ gewählt wurde. Die Berechnung der Bauteiltemperatur nach Gleichung (3) erfolgt zweckmäßig mit einem Tabellenkalkulations- oder Mathematikprogramm. Die Strahlungstemperatur des Brandes wird gleich der Gastemperatur angenommen, die aus der CFD-Berechnung stammt. Die Zeitschritte Δt sollten 5 s nicht überschreiten [5]. Für die zunächst unbekannte Bauteiltemperatur wird der Wert aus dem vorausgehenden Rechenschritt eingesetzt und daraus die Temperaturdifferenz $\Delta\theta_{a,t}$ nach Gleichung (3) berechnet.

Das Ergebnis des vereinfachten Rechenverfahrens ist in Bild 8 dargestellt. Die max. Stahltemperatur des Riegels beträgt 649℃ und des Stiels 672℃. Verglichen werden die Bauteiltemperaturen in den Querschnitten des Rahmenriegels mit der kritischen Temperaturen. Es ist zu sehen, dass die Bauteiltemperatur im Riegel die kritische Stahltemperatur deutlich übersteigt. Somit kann der Rahmenriegel nach der Nachweismethode der kritischen Temperatur nicht ungeschützt ausgeführt werden.

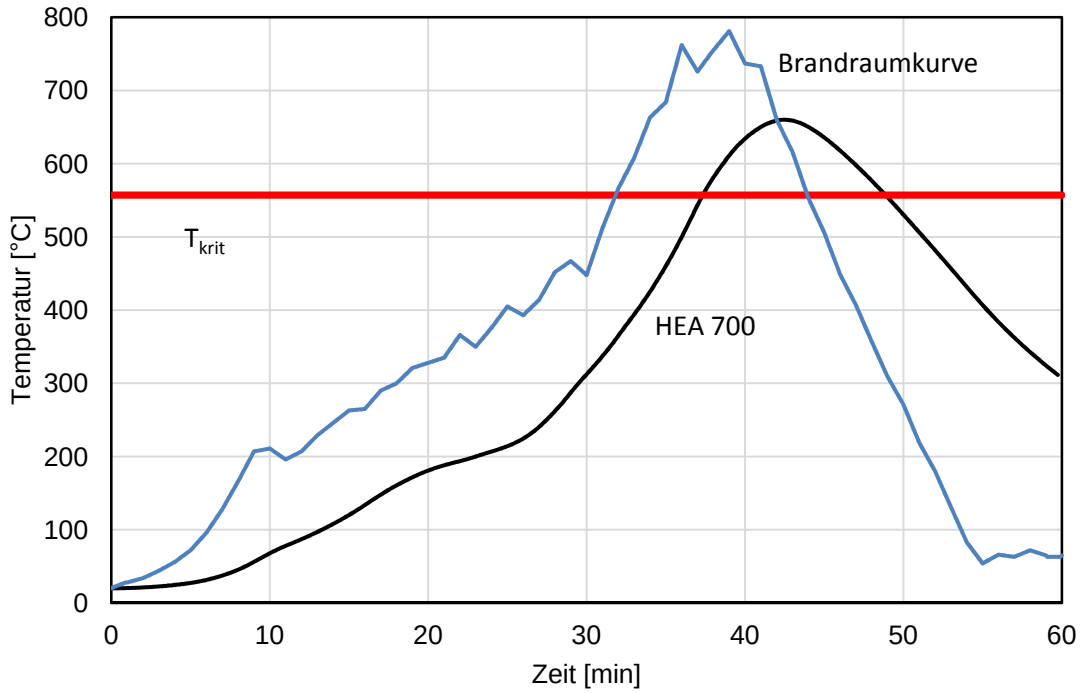


Bild 8 *Temperaturzeitverlauf der Einwirkung und des Bauteils im Rahmenriegel (HEA 700) nach dem vereinfachten Rechenverfahren nach [5]*

Bemessung der stabilitätsgefährdeten Bauteile (hier Stiele)

Der Nachweis der Standsicherheit der Stiele im Brandfall wird nach dem vereinfachten Rechenverfahren auf Tragfähigkeitsebene gemäß Abschnitt 4.2 nach [5] geführt.

Die Querschnittswerte, Stahlgüte und Profilkennwerte für das verwendete Profil sind in Tabelle 2 dargestellt. Aus der thermischen Analyse nach Gleichung 3 ergibt sich eine Maximaltemperatur von ca. 672℃ im Stiel. Gemäß [7] wird das HEA 500-Profil in die Querschnittsklasse 1 eingeordnet.

Tabelle 2 Profilkennwerte des Stiels

Stütze / Querschnittswert	Rahmenstiel
Profil	HEA 500
Stahlgüte	S235
E-Modul [N/mm²]	210.000
Profilfläche A [cm^2]	198
I_y / I_z [cm^4]	86970/10370
$W_{el,y}$ / $W_{el,z}$ [cm^3]	3550/691
$W_{pl,y}$ / $W_{pl,z}$ [cm^3]	3949/1059
I_T [cm^4]	309
I_w [cm^6]	5643000

Bei der Ermittlung der abgeminderten mechanischen Kennwerte in Abhängigkeit der unregelmäßigen Querschnittstemperatur wird, auf der sicheren Seite liegend, die maximale Temperatur im Querschnitt als maßgebende Temperatur angesetzt.

Tabelle 3 zeigt die abgeminderten mechanischen Kennwerte (gemäß Tabelle nach 3.1 [5]) für die verschiedenen maßgebenden Stiele bei der Bemessungstemperatur.

Tabelle 3 Abgeminderte mechanische Kennwerte bei Bemessungstemperatur für die Stiele

Querschnittswert	Rahmenstiel
Bemessungstemperatur	672℃
$k_{y,\theta}$ [-]	0,297
$k_{E,\theta}$ [-]	0,18

Die Nachweise für die durch Biegung und axialen Druck beanspruchten Bauteile (Knicksicherheitsnachweis, Biegedrillknicknachweis) werden gemäß Abschnitt 4.2.3.5 nach [5] geführt. Die maßgebende Lastfallkombination setzt sich aus den Einwirkungen durch Eigengewicht und Wind zusammen:

$$E_d = E\,[\sum 1{,}0 \cdot G_{ki} + 0{,}2 \cdot w_k] \qquad (4)$$

Daraus ergeben sich für die Stiele folgende Einwirkungen:

Aus Eigengewicht:

$N_{Ed,fi} = 1{,}0 \cdot (G_{k,1} + G_{k,2}) = 1{,}0 \cdot 2{,}21$ kN/m $\cdot 29{,}1$ m $\cdot 0{,}5 + 1{,}0 \cdot 1{,}88$ kN/m $\cdot 12$ m $+1{,}55$ kN/m $\cdot 12$ m $+ 2{,}04$ kN/m $\cdot 29{,}1$ m $\cdot 0{,}5 = 102{,}9$ kN

Aus Wind:

Für die Bemessung maßgebend ist das Rahmeneckmoment:

$M_{wk} = -49{,}28$ kNm

$M_{wd} = 0{,}2 \cdot (-49{,}28)$ kNm $= -9{,}86$ kNm

Zusätzlich entsteht infolge der horizontalen Windbelastung eine vertikale Auflagerkraft, die aber aufgrund ihrer geringen Größe hier vernachlässigt wird. Das Moment infolge der Windbeanspruchung wirkt in Richtung der starken Achse des HEA 500 Profils. Im Folgenden wird der Biegeknicknachweis entsprechend Abschnitt 4.2.3.5, Gleichung 4.21a [5] sowohl für die schwache als auch die starke Achse und der Biegedrillknicknachweis entsprechend Abschnitt 4.2.3.5, Gleichung 4.21b [5] nur für die starke Achse geführt.

Biegeknicknachweis:

Die Knicklänge wird entsprechend [8] für einen Rahmen mit gelenkig gelagerten Fußpunkten bestimmt. Dabei wird in Abhängigkeit der Steifigkeiten von Stiel und Riegel der Verzweigungslastfaktor und daraus die Knicklängen der Rahmenstiele ermittelt. Damit ergibt sich die Knicklänge zu:

$s_{k,z} = 27{,}82$ m

Für den Biegeknicknachweis werden folgende Gleichungen und Kennwerte entsprechend [5] verwendet:

Teilsicherheitsbeiwert im Brandfall: $\gamma_{M,fi} = 1{,}0$

Trägheitsradius: $i_z = \sqrt{(I_z / A)}$ (5)

Schlankheitsgrad: $\lambda_{k,z} = s_{ki,z} / i_z$

$$\lambda_1 = 93{,}6 \cdot \sqrt{(235 / f_y)} \quad (6)$$

bezogene Schlankheit: $$\overline{\lambda} = \frac{\lambda_{k,z}}{\lambda_1} \quad (7)$$

bezogene Schlankheit im Brandfall: $\overline{\lambda}_{k,z} = \overline{\lambda} \cdot \sqrt{k_{y,\theta} / k_{E,\theta}}$ (8)

Abminderungsfaktor $\chi_{fi,z}$ für das Biegeknicken: $$\chi_{fi,z} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \overline{\lambda}_{\theta,z}^2}} \quad (9)$$

mit: $\alpha = 0{,}65 \cdot \sqrt{235/235} = 0{,}65$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \alpha \overline{\lambda}_\theta + \overline{\lambda}_\theta^2\right) \quad (10)$$

Beiwert zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs im Brandfall k_y , k_z

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{m,fi}} \leq 3{,}0 \quad (12)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y / \gamma_{m,fi}} \leq 3{,}0 \quad (13)$$

mit:

Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs β_m=1,1 (ungünstigster Wert)

$$\mu_y = (2 \cdot \beta_{M,y} - 5) \cdot \overline{\lambda}_{y,\theta} + 0{,}44 \cdot \beta_{M,y} - 0{,}29 < 0{,}8 \quad (14)$$

$$\mu_z = (1{,}2 \cdot \beta_{M,z} - 3) \cdot \overline{\lambda}_{z,\theta} + 0{,}44 \cdot \beta_{M,z} - 0{,}29 < 0{,}8 \quad (15)$$

Die Ermittlung der Kennwerte und Abminderungsfaktoren erfolgt in Tabellenform in Tabelle 4.

Tabelle 4 Kennwerte für den Knicksicherheitsnachweis

Stütze/Berechneter Wert	Rahmenstiel
i_y / i_z [cm]	20,96 / 7,24
$\bar{\lambda}_y$ / $\bar{\lambda}_z$	1,4 / 4,1
$\bar{\lambda}_{\theta,y}$ / $\bar{\lambda}_{\theta,z}$	1,82 / 5,26
φ_θ	2,74/ 16,0
μ_y / μ_z	-4,89/ -8,34
k_y / k_z	2,74 / 3
$\chi_{fi,y} / \chi_{fi,z}$	0,21 / 0,032

Nachweis Biegeknicken nach Abschnitt 4.2.3.5, Gleichungen 4.21a [5]:

$$\frac{N_{fi,\,Ed}}{\chi_{\min,\,fi} \cdot A \cdot k_{y,\,\theta} \cdot f_{y,k} / \gamma_{M,\,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,\,fi,\,Ed}}{W_{pl,y} \cdot k_{y,\,\theta} \cdot f_{y,k} / \gamma_{M,\,fi}} \le 1{,}0 \qquad (16)$$

Biegeknicknachweis (starke Achse):

$$\frac{102{,}9}{0{,}032 \cdot 198 \cdot 0{,}297 \cdot 235/10} + \frac{1{,}93 \cdot 9{,}86 \cdot 100}{3949 \cdot 0{,}297 \cdot 235/10} = 2{,}32 + 0{,}1 = 2{,}4 > 1{,}0$$

Biegeknicknachweis (schwache Achse):

$$\frac{102{,}9}{0{,}032 \cdot 198 \cdot 0{,}297 \cdot 235/10} = 2{,}3 > 1{,}0$$

Der Nachweis im Brandfall konnte nicht erbracht werden.

Als nächstes wird aus Gründen der Vollständigkeit für den Stiel der Biegedrillknicknachweis geführt. Dieser ist nur für die starke Achse zu führen, da nur hier zusätzlich zur Normalkraft eine Momentenbeanspruchung vorliegt. Im Brandfall erfolgt der Nachweis nach Abs. 4.2.3.5, Gleichungen 4.21b [5]. Die Beanspruchungen sind identisch mit denen, die für den Biegeknicknachweis ermittelt wurden. Die Ermittlung der Kennwerte und Abminderungsfaktoren berechnet sich aus folgenden Gleichungen:

Ideales Biegedrillknickmoment:

$$M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[\sqrt{(c^2 + 0{,}25 \cdot z_p^2)} + 0{,}5 \cdot z_p\right] \tag{17}$$

mit: $$c^2 = (I_w + 0{,}039 \cdot l^2 \cdot I_T) / I_z \tag{18}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2} \tag{19}$$

Bezogene Schlankheit für das Biegedrillknicken:

$$\overline{\lambda}_{lt} = \sqrt{W_{pl,y} \cdot f_y / M_{cr}} \tag{20}$$

Allgemeiner Abminderungsfaktor für das Biegedrillknicken im Brandfall:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\Phi_{LT,\Theta,com} + \sqrt{\left[\Phi_{LT,\Theta,com}\right]^2 - \left[\overline{\lambda}_{LT,\Theta,com}\right]^2}} \tag{21}$$

mit: $$\Phi_{LT,\Theta,com} = 0{,}5 \cdot \left[1 + \alpha \overline{\lambda}_{LT,\Theta,com} + \left(\overline{\lambda}_{LT,\Theta,com}\right)^2\right] \tag{22}$$

$$\lambda_{LT,\Theta,com} = \overline{\lambda}_{lt} \cdot \sqrt{k_{y,\Theta} / k_{E,\Theta}} \tag{23}$$

$$\alpha = 0{,}65\sqrt{235 / f_y} \tag{24}$$

Der Biegedrillknicknachweis im Brandfall unter zusätzlicher Druckbeanspruchung wird für einen Querschnitt der Querschnittsklasse 1 gemäß Gleichung 4.21b [5] nachgewiesen:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}}} \le 1{,}0 \tag{18}$$

mit $$\gamma_{M,fi} = 1{,}00$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,\Theta} \cdot \frac{f_{y,k}}{\gamma_{M,fi}}} \le 1 \tag{19}$$

Tabelle 5 Kennwerte für den Knicksicherheitsnachweis

Berechneter Wert	Rahmenstiel
ζ	2,25
c^2 [cm²]	2217,59
z_p [cm]	24,5
M_{cr} [kNm]	1993
$\overline{\lambda}_{LT}$	0,647
$\overline{\lambda}_{LT,\Theta,com}$	0,83
α	0,65
$\Phi_{LT,\Theta,com}$	1,12
$\chi_{LT,fi}$	0,54

Auf der sicheren Seite liegend wird $k_{LT} = 1$ gesetzt. Der Biegedrillknicknachweis lautet wie folgt:

$$\frac{102{,}9}{0{,}032 \cdot 198 \cdot 0{,}297 \cdot 235/10} + \frac{1{,}0 \cdot 986}{0{,}54 \cdot 3949 \cdot 0{,}297 \cdot 235/10} = 2{,}3 + 0{,}066 = 2{,}4 > 1{,}0$$

Der Nachweis gegen Biegedrillknicken im Brandfall wird ebenfalls nicht erfüllt. Die Lösungsmöglichkeit des Problems könnte in einem brandschutztechnischen Schutz (Bekleidung, Anstrich) der Bauteile oder durch Führung eines Nachweises nach dem erweiterten Berechnungsverfahren (Ebene 3-Verfahren) bestehen.

BEMESSUNG DER KONSTRUKTION MIT DEM ALLGEMEINEN RECHENVERFAHREN NACH EUROCODE 3 TEIL 1-2

In diesem Abschnitt wird der Nachweis mit Hilfe des allgemeinen Rechenverfahren (Ebene 3-Verfahren) geführt. Dazu wird zunächst die Temperaturverteilung innerhalb des Querschnitts ermittelt (thermische Analyse) und danach die Tragfähigkeit des gesamten Rahmens in einer mechanischen Analyse berechnet.

Thermische Analyse

Für die Berechnung der Bauteiltemperaturen wird ein 2-D Finite-Element-Modell erzeugt. Verwendet wird das FE-Programm ANSYS. Dabei werden die Temperaturverteilungen getrennt für die Stiele und den Riegel des Rahmens ermittelt.

Der Aufbau des 2-D-Temperaturmodells wird exemplarisch für den Querschnitt des Rahmenriegels gezeigt (Bild 9). Für das FE-Modell wurde ein Ausschnitt aus dem Rahmenriegel mit dem daraufliegenden Dachpaneel gewählt. Die Berücksichtigung des Dachpaneels ist wichtig, um das verzögerte Abströmen der Wärme nach oben bzw. nach außen in der thermischen Analyse zu erfassen. Es wurde im Modell ein Überstand der Dachpaneele auf beiden Seiten von 50 cm berücksichtigt. Das Riegelprofil wird von drei Seiten beflammt. Da eine 2-D-Temperaturberechnung wenig Rechenzeit in Anspruch nimmt, kann die Elementierung nahezu beliebig fein gewählt werden.

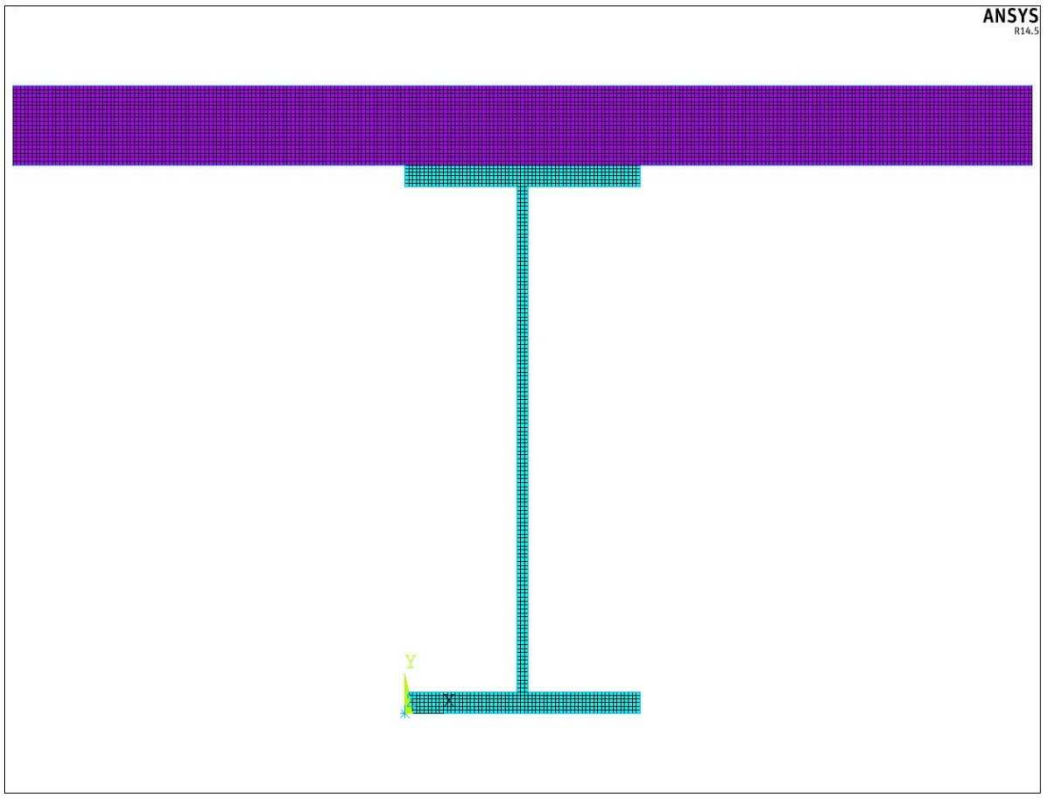


Bild 9 FE-Modell für die Temperaturberechnung des Rahmenriegels

Den Elementen werden die thermischen Materialeigenschaften von Stahl und Dämmmaterial (s. Bild 5 und Bild 7) zugewiesen. Als Strahlungsquelle wird ein Punkt außerhalb des Querschnitts gewählt. Zudem muss die Wärmestrahlung aufnehmende Oberfläche des Querschnitts definiert werden. Dabei handelt es sich um die Oberfläche des Stahlprofils (mit Ausnahme der brandabgekehrten Seite des oberen Flansches) sowie die Unterseite der Dachkonstruktion. Für

diese Oberflächen werden die Wärmeübergangsbedingungen definiert, welche durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz mit der Konstante $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ definiert sind.

Die Ergebnisse der Erwärmungsberechnung des Riegels zeigen, dass eine Maximaltemperatur von 703 ℃ im Steg und 664℃ im F lansch erreicht wird.

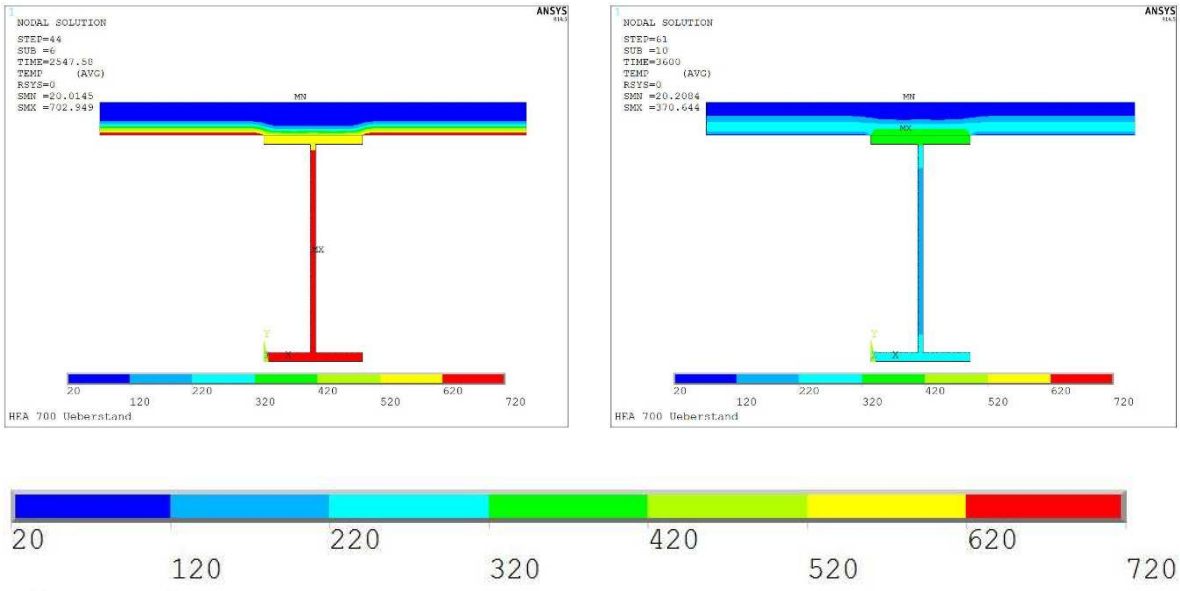


Bild 10 Erwärmung des Rahmenriegels HEA 700, links: beim Temperaturmaximum im Steg nach 2.540 s, rechts: am Ende der Wärmefreisetzung nach 3600 s

Die Erwärmung der Profile im Steg wird in Bild 11 dargestellt. Das Temperaturmaximum im Steg wird ca. 200 s nachdem die Brandraumtemperatur ihr Maximum überschritten hat, erreicht.

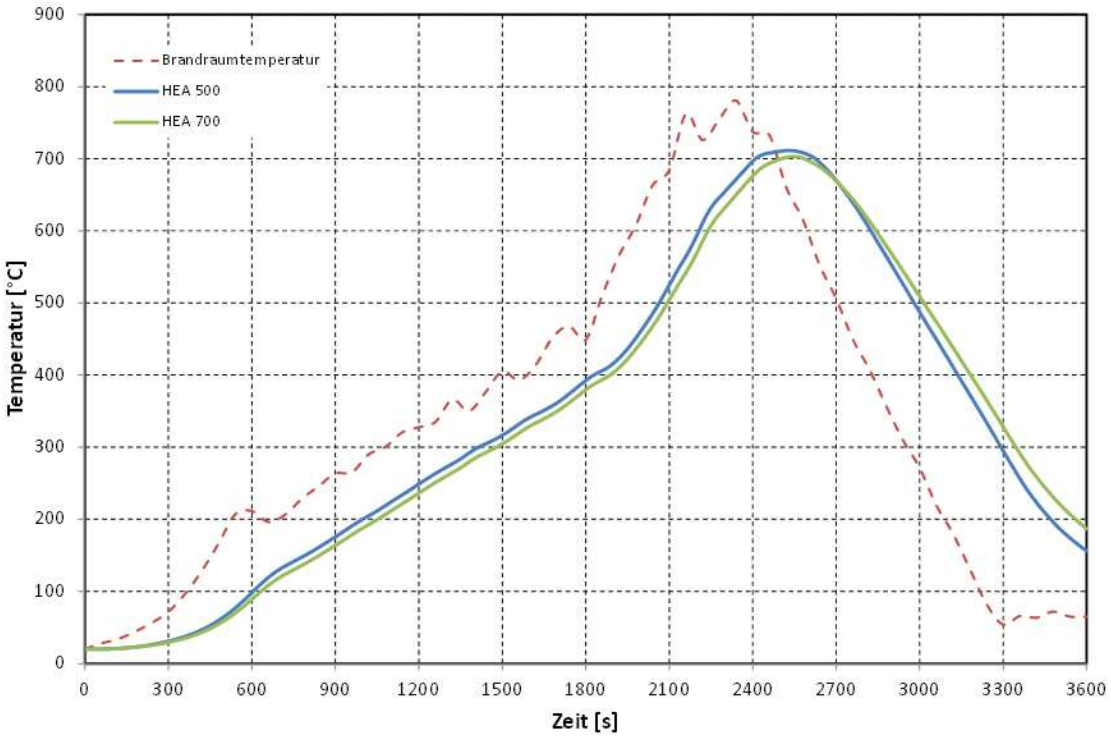


Bild 11 Temperaturverlauf im Steg der Profile HEA 500 und HEA 700

Mechanische Analyse

Die Temperaturen für die Profile HEA 500 und HEA 700 differieren nur unwesentlich, so dass als Einwirkung für die Tragwerksanalyse der Temperaturverlauf im Steg des Stützenprofils HEA 500 mit einer maximalen Temperatur von 711 ℃ für alle Stege im Rahmen angenommen wird. De r Temperaturverlauf im unteren Flansch des HEA 500 ist mit einer maximalen Temperatur von 679℃ der maßgebende Verlauf für alle anderen Bauteile (Flansche, Steifen, Kopf- und Fußplatte).

Die Auflagerung der Rahmenstiele erfolgt über eine Fußplatte. Der Mittelknoten der Fußplatte wird in Richtung des Rahmenstiels (y-Achse) gehalten. Die Fußplatte wird an den Knoten der Flansche, d. h. quer zur Rahmenachse (z-Achse) und der Steg in Richtung der Rahmenachse (x-Achse) gehalten. Dadurch wird eine minimale Einspannung simuliert, wie sie bei realen Rahmen infolge der Fixierung der Fußplatte durch Dübel oder Anker auftritt.

Die Rahmenecken werden außen zwischen Stütze und Riegel senkrecht zur Rahmenachse aufgelagert. Der Obergurt des Riegels wird in Rahmenmitte ebenfalls quer zur Rahmenachse (in z-Richtung) gehalten. Die Elementgröße beträgt ca. 5 cm.

Die Ergebnisse der mechanischen Analyse zeigen, dass es auf Grund der hohen Temperaturen und der Bauteilabmessungen – insbesondere der Länge des Rahmenriegels – zu großen Verformungen von bis zu 57 cm kommt (Bild 12).

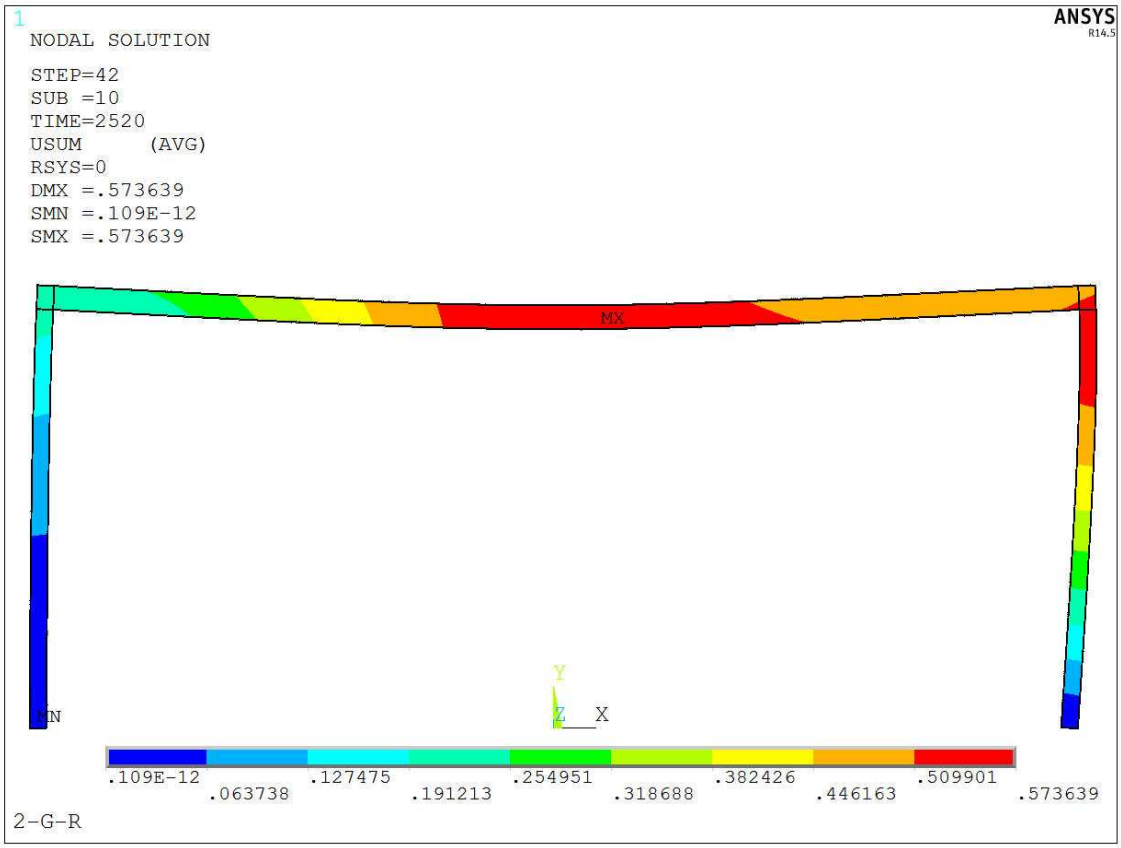


Bild 12 *Gesamtverformung des Rahmens (True Scale) beim Verformungsmaximum. Die Skala zeigt die summierten Verformungen der Knoten [m] in alle Richtungen*

Im Bereich der Rahmenecke treten plastische Dehnungen auf (Bild 13). Dies macht deutlich, dass mit Hilfe der genauen rechnerischen Analyse die Tragfähigkeit bis in den Bereich großer Verformungen erfasst wird. Bei Anwendung des allgemeinen Rechenverfahrens nach der FE-Methode können Tragwerksreserven mobilisiert werden, die weder beim tabellarischen Nachweis noch beim vereinfachten Rechenverfahren berücksichtigt werden können.

In Bild 13 wird die horizontale und in Bild 14 die vertikale Verschiebung der linken Rahmenecke gezeigt. Aufgrund der Erwärmung des Rahmens kommt es zu einer starken Verlängerung des Rahmenriegels. Dadurch bewegen sich die Rahmenecken auseinander. Diese Verschiebung ist auf der windzugewandten Seite des Rahmens so groß, dass die Verschiebung infolge Windeinwirkung aufgehoben und die Verschiebung des Rahmenknotens nach ca. 700 s in entgegengesetzter Richtung erfolgt. Nach ca. 2100 s steigt die Durchbiegung des Rahmenriegels sehr stark an, so dass die Rahmenecke zu diesem Zeitpunkt ebenfalls einen starken Verformungsanstieg nach innen aufweist.

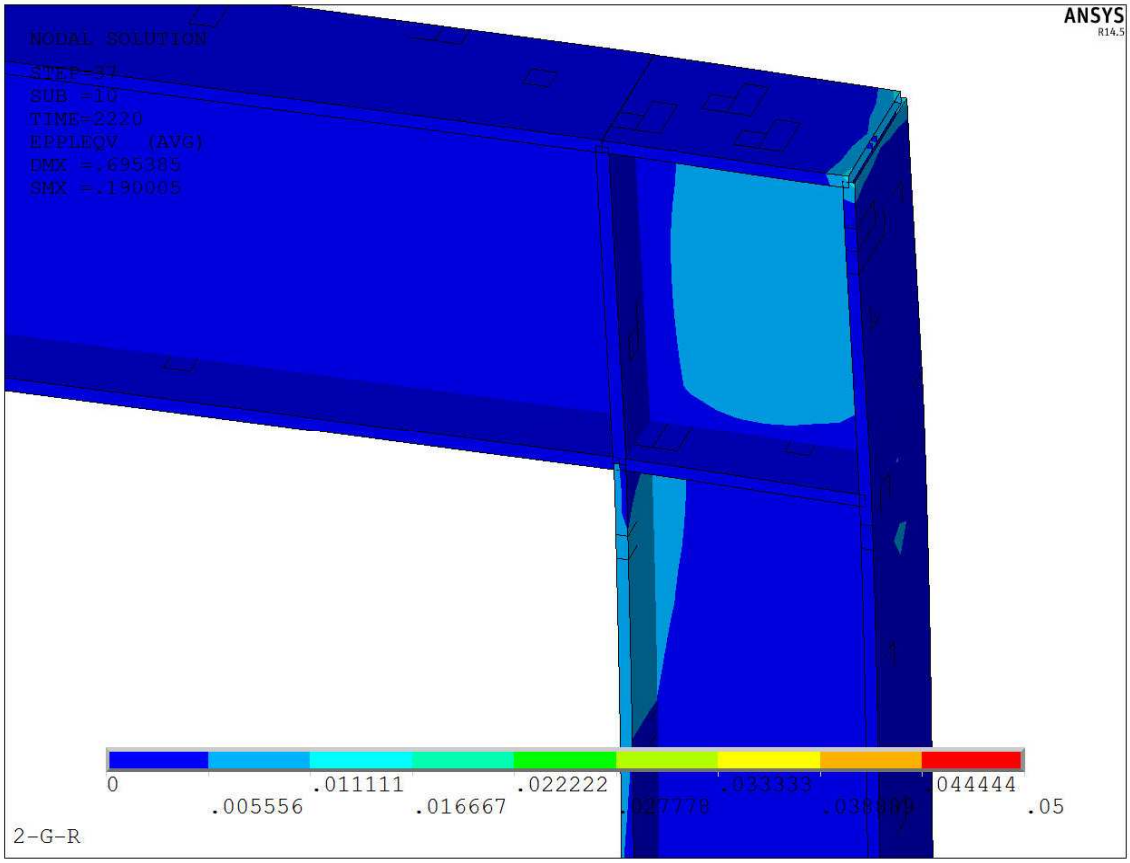


Bild 12 Plastische Dehnungen

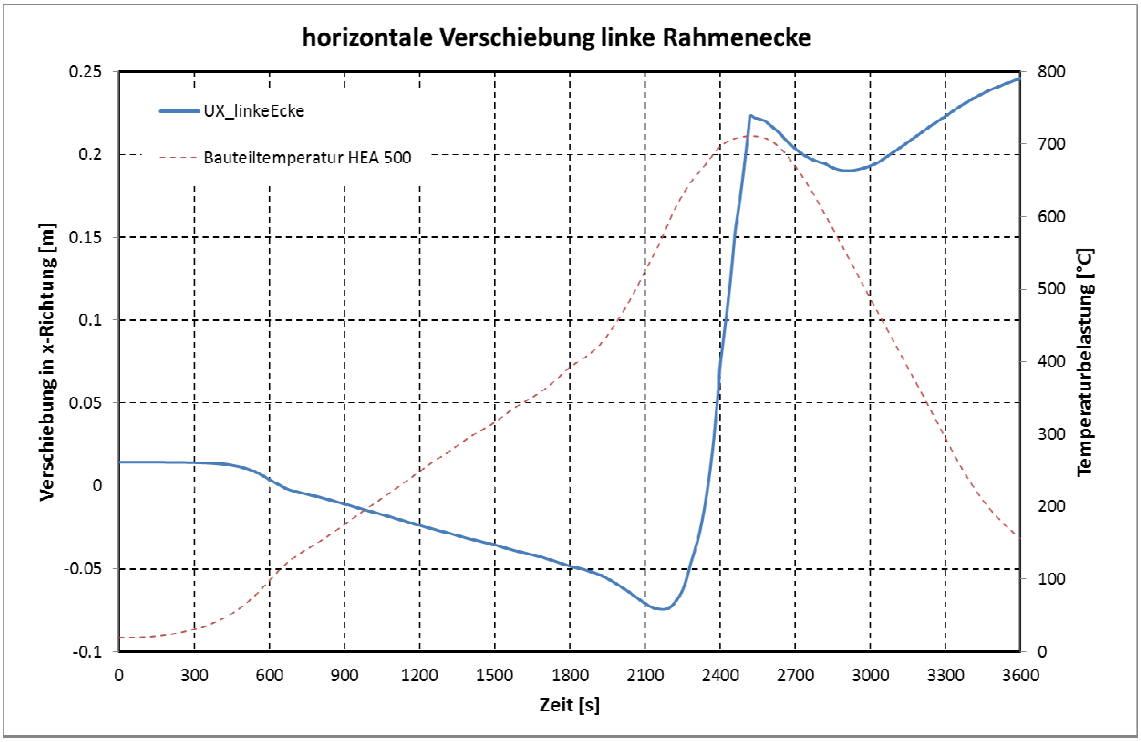


Bild 13 Horizontale Verschiebung der linken (windzugewandten) Rahmenecke

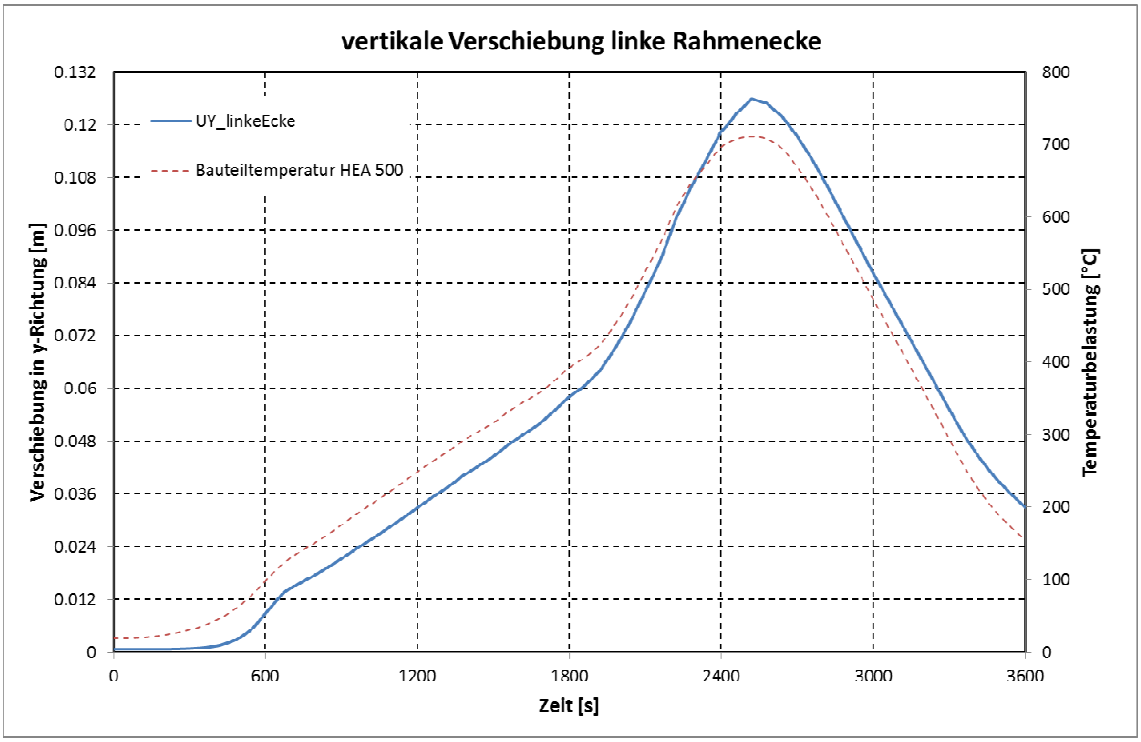


Bild 14 Vertikale Verschiebung der linken Rahmenecke

Betrachtet man die vertikale Verschiebung des Untergurtes des Rahmenriegels in Feldmitte in Bild 15, so ist zunächst die Durchbiegung aus der Lasteinwirkung zu erkennen. Mit zunehmender Temperatureinwirkung scheint sich der Riegel nach oben durchzubiegen.

In Wirklichkeit überlagern sich hier jedoch zwei Effekte, wie durch den Vergleich von Bild 14 und Bild 15 deutlich wird. Zum einen vergrößert sich die Durchbiegung des Riegels infolge der Lasteinwirkungen, da durch die Temperatureinwirkung die Steifigkeit sinkt. Zum anderen wird durch die thermische Ausdehnung der Stiele der gesamte Riegel angehoben.

Im Bild 16 wird die thermische Ausdehnung der Stiele herausgerechnet und damit die tatsächliche Durchbiegung des Rahmenriegels dargestellt.

Die Versagensbedingungen sind bei Anwendung eines allgemeinen Rechenverfahrens ingenieurmäßig festzulegen. Dabei ist auch das Trag- und Verformungsverhalten anschließender Bauteile (Trenn- und Zwischenwände, Unterdecken) zu berücksichtigen. Als Versagenskriterien können die Tragfähigkeit des Bauteils, die Größe der Verformungen und die Versagensgeschwindigkeit definiert werden.

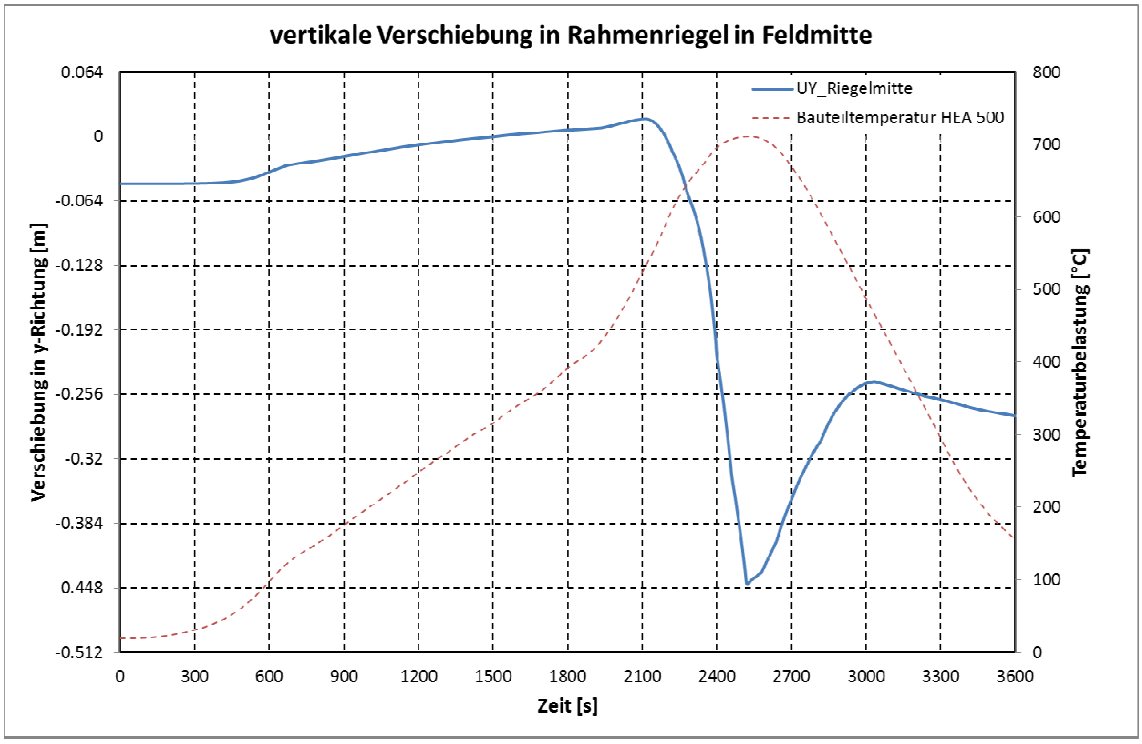


Bild 15 Vertikale Verschiebung des Untergurtes des Rahmenriegels in Feldmitte

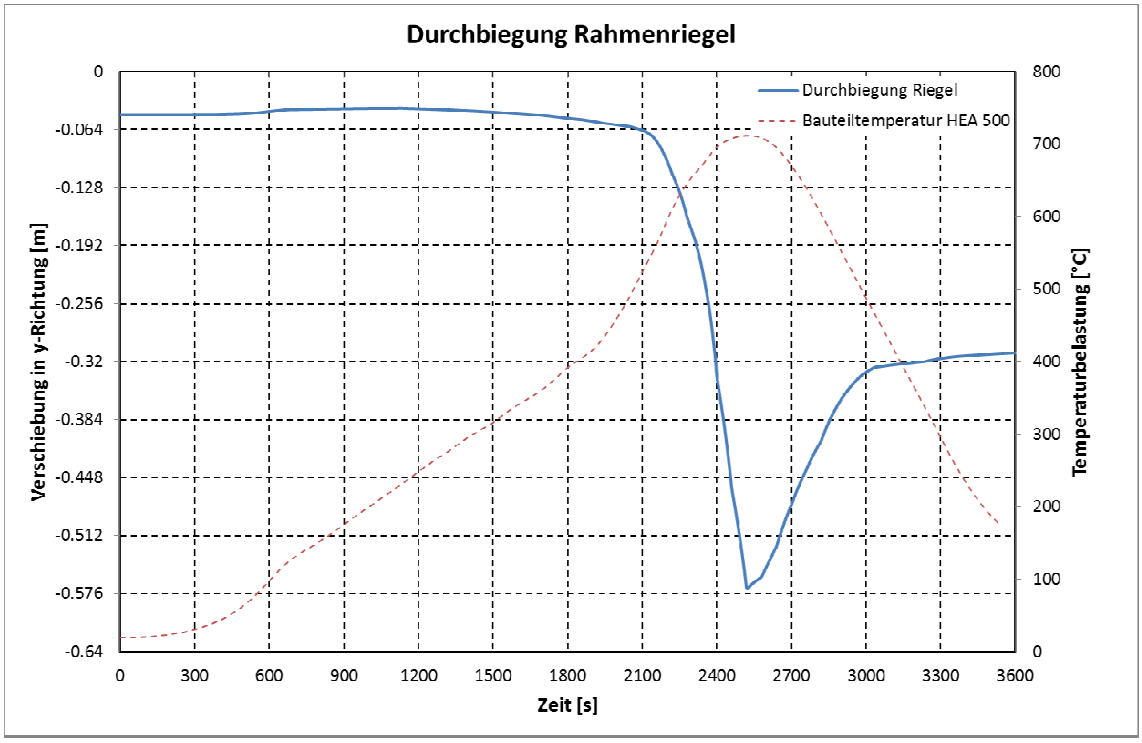


Bild 16 Tatsächliche Durchbiegung des Rahmenriegels in Feldmitte

Für die Tragfähigkeit gilt:

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi} \quad (20)$$

Bei der Festlegung der maximal zulässigen Verformung muss die raumabschließende Funktion der Bauteile berücksichtigt werden.

Als Versagenskriterium kann das Abreißen der Befestigungsmittel vom Rahmenriegel aufgrund zu starker Längung der Elemente in Frage kommen. Weiterhin kann es zum seitlichen Öffnen von Fugen zwischen den Sandwichelemente aufgrund der Längung des Rahmenriegels kommen. Dies würde jedoch nicht zu einem Herunterfallen der Elemente führen, so dass hier für diesen Schadensfall auch keine Verformungsgrenze eingehalten werden muss. Gleichwohl muss die Integration des Tragwerks sichergestellt sein, so dass die Verformungen begrenzt werden müssen, um z. B. ein Abfallen der Sandwichprofile zu verhindern.

Als Versagenskriterium für die Verformung wird daher das Kriterium gewählt, das in der DIN 4102-Teil 2 bzw. DIN EN 13501-2 für statisch bestimmt gelagerte, ganz oder vorwiegend durch Biegung beanspruchte Bauteile in den Bauteilprüfungen vorgesehen ist. Es legt eine kritische Durchbiegung sowie kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit nach Gleichung (21 und 22) fest

a) Durchbiegung: $D = L^2/(400\ d)$ [mm] und (21)

b) Durchbiegungsrate: $dD/dt = L^2/(9.000\ d)$ [mm/min]. (22)

Dabei ist

- L die lichte Spannweite, in mm;
- D der Abstand, in mm, des äußersten Randes der Druckzone bis zum äußersten Rand der Zugzone des tragenden Querschnitts jeweils bei Kaltbemessung.

Das Kriterium der Durchbiegungsgeschwindigkeit gilt erst, nachdem eine Durchbiegung von L/30 überschritten wird.

Die maximale Durchbiegung des Rahmenriegels beträgt 570 mm.

Die kritische Durchbiegung beträgt

$L^2 / (400\ d) = 28.300^2 / (400 \cdot 690) = 2900$ mm > 570 mm

Die maximale Durchbiegungsgeschwindigkeit tritt kurz vor Erreichen der maximalen Temperatur auf. In Feldmitte beträgt die größte Differenz der Verschiebungen in y-Richtung zwischen zwei Zeitschritten von 60 s, wie in Bild 26 zu sehen $\Delta s = 126$ mm. Dies muss erst ab einer Durchbiegung von L/30 betrachtet werden:

$L / 30 = 28.300 / 30 = 943 \text{ mm} > 570 \text{ mm}$

Zur Vollständigkeit wird hier trotzdem der Nachweis der kritischen Durchbiegungsgeschwindigkeit gezeigt. Die kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit beträgt

$L^2 / (9.000\ d) = 28.300^2 / (9000 \cdot 690) = 129 \text{ mm/min} > 126 \text{ mm/min}$

Die kritische Durchbiegungsgeschwindigkeit wird im Laufe der Berechnung nicht erreicht. Der Nachweis über die Tragfähigkeit im Brandfall konnte daher mit Hilfe der allgemeinen Rechenverfahren erbracht werden.

Anschlüsse

Die Tragfähigkeit der Anschlüsse von Riegel und Stiel sind nach Anhang D in [5] nachzuweisen, in dem die temperaturabhängigen Abminderungsfaktoren der Tragfähigkeit von Schrauben und Schweißnähten angegeben sind.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag werden zunächst kurz die Neuerungen im Kapitel 6 des vfdb-Leitfadens hinsichtlich der brandschutztechnischen Nachweise von Bauteilen und Tragwerken vorgestellt. Ausführlicher wird dann am Beispiel des Hörsaalgebäudes aus Anhang 2 des Leitfadens die Anwendung des vereinfachten sowie des allgemeinen Rechenverfahrens für die Naturbrandbemessung des Tragwerks erläutert. Während das vereinfachte Rechenverfahren mit Hilfe von Gleichungen streng entsprechend den Eurocodes durchgeführt wird, müssen beim allgemeinen Rechenverfahren ergänzend zu den Vorgaben in den Eurocodes ingenieurmäßige Annahmen getroffen werden. Festgelegte Kriterien, z. B. hinsichtlich des Versagens durch übergroße Verformungen, fehlen hier zum Teil und müssen vom Anwender dem Projekt entsprechend festgelegt werden. In der 3. Auflage des vfdb-Leitfadens werden hierzu Hilfestellungen gegeben, die dem Anwender das Arbeiten mit dem allgemeinen Rechenverfahren nach den Eurocode-Brandschutzteilen erleichtern sollen.

Zum Schluss geht der Dank an unsere Kollegin Jana Köllner für die großartige Unterstützung bei den FE-Berechnungen.

LITERATUR

[1] Wiese, J.; Riese, O.: Aktualisierungen bei Brandszenarien, Bemessungsbränden und Simulationsmodellen. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 220, 2013, ISBN 978-3-89288-205-3.

[2] DIN EN 1991-1-1:2010-12, Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Grundlagen der Tragwerksplanung.

[3] DIN EN 1990:2010-12, Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung.

[4] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.

[5] DIN EN 1993-1-2:2010-12, Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.

[6] Prüfbericht Nr.: F.3-012/88 des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München.

[7] DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.

[8] Schneider Bautabellen für Ingenieure, 20. Auflage, Werner Verlag, 2012.

AKTUALISIERUNGEN BEI DEN NACHWEISEN ZUR PERSONENSICHERHEIT UND ENTFLUCHTUNG

Volker Schneider
IST GmbH, Frankfurt
Burkhard Forell
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Köln

EINLEITUNG

Der vfdb-Leitfaden "Ingenieurmethoden des Brandschutzes" gibt in seiner 3. Auflage im Kapitel 8 Hinweise zur Beurteilung und Bewertung der Personensicherheit in Rettungswegen. Eng damit verknüpft ist Kapitel 9, in welchem verschiedene Methoden und Modellierungskonzepte für die Entfluchtungsanalyse vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen beleuchtet werden. Die Möglichkeiten der praktischen Umsetzung dieser unterschiedlichen Verfahren werden im Anhang des vfdb-Leitfadens anhand eines Hörsaal-Szenariums demonstriert.

Die im vfdb-Leitfaden vorgestellten Ingenieurmethoden basieren auf einer schutzzielorientierten Herangehensweise für den Nachweis der Personensicherheit. Entsprechend werden in Kapitel 8 Ansätze zur Bestimmung der verfügbaren Räumungszeit vorgestellt, basierend auf der Berechnung bemessungsrelevanter Brandszenarien. Die erforderliche Räumungszeit ergibt sich aus der zugehörigen Entfluchtungsanalyse, wobei neben der notwendigen zeitbasierten Bewertung auch die Frage der Qualität der Entfluchtung nicht außer Acht gelassen werden darf. Beide Aspekte werden anhand des Hörsaal-Szenariums in diesem Beitrag demonstriert.

Nach einer kurzen Zusammenfassung der Inhalte von Kapitel 8 und 9 werden die gegenüber den bisherigen Auflagen neu hinzugekommen bzw. vertieften Themenbereiche mit Blick auf die Anwendungspraxis ausführlicher vorgestellt. Dazu gehören insbesondere folgende Punkte:

- Beurteilungswerte und Anhaltswerte für quantitative Schutzziele,
- Bestimmung von Erkennungsweiten,
- Ausbeuten von Verbrennungsprodukten und Rauchpotentiale,
- Auswahl geeigneter Entfluchtungsmodelle und Anwendungsgrundsätze,
- Wahl des Fluchtwegs.

PERSONENSICHERHEIT

Als Nachweiskriterien für die Personensicherheit stehen neben der Höhe der raucharmen Schicht auch die Qualität dieser raucharmen Schicht sowie die

thermischen Einwirkungen zur Verfügung. Da selbst in Situationen, in denen sich eine deutlich abgegrenzte Rauchschicht ausbildet, der Bereich unterhalb dieser Schicht nicht völlig rauchfrei sein kann, ist die Frage nach der Qualität der raucharmen Schicht von wesentlicher Bedeutung. Liegt keine klare Schichtbildung vor oder basiert das Entrauchungskonzept auf Rauchverdünnung (z. B. in Garagen oder Tunneln), ist eine Qualitätsbewertung sogar unbedingt erforderlich. Dies kann mit Ingenieurmethoden geschehen, die auf der Basis von Bemessungsbrandszenarien Aussagen zum zeitlichen Verlauf der optischen Dichte pro Weglänge und der Konzentration von Verbrennungsprodukten im Bereich der Flucht- und Rettungswege machen können. Die thermische Belastung berücksichtigt vor allem die Wärmestrahlung aus Heißgasschicht und Flammenzone sowie den konvektiven Wärmeübertrag bei direktem Kontakt mit Rauchgasen.

Die toxische Wirkung von Brandgasen

Eine unmittelbare Beeinträchtigung der individuellen Handlungsfähigkeit ist häufig auf die narkotisierende bzw. erstickende Wirkung der bei einem Brand entstehenden Gase oder auf akuten Sauerstoffmangel zurückzuführen. Die häufigsten, bei Brandopfern festgestellten erstickend wirkenden Gase sind Kohlenmonoxid (CO) und Cyanwasserstoff (HCN), gegebenenfalls in ihrer Wirkung verstärkt durch Kohlendioxid (CO_2) [1].

Im Leitfaden wird ein international anerkanntes quantitatives Verfahren zur Bewertung der individuellen Schadenswirkung vorgestellt, die sogenannte „Fractional Effective Dose" (FED) - Methode [1], [2]. Diese erlaubt es, aus der während der Expositionsdauer aufgenommenen Dosis der oben genannten Schadstoffe mit Hilfe von empirisch abgeleiteten Dosis-Wirkungs-Relationen die Zeit bis zum Eintreten der Handlungsunfähigkeit zu bestimmen. Dabei können diese Relationen (z. B. über die Vorgabe der Atemrate) an besonders sensible Personengruppen angepasst werden. In der 3. Auflage des Leitfadens wird ergänzend ein analoges Konzept für Reizstoffe im Brandrauch explizit vorgestellt, die Methode der Fractional Irritant Concentration FIC [1] (bzw. Fractional Effective Concentration FEC in der Bezeichnung von ISO/DTS 13571 [2]). Während bei Kohlenmonoxid und Cyanwasserstoff die aufgenommene Dosis ausschlaggebend ist, reagieren im Falle der Reizgase die betroffenen Personen eher auf momentane Konzentrationswerte. Tabelle 1 zeigt Referenzwerte zur Bewertung der Konzentration von häufig in Brandgasen auftretenden Reizstoffen.

Da zum einen die FED- und FIC-Relationen statistische Mittelwerte liefern und zum andern ein für die Bewertung der Personensicherheit in Flucht- und Rettungswegen geeignetes Bewertungskriterium deutlich unter dem Limit der Handlungsunfähigkeit angesiedelt sein muss, sind bei der Anwendung der FED- bzw. FIC-Methode geeignet hohe Sicherheitsfaktoren zu benutzen. Dies wird im vfdb-Leitfaden ausführlicher diskutiert. In Tabelle 1 ist bereits ein solcher Sicherheitsfaktor bei der Ableitung des Kriteriums "Behinderung der Flucht" berücksichtigt.

Weiterhin gibt es alternative Möglichkeiten zur Festlegung von Beurteilungswerten für die Personensicherheit in Gefahrensituation, wie z. B. die Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) der American Industrial Hygiene Association (dabei insbesondere die Kategorie ERPG-2, die Grenzwerte beschreibt, unterhalb deren bei einer bis zu einstündigen Expositionsdauer keine ernsten oder irreversiblen Gesundheitsstörungen zu erwarten sind und die Fähigkeit zur erfolgreichen Selbstrettung nicht beeinträchtigt wird) oder die international unter Führung der USA (in Deutschland bearbeitet durch die Kommission für Anlagensicherheit) erarbeiteten AEGL-Werte (Acute Exposure Guideline Levels). Auf die AEGL-Werte bezieht sich auch die vfdb-Richtlinie 10/01 zur Bewertung von Schadstoffkonzentrationen im Feuerwehreinsatz, in welcher die für eine bis zu 4-stündige Expositionsdauer konzipierten Einsatztoleranzwerte ETW festgelegt sind. Das zugehörige Grundlagenpapier [3] bietet einen umfassenden Überblick über Methoden zur Abschätzung gesundheitlicher Folgen von Großbränden. Ausbeuten der wichtigsten akut toxischen Brandgase in Abhängigkeit der Brandlasten und Ventilationsbedingungen sind in [4] zusammengestellt.

Tabelle 1 Referenzwerte zur Bestimmung von FIC-Werten

Reizgas	Handlungs-unfähigkeit [2]	Handlungs-unfähigkeit [1]	Behinderung der Flucht [1]
HCl	1000 ppm	900 ppm	200 ppm
HBr	1000 ppm	900 ppm	200 ppm
HF	500 ppm	900 ppm	200 ppm
SO_2	150 ppm	120 ppm	24 ppm
NO_2	250 ppm	350 ppm	70 ppm
Akrolein	30 ppm	20 ppm	4 ppm
Formaldehyd	250 ppm	30 ppm	6 ppm

Die thermische Wirkung von Brandgasen

Auch eine Wärmeeinwirkung erhöht die individuelle Belastung und kann damit die für die Selbstrettung verfügbare Zeitspanne verkürzen. Es gibt vor allem drei grundlegende Mechanismen der thermischen Einwirkung, die zur Handlungsunfähigkeit und – in letzter Konsequenz – zu schweren körperlichen Schäden bis hin zum Tode führen können: thermischer Schock, Hautverbrennungen und Verbrennungen des Atmungsapparats [1], [2], [5]. Auch hier lassen sich, in Analogie zur FED-Methode, Dosis-Wirkungs-Relationen für die Konvektions-

und Strahlungswirkung aufstellen, die es erlauben, den Zeitpunkt der Handlungsunfähigkeit zu bestimmen.

Tabelle 2 zeigt für das Kriterium der Erträglichkeitsgrenze eine Übersicht von Einwirkungsstärken und zugehöriger Einwirkungsdauer. So ist z.B. eine Wärmestrahlung über 2,5 kW/m^2 nur für wenige Sekunden erträglich.

Tabelle 2 Grenzen der Erträglichkeit von Wärmestrahlung und Konvektion [6]

Einwirkung	Intensität bzw. Temperatur	erträgliche Einwirkzeit
Wärmestrahlung	10 kW/m^2	Schmerz nach 4 s
(Einwirkung auf Haut)	4 kW/m^2	Schmerz nach 10 - 20 s
	2,5 kW/m^2	Schmerz nach 30 s
Konvektion	< 40 ℃ (bei H2O-Sättigung)	> 30 min
(Atemwege, Haut)	160 ℃ (< 10 % H2O)	2 min
	120 ℃ (< 10 % H2O)	7 min
	100 ℃ (< 10 % H2O)	12 min

Die lichttrübende Wirkung des Rauches

Bei der Bewertung der von einem Brand ausgehenden Gefahren spielen das Ausmaß der Verrauchung und die damit einhergehende Reduktion der Erkennungsweite eine wesentliche Rolle. Die lichttrübende Wirkung des Rauches wird durch die optische Dichte pro Weglänge D_L (im Weiteren dem Sprachgebrauch entsprechend - wenn auch physikalisch nicht ganz korrekt - als Rauchdichte bezeichnet) oder äquivalent durch den Extinktionskoeffizienten K quantifiziert. Beide Größen beschreiben den gleichen physikalischen Sachverhalt, unterscheiden sich jedoch in ihrer mathematischen Formulierung, wodurch sich ein Umrechnungsfaktor $D_L = K / \ln(10) \approx 0{,}43\ K$ ergibt.

D_L ist direkt proportional zum Rauchpotential D_m, auch massenbezogene optische Dichte (mass optical density MOD) genannt. Entsprechend ist D_m neben der Abbrandrate, welche die freigesetzte Masse an Verbrennungsprodukten bestimmt, die für die lichttrübende Wirkung entscheidende Kenngröße. Bei der z. B. durch einen Bemessungsbrand vorgegebenen zeitlichen Entwicklung der Wärmefreisetzungsrate ist die Abbrandsrate umgekehrt proportional zum effektiven Heizwert der Brandlast. D. h. man erhält hinsichtlich der Rauchproduktion konservative Resultate für einen effektiven Heizwert am unteren Rand der möglichen Spannweite.

Die Rauchdichte ist eine lokale Größe, die analog zu Temperatur oder Schadstoffkonzentration z. B. mit Hilfe eines CFD-Modells berechnet und für die Bewertung der Qualität der raucharmen Schicht herangezogen werden kann. Mit Hilfe von D_L lässt sich die Erkennungsweite bestimmen, worauf nachfolgend noch detaillierter eingegangen wird.

Anhaltswerte zur Beurteilung der Personensicherheit

Die Anwendung der zuvor genannten Dosis-Wirkungs-Relationen für die toxische bzw. thermische Einwirkung sowie der FIC-Methode für Reizgase ist in der Praxis nur in Ausnahmefällen erforderlich. Ein solcher kann gegeben sein, wenn besonders sensible Personengruppen (z. B. in Krankenhäusern oder Pflegeeinrichtungen) betroffen sind oder falls CO, CO_2 oder HCN nicht die dominanten toxisch wirkenden Verbrennungsprodukte darstellen. Auch in Fällen, in denen eine ungewöhnliche lange Expositionsdauer größer als 30 Minuten zu betrachten ist (z. B. Fahrgäste in Schienenfahrzeugen oder Personen, die sich nicht selbstständig aus der Gefahrenzone entfernen können), ist eine solche Detailanalyse erforderlich. Üblicherweise kann der Nachweis einer raucharmen Schicht jedoch mit Hilfe der in Tabelle 3 zusammengestellten Beurteilungsgrößen und Anhaltswerte geführt werden. In diesen Anhaltswerten sind bereits konservative Sicherheitszuschläge enthalten, sodass diese Werte deutlich unterhalb der zuvor angesprochenen Grenzen der Handlungsfähigkeit bzw. Erträglichkeit liegen.

Tabelle 3 Beurteilungsgrößen und Anhaltswerte für quantitative Schutzziele

Beurteilungsgröße	längere Aufenthaltsdauer (< 30 min)	mittlere Aufenthaltsdauer (ca. 15 min)	kurze Aufenthaltsdauer (< 5 min)
CO-Konzentration	100 ppm	200 ppm	500 ppm
CO_2-Konzentration	1 Vol.-%	2 Vol.-%	3 Vol.-%
HCN-Konzentration	8 ppm	16 ppm	40 ppm
Wärmestrahlung	1,7 kW/m^2	2,0 kW/m^2	< 2,5 kW/m^2
Gastemperatur	45 °C	50 °C	50 °C
Rauchdichte D_L	0,1 m^{-1}	0,1 m^{-1} / 0,15 m^{-1}	0,1 m^{-1} / 0,2 m^{-1}
Erkennungsweite	10 m – 20 m	10 m – 20 m	10 m – 20 m

Die Unterteilung der Tabelle 3 in eine kurze (bis 5 Minuten), mittlere (5 bis 15 Minuten) und längere (15 - 30 Minuten) Aufenthaltsdauer in dem durch die Brandwirkung betroffenen Bereich beschreibt typische Kategorien von Räu-

mungszeiten. Das Schutzziel ist erfüllt, wenn keiner der aufgeführten Anhaltswerte während der zugehörigen Aufenthaltsdauer überschritten wird.

Die Zusammenstellung von Tabelle 3 basiert nicht nur auf der Auswertung der kombinierten Wirkung dieser Beurteilungsgrößen (z. B. gemäß FED-Modell) mit konservativen Sicherheitszuschlägen, sondern es wurden auch Konsistenzeffekte hinsichtlich einer möglichen Rauchzusammensetzung berücksichtigt. So wurde z. B. die Sauerstoffkonzentration hier nicht explizit aufgeführt, da diese mit den lokalen Schadstoffkonzentrationen in einem thermodynamischen Zusammenhang steht. Kritische Sauerstoffkonzentrationen unterhalb von 15 Vol.% werden erst bei sehr viel höheren Schadstoffkonzentrationen erreicht, als in Tabelle 3 dargestellt. Außerdem können die aufgeführten HCN- und CO-Konzentrationen gleichzeitig nur bei Bränden mit signifikantem Stickstoffanteil (> 2 % der Brennstoffmasse) erreicht werden.

Die Gastemperatur in Tabelle 3 bezieht sich auf Luft mit einem Gehalt an Wasserdampf von weniger als 10 Volumenprozent. Es ist zu beachten, dass eine den angegebenen Gastemperaturen entsprechende Temperaturerhöhung in der Regel mit deutlich höherer Rauchdichte und Schadstoffkonzentrationen einhergeht, als in Tabelle 3 als Anhaltswerte aufgeführt. Dies bedeutet praktisch, dass in der Regel – wie auch bei realen Schadfeuern zu beobachten – die Rauchdichte das empfindlichste Kriterium bei direktem Kontakt mit Brandrauch ist [7]. Bei einer optischen Dichte pro Weglänge $D_L \leq 0{,}1\ m^{-1}$ kann daher im Rahmen eines ingenieurgemäßen Nachweises in der Regel davon ausgegangen werden, dass gleichzeitig die Akzeptanzwerte für toxische Verbrennungsprodukte im Rauchgas nicht überschritten werden und auch andere Rauchgasbestandteile (insbesondere Reizgase, welche die Erkennungsweite beeinflussen) sowie die Rauchgastemperatur unbedenklich sind [1], [8], [9]. Dies kann somit als Kriterium für den Nachweis einer raucharmen Schicht in den Rettungswegen betrachtet werden. Das Kriterium der Wärmestrahlung ist situationsbedingt separat zu prüfen.

Für die Rauchdichte D_L kann der jeweils höhere Anhaltswert zur Beurteilung angesetzt werden, wenn der betreffende Bereich übersichtlich strukturiert ist oder die Personen mit den Räumlichkeiten vertraut sind. Unter Zugrundelegung eines massenspezifischen Extinktionskoeffizienten von $8{,}7\ m^2/g$ ergibt sich (gerundet) für $D_L = 0{,}1\ m^{-1}$ eine Rußkonzentration von $25\ mg/m^3$ bzw. für $D_L = 0{,}2\ m^{-1}$ von $50\ mg/m^3$.

Die Erkennungsweite ist mit der Rauchdichte D_L korreliert, dabei jedoch von vielen weiteren Einflussfaktoren abhängig und somit starken Streuungen unterworfen. Die angegebene Spannweite der Erkennungsweiten ist für typische Brände mit der zugehörigen Rauchdichte konsistent.

Erkennungsweite von Sicherheitszeichen

Die Erkennungsweite S – definiert als der Abstand zwischen Beobachter und einem Sehzeichen, bei dem dieses gerade noch erkannt werden kann – hängt

von einer ganzen Reihe unterschiedlicher Einflussfaktoren ab. Dazu gehören individuelle Faktoren (z. B. Sehschärfe, Alter, Müdigkeit, Adaptionszustand, Abstand und Beobachtungswinkel bezogen auf die Position des Zeichens), Eigenschaften des Zeichens (z. B. Leuchtdichte, Hintergrundleuchtdichte, Kontrastverhältnis, Größe, Farbe, Leuchtmittel, Position), Beleuchtungssituation (z. B. Beleuchtungsstärke, Umfeldleuchtdichte, Position der Leuchten, Reflexionseigenschaften der Wände) sowie die Eigenschaften des Brandrauchs (z. B. optische Rauchdichte, Rauchpartikelgröße, spektrale Eigenschaften des Brandrauchs, Anteil an Reizgasen). Die Berechnung von Erkennungsweiten (oft wird auch der etwas weniger präzise Begriff "Sichtweite" verwendet) basiert meist noch auf den klassischen, in den 1970er Jahren von Jin [9] entwickelten empirischen Relationen

$$S = \begin{cases} \dfrac{C}{K} & \text{für } K < 0{,}25\,\mathrm{m}^{-1} \\ \dfrac{C}{K}\left[0{,}133 - 1{,}47\log(K)\right] & \text{für } K \geq 0{,}25\,\mathrm{m}^{-1} \end{cases} \qquad (1)$$

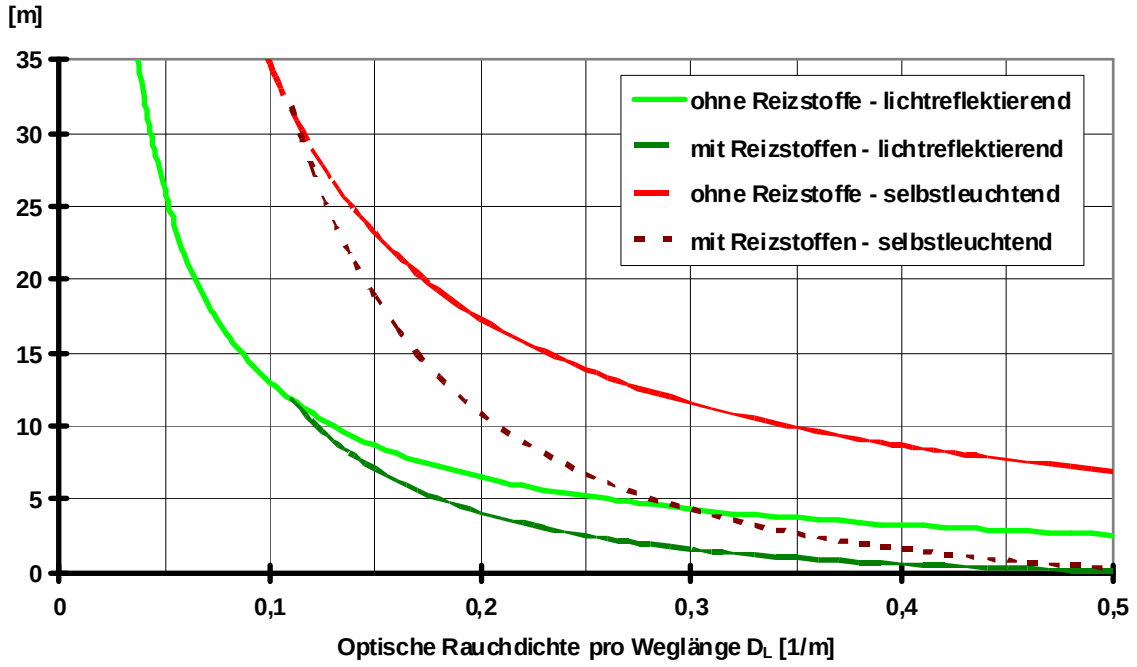


Bild 1 Erkennungsweite S nach Jin als Funktion von D_L

Die Messdaten in den Versuchen von Jin liegen in einem Abstand von Betrachter zu erkennendem Objekt zwischen 5 m und 15 m. Die zu beobachtenden Werte für die Konstante C hängen bei hinterleuchteten (von einer internen Lichtquelle beleuchteten) Zeichen neben der Rauchzusammensetzung stark von der Leuchtdichte ab, wobei Werte zwischen 5 und 10 beobachtet wurden. Bei (von einer externen Lichtquelle) beleuchteten Zeichen wurden, je nach Reflexionsgrad der Schilder, Werte zwischen 2 und 4 festgestellt. Es werden in der Praxis häufig die bereits von Jin angegebenen Mittelwerte für den Para-

meter C von 8 (hinterleuchtetes Hinweiszeichen) bzw. 3 (beleuchtetes Hinweiszeichen) benutzt [2]. Dies führt auf die in Bild 1 dargestellte Abhängigkeit der Erkennungsweite von der optischen Dichte pro Weglänge (Rauchdichte) D_L (D_L ≈ 0,43 K).

Bei der Anwendung ist zu beachten, dass im Bereich $D_L < 0{,}2\ m^{-1}$ die Erkennungsweite aufgrund der zugrunde liegenden Vereinfachungen und Näherungen systematisch überschätzt wird. Für den rauchfreien Fall $D_L = 0$ sind diese Beziehungen nicht anwendbar. Da jedoch für einen Nachweis der Personensicherheit in der Selbstrettungsphase gerade der Übergang von der rauchfreien zur raucharmen Situation wesentlich ist, sollte in diesen Fällen eine gegebenenfalls erforderliche Erkennungsweite mit einer Methode berechnet werden, die auch für den raucharmen Fall gültig ist - z.B. der Methode nach Kokoschka [10], [11]. Allgemein erhält man die Erkennungsweite S, indem man den Leuchtdichtekontrast c_v mit einem Schwellenkontrast $c_{Schwelle}$ gleichsetzt,

$$c_v = c_{v,0} \cdot F_{Streu} \cdot e^{-KS} = c_{Schwelle} \qquad (2)$$

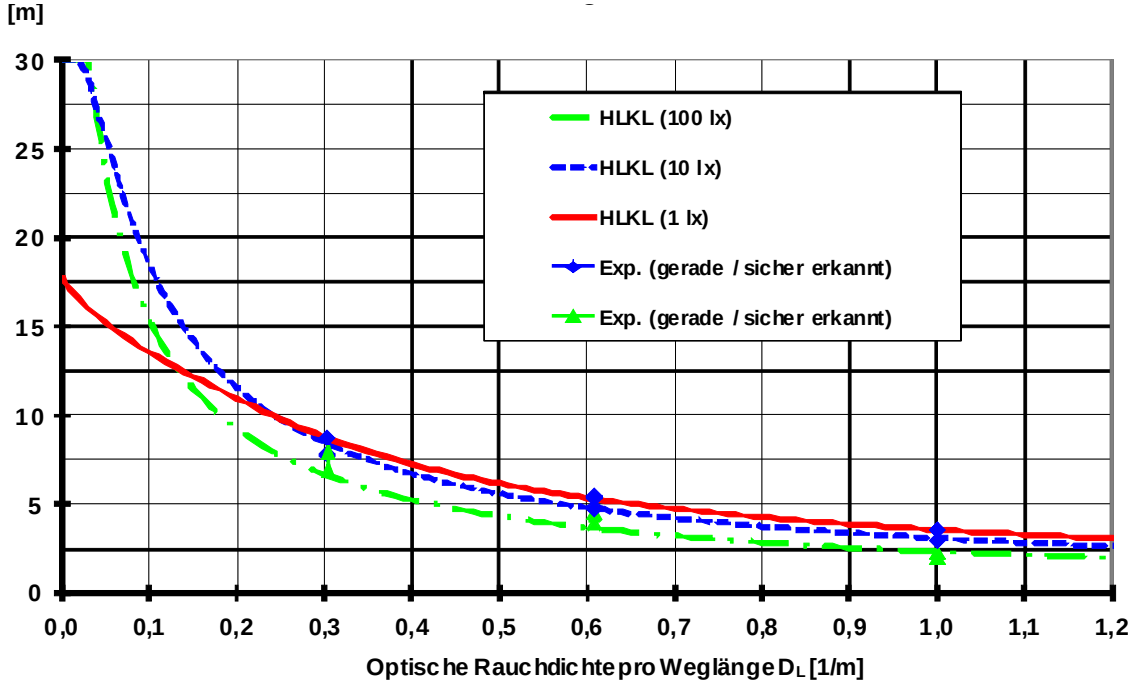


Bild 2 Erkennungsweite S eines hinterleuchteten Fluchtweg-Zeichens als Funktion von D_L für unterschiedliche Beleuchtungsstärken

c_v hängt vom Leuchtdichtekontrast (Verhältnis der Leuchtdichte des Textes oder Piktogramms zur Leuchtdichte des Zeichenhintergrunds) an der Zeichenoberfläche $c_{v,0}$, der Streuung an den Rauchpartikeln und der exponentiellen Abschwächung eines Lichtstrahls im Medium Rauch ab. Der Schwellenkontrast ist keine Konstante, sondern wird von einer ganzen Reihe von Faktoren beeinflusst. In den obigen allgemeinen Ansatz gehen somit neben der Rauchdichte auch Beleuchtungsstärke, Beschaffenheit (Größe, Leuchtdichtekontrast) des

Zeichens, Streueigenschaften des Rauches (heller oder dunkler Rauch) sowie Kriterien zur Definition der Erkennungsweite (Wahrnehmung oder sichere Identifikation) ein.

Bild 2 zeigt exemplarisch den Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die Erkennungsweitenberechnung nach Kokoschka [11] für ein hinterleuchtetes Zeichen der Größe 10 cm x 20 cm mit einer mittleren Leuchtdichte des Piktogramms (weißer Pfeil) von 450 cd/m^2 und des (grünen) Zeichenhintergrunds von 137 cd/m^2 für hellen Rauch mit einem Streuanteil von 80 %. Die in dem Bild zur Validierung des Modells dargestellten experimentellen Daten stammen aus der Studie [10]. Den vollständigen Satz der für eine Berechnung mit der Methode von Kokoschka notwendigen Bestimmungsgleichungen findet man in [12].

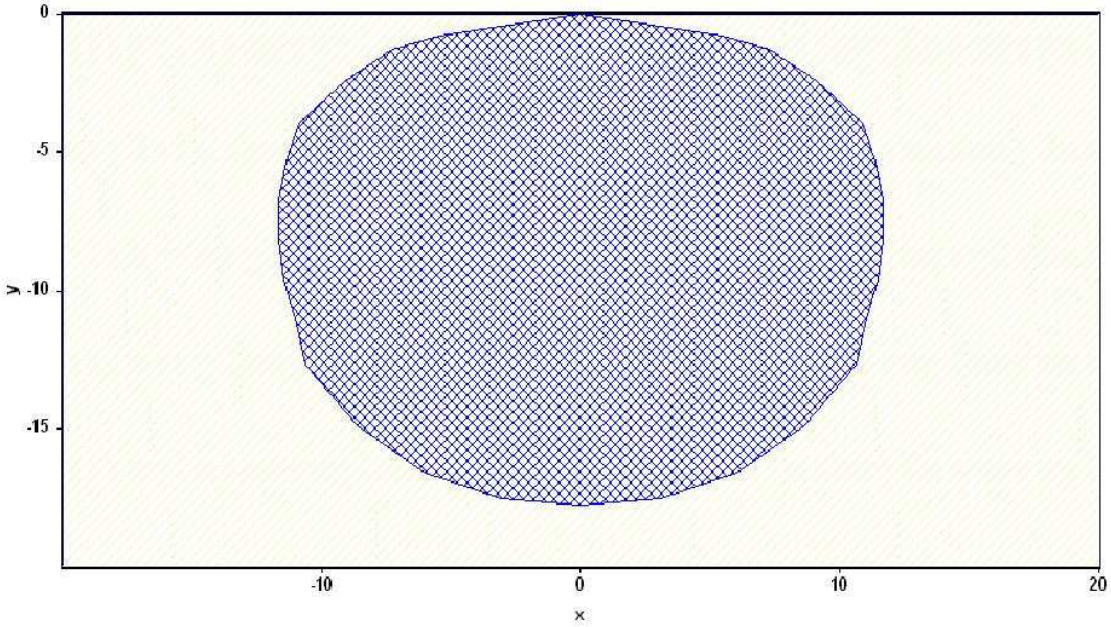


Bild 3 *Erkennungsfläche für ein an der horizontalen Position (0,0) befindliches Sicherheitszeichen*

Weiterhin ist grundsätzlich zu beachten, dass die Erkennungsweite keine lokale Größe wie z. B. die Rauchdichte oder die Temperatur ist. Sie hängt vielmehr von der relativen Position zwischen Beobachter und Sicherheitszeichen ab. D. h. für die Bestimmung der Erkennungsweite ist auch der Blickwinkel zwischen Beobachter und Zeichen von Bedeutung. Die oben vorgestellten Methoden zur Erkennungsweitenberechnung beziehen sich auf den Fall der direkten frontalen Blickrichtung. In der Realität wird man jedoch gerade in komplexen und großräumigen Anlagen sich einem Zeichen in sehr unterschiedlichen Winkeln annähern können. An Stelle der Erkennungsweite erhält man so eine Erkennungsfläche, wie in Bild 3 skizziert. Diese Fläche hat die Form eines das Zeichen berührenden, leicht deformierten Kreises, der im Bereich des Berührungspunktes abgeflacht ist. Nähert man sich dem Zeichen seitlich in einem Winkel von mehr als etwa 80°, kann es nicht mehr er kannt werden [11].

Die obigen Ansätze setzen über die Distanz des Lichtstrahls homogene Zustände voraus. Treten zwischen Beobachter und Zeichen relevante Unterschiede in der Rauchdichte auf, muss die Lichtabschwächung für jeweils kleine Wegstücke berechnet und aufsummiert werden (integrale Zerlegung).

Ausbeuten von Verbrennungsprodukten und Rauchpotentiale

Für einen Bemessungsbrand sind neben der Wärmefreisetzungsrate auch die Ausbeuten der wesentlichen Verbrennungsprodukte (Rauchausbeuten Y_i) sowie das Rauchpotential D_m vorzugeben. Die Rauchausbeuten geben das Verhältnis zwischen der Masse des freigesetzten Verbrennungsproduktes (gekennzeichnet durch den Index i) und der Masse des verbrannten Brandstoffes an. Für die Durchführung von Brandsimulationsrechnungen zur Bewertung der Personensicherheit sind vor allem die zu den in Tabelle 3 aufgeführten Beurteilungsgrößen gehörigen Ausbeuten Y_{CO}, Y_{HCN} und Y_{CO2} sowie das Rauchpotential D_m von Bedeutung. Alternativ zu D_m kann auch die Rußausbeute $Y_{Ruß}$ zusammen mit dem massenspezifischen Extinktionskoeffizienten K_m angegeben werden. Die Freisetzung von Cyanwasserstoff ist bei stickstoffhaltigen Brandlasten zu berücksichtigen.

Durch Multiplikation der Rauchausbeuten mit der vom effektiven Heizwert $h_{u,eff}$ der Brandlast abhängigen Abbrandrate $\dot{m}_{ab}$ lässt sich die Massenrate $\dot{m}_i$ des jeweiligen Verbrennungsproduktes berechnen,

$$\dot{m}_i = Y_i \cdot \dot{m}_{ab} = Y_i \cdot \frac{\dot{Q}}{h_{u,eff}} \tag{3}$$

Ausbeuten und Rauchpotentiale können für eine bekannte Zusammensetzung der Brandlast aus verfügbaren empirischen Daten bestimmt werden. Die in der Literatur enthaltenen Rauchausbeuten gelten dabei oft nur für den brandlastgesteuerten Fall. Bei unterventilierten Brandbedingungen kommt es zur vermehrten Bildung von Produkten der unvollständigen Verbrennung und somit zum Anstieg der Kohlenmonoxid- und Rußausbeute und zur Verringerung der Kohlendioxid-Ausbeute. Dementsprechend sind die Rauchausbeuten und gegebenenfalls auch das Rauchpotential für unterventilierte Brandbedingungen zu korrigieren.

Alternativ können für konservative Brandszenarien die Ausbeuten von Verbrennungsprodukten unter Berücksichtigung der Art des maßgeblichen Brandstoffes sowie der vorherrschenden Ventilationsbedingungen abgeschätzt werden. Die nachfolgend aufgeführten Rauchausbeuten stammen aus [13]. Hierbei wurden für die Stoffgruppen Zellulose, Kunststoffe A und B sowie halogenierte Kunststoffe folgende Stoffe verwendet:

Zellulose:	Holz bzw. Papier
Kunststoff A:	Polyethylen (PE)

Kunststoff B: Polystyrol (PS)

Halogenierte Kunststoffe: Polyvinylchlorid (PVC)

Für Mischbrandlasten können aus den oben aufgeführten Stoffgruppen anteilsgewichtete Mittelwerte gebildet werden. Tabelle 4 enthält die Ausbeuten von Kohlendioxid und Kohlenmonoxid, die Ausbeute der Rauchpartikel (Ruß) sowie den effektiven Heizwert für die oben aufgeführten Stoffgruppen. Dabei wird zwischen brandlast- und ventilationsgesteuerten Bedingungen unterschieden.

Tabelle 4 Ausbeuten und effektive Heizwerte für bemessungsrelevante Stoffgruppen

Ventilations-bedingungen	Brandstoff	$h_{u,eff}$ [kJ/g]	Y_{CO2} [g/g]	Y_{CO} [g/g]	$Y_{Ruß}$ [g/g]
brandlast-gesteuert	Zellulose	17,1	1,30	0,004	0,015
	Kunststoff A	43,6	2,76	0,024	0,060
	Kunststoff B	39,2	2,33	0,060	0,164
	halogenierte Kunststoffe	16,4	0,46	0,063	0,172
ventilations-gesteuert	Zellulose	17,1	0,91	0,145	0,028
	Kunststoff A	43,6	1,78	0,192	0,098
	Kunststoff B	39,2	1,50	0,137	0,330
	halogenierte Kunststoffe	16,4	0,32	0,500	0,237

Brennbare Flüssigkeiten lassen sich je nach Stoffklasse entweder den zellulosehaltigen Brandstoffen (z. B. Alkohole), der Stoffgruppe Kunststoffe A (z. B. Alkane) oder der Stoffgruppe Kunststoffe B (z. B. Aromaten) zuordnen. Ausbeuten für den Rauchbestandteil Cyanwasserstoff können bei Bedarf der Literatur (z. B. [3], [4]) entnommen oder anhand folgender Beziehung abgeschätzt werden:

Brandlasten mit < 2 % Stickstoffanteil: $Y_{HCN} / Y_{CO} = 1 / 52$

Brandlasten mit > 2 % Stickstoffanteil: $Y_{HCN} / Y_{CO} = 1 / 13$

Die Rußausbeuten aus Tabelle 4 führen für K_m = 8,7 m^2/g (Bezugswert für Mischbrandlasten) auf Rauchpotentiale D_m zwischen 0,06 m^2/g und 0,65 m^2/g (brandlastgesteuert) bzw. zwischen 0,11 m^2/g und 1,25 m^2/g (ventilationsgesteuert). Diese Werte sind konsistent mit empirischen Daten [14], im Falle von PVC sogar deutlich konservativ.

ENTFLUCHTUNG

Die Gewährleistung der Personensicherheit ist das zentrale Anliegen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes. Um die dafür notwendigen baulichen, technischen und organisatorischen Maßnahmen verlässlich gestalten zu können, sollten neben der Rauch- und Wärmeausbreitung auch die jeweilige Nutzungsart, Personenzahl sowie individuelle Personeneigenschaften und Verhaltensmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Berechnung von Räumungszeiten

Für jeden Bereich eines Gebäudes gilt der Grundsatz, dass die Räumungszeit $t_{Räumung}$ kleiner sein muss als die z. B. aus Brandsimulationen ermittelte verfügbare Räumungszeit $t_{verfügbar}$. Die Räumungszeit $t_{Räumung}$ ergibt sich aus der Summe der Zeitspanne $t_{Detektion}$ vom Beginn des Brandes bis zu seiner Detektion, der Zeitspanne t_{Alarm} von Detektion bis zum Auslösen des Alarms, einer Reaktionszeit $t_{Reaktion}$ vom Auslösen des Alarms bis zum Beginn der Fluchtbewegung und der Zeit t_{Flucht} vom Beginn der Fluchtbewegung bis zum Erreichen eines sicheren Bereiches. In der Reaktionszeit werden unterschiedliche Vorgänge und Verhaltensweisen zusammengefasst, insbesondere die für die Wahrnehmung und Interpretation des Alarms erforderliche Zeit sowie der Zeitaufwand für vorgelagerte Handlungen, die nicht der unmittelbaren Flucht dienen. Im vfdb-Leitfaden wird ein von Purser entwickeltes Schema [15] für die Bestimmung von Reaktionszeiten vorgeschlagen.

Entfluchtungsmodelle

Bei den rechnerischen Entfluchtungsmodellen lassen sich zwei Hauptgruppen unterscheiden: hydraulische Modelle (Strömungsmodelle inklusive Netzwerkmodelle) und Individualmodelle (mikroskopische Modelle).

Die hydraulischen Modelle lassen sich weiter unterteilen in vereinfachte Berechnungsansätze zur Kapazitätsanalyse („Handrechnungen”) sowie Verfahren, welche auch die Dynamik der Bewegung einer größeren Menschenmenge näherungsweise berücksichtigen (Bild 4). Diese Methoden beschränken sich auf die für die Bewegung eines kompakten Personenstroms bedeutsamen Elemente der Rettungswegführung. Die Berechnungsschritte sind damit in der Regel übersichtlich und leicht nachvollziehbar. Die zugehörigen Grundannahmen und Vereinfachungen sind von optimistischer Natur, die in der Praxis oft durch geeignete Sicherheitszuschläge kompensiert werden.

Um die Einschränkungen der hydraulischen Modelle zu reduzieren und den individuellen Einfluss auf die Effizienz der Entfluchtung stärker zu würdigen, wurden die sogenannten Individualmodelle (mikroskopische Evakuierungsmodelle) entwickelt, welche die Bewegung einzelner Personen in einer möglichst realitätsnahen Umgebung simulieren. Diese haben sich zwischenzeitlich trotz ihrer höheren Komplexität auch in der Anwendungspraxis bewährt. Hier unterscheidet man im Wesentlichen zwischen sogenannten "Kachelmodellen" mit

diskreter Raumauflösung und Modellen mit kontinuierlicher Raumauflösung, in denen prinzipiell jeder Punkt des Raumes zugänglich ist. Die Möglichkeiten und Grenzen dieser Modellierungsansätze werden anhand des Hörsaalbeispiels am Ende dieses Beitrags diskutiert.

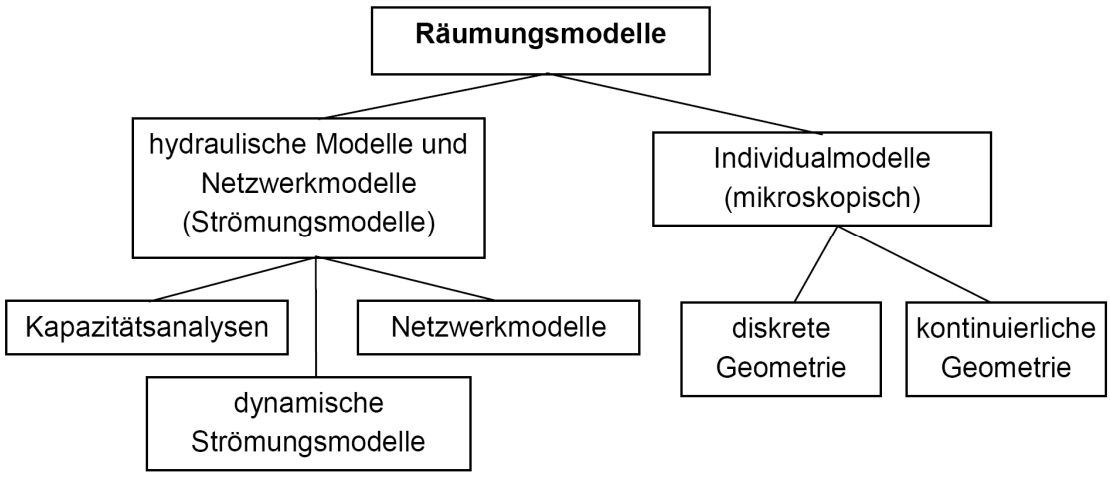


Bild 4 Kategorien der Entfluchtungsmodelle

Anwendungsgrundsätze

Ein für den Nachweis der Personensicherheit geeignetes Entfluchtungsmodell sollte die folgenden Eigenschaften aufweisen.

- Die Gebäudegeometrie sollte in allen für den Ablauf der Entfluchtung wichtigen Details berücksichtigt werden können (keine Beschränkung möglicher Fluchtwege).
- Die den Räumungsprozess unmittelbar beeinflussenden individuellen Eigenschaften, insbesondere die durch den persönlichen Raumbedarf und die unbehinderte Gehgeschwindigkeit geprägte Mobilität, sind zu berücksichtigen.
- Die Bestimmung des individuellen Fluchtweges muss die Analyse von Fluchtwegealternativen zulassen.
- Falls erforderlich, sollte die dynamische Ausbreitung von Rauch, toxischen Verbrennungsprodukten sowie die Hitzeeinwirkung bei der Berechnung von Räumungszeiten berücksichtigt werden können

Für eine Bemessung geeignete Räumungszeiten erhält man durch eine angemessen konservative Wahl des Szenariums (z. B. hinsichtlich der Personenzahl und der individuellen Mobilitätsparameter) und der spezifischen Berechnungsparameter sowie durch eine statistische Auswertung, welche gegebenenfalls auch ungünstigste Räumungsverläufe berücksichtigt. Hier zeigen sich die Vorteile der Individualmodelle. Diese können durch die Berücksichtigung inhomogener (also sich z. B. hinsichtlich der individuellen Mobilitätseigenschaften unterscheidenden) Personengruppen, individueller Wegpräferenzen und unter-

schiedlicher Anfangsverteilungen auch Aussagen zur Schwankungsbreite der Räumungszeiten machen. Basieren die Berechnungen dagegen nur auf Mittelwerten oder gar (systematisch) optimistischen Randbedingungen, sind ausreichende Sicherheitszuschläge anzusetzen.

Neben der erforderlichen Räumungszeit ist unbedingt auch die Qualität des Räumungsablaufs in die Bewertung einzubeziehen. Dazu müssen insbesondere die Entwicklung der lokalen Personendichte auf den Rettungswegen und mögliche Stausituationen analysiert werden. Staubildungen lassen sich manchmal nicht grundsätzlich vermeiden. Abhängig von der Personendichte, den Randbedingungen und dem Reaktionsverhalten können sie sich zeitweise in der Anfangsphase der Entleerung ausbilden (z. B. Entleerungsvorgang auf einer Tribüne oder in einem Kino). Der zulässige Zeitraum einer solchen Stausituation sollte nur wenige Minuten betragen, da auch die psychischen Auswirkungen einer längeren Wartezeit zu bedenken sind. Innerhalb der weiteren Rettungswege sollten Staubildungen vermieden werden. Nicht akzeptabel sind Staubildungen in unübersichtlichen Bereichen, da hier für die im Stau befindlichen Personen ein deutlich erhöhtes Maß der Gefährdung durch nachrückende Flüchtende besteht (Staudruck). Kriterien zum Nachweis eines „sicheren Fluchtverlaufs“ werden in [16] diskutiert. Zur Bewertung zulässiger Personendichten lässt sich das in [17] beschriebene "Vier Stufen Modell" des Staus heranziehen. Personendichten von 3 - 5 Personen/m^2 entsprechen der dritten Stufe. Es ist mit einem zeitweisen lokalen Stillstand im Personenstrom zu rechnen. Die Beurteilung der Kritikalität hängt situationsbedingt von Einflussfaktoren wie der generellen Akzeptanz hoher Personendichten (z. B. bei öffentlichen Großveranstaltungen oder bestimmten Sportveranstaltungen), der Dauer, der zugänglichen Information und der Verfügbarkeit von Ausweichmöglichkeiten ab. Auf jeden Fall ist hier immer die Gefahr gegeben, dass es zur vierten und damit kritischen Stufe mit Personendichten > 5 Personen/m^2 kommt. In diesem Dichtebereich können Personen nicht mehr ausweichen und durch nachströmende Personen auftretende Druckwellen sind nicht zu kompensieren. In diesem Fall besteht eine große und unmittelbare Gefahr für die betroffenen Personen.

Wahl des Fluchtweges

Die Berechnung von Räumungszeiten erfordert immer Angaben zur Aufteilung der Personen auf die verfügbaren Fluchtwege. Bei makroskopischen Methoden genügt es, die Anzahl der Personen festzulegen, die ein Wegelement oder einen Ausgang passieren. Bei den mikroskopischen Verfahren wird der individuelle Weg bestimmt, entweder durch explizite Vorgaben oder implizit durch Bewegungs- bzw. Verhaltensregeln. Auf diese Weise können Individualmodelle Verhaltensaspekte (z. B. unterschiedliche Wegpräferenzen) explizit bei der Fluchtwegewahl berücksichtigen.

Eine optimale (im Sinne einer minimalen Gesamtfluchtzeit) Auslastung stellt einen in der Praxis meist nur näherungsweise erreichbaren Idealzustand dar. Es gilt zu berücksichtigen, welche Informationen für eine Wegentscheidung zur Verfügung stehen und wie diese auf Grund individueller Umstände (Vertrautheit

mit dem Gebäude, Erfahrung mit ähnlichen Situationen, soziale Einflussfaktoren etc.) verarbeitet werden können. Zur Kenntnis des Weges gehören neben der allgemeinen Ortskenntnis auch das Vorhandensein und die Qualität der Fluchtwegkennzeichnung und gegebenenfalls auch ein Informationssystems sowie – in der Praxis von besonderer Bedeutung – das Einwirken von Personal oder von Einsatzkräften. Außerdem muss situationsbedingt unterschieden werden, ob die Flüchtenden sich einer unklaren Gefahrenlage gegenübergestellt sehen oder ob sie vor einer konkreten unmittelbaren Gefahr fliehen. In ersterem Fall wird eher die Länge des gesamten Fluchtweges bis zum Verlassen des Gebäudes den Ausschlag geben (global kürzester Weg), im zweiten Fall die Länge des Wegs bis zum nächsten verfügbaren Ausgang aus dem gefährdeten Raum oder Bereich (lokal kürzester Weg). Weitere Einflussfaktoren sind u. a. die Beschaffenheit der Notausgänge (Türen offen oder geschlossen, direkter Ausgang ins Freie) sowie das Verhalten der anderen Personen im Umfeld.

Ein zusätzlicher, gerade für Gebäude mit großer Personenzahl bzw. hoher Personendichte wesentlicher Aspekt der Fluchtwegewahl ist das individuelle Verhalten bei Staubildungen. Dies führt auf die Frage, unter welchen Bedingungen eventuell verfügbare alternative Fluchtwege zur Vermeidung eines Staus oder zur Reduzierung der Wartezeit in einem Stau akzeptiert werden. Da es zurzeit noch zu wenig empirisches Datenmaterial gibt, um solche Attraktivitätskriterien umfassend zu quantifizieren, ist es in der Regel erforderlich, mehrere plausible Alternativen vergleichend zu untersuchen (Sensitivitätsanalyse).

Bild 5 illustriert die Bewegungsabläufe und Auslastung verfügbarer Ausgänge eines hypothetischen Versammlungsraums für unterschiedliche Wegpräferenzen [18]: global kürzester Fluchtweg zu einem der beiden Zielbereiche Haupt- bzw. Nebenausgang, lokal kürzester Fluchtweg aus dem Versammlungsraum hinaus, eine gleichmäßige Ausgangsauslastung proportional zur effektiven Breite der Ausgänge sowie eine Ausgangswahl, welche eine individuelle Umorientierung bei Stausituationen erlaubt (Option "dynamische Ausgangswahl" des Individualmodells ASERI). Die kürzesten Räumungszeiten, sowohl global als auch lokal, liefert die gleichmäßige Ausgangsauslastung. Dies wäre auch eine typische Randbedingung für eine makroskopische Berechnung.

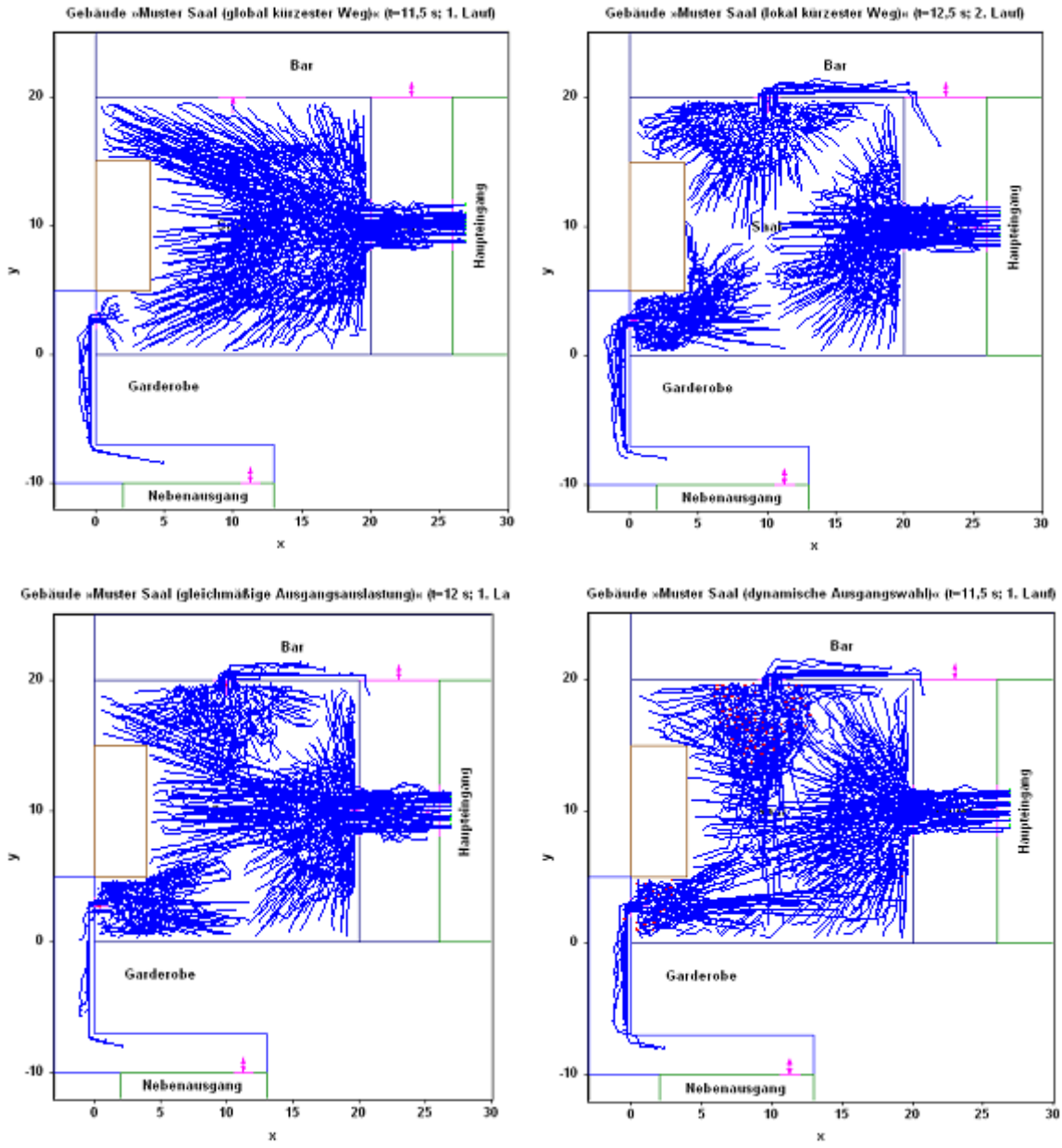


Bild 5 *Wahl des Fluchtwegs: global kürzester Weg (oben links), lokal kürzester Weg (oben rechts), gleichmäßige Ausgangsauslastung (unten links) sowie dynamische Ausgangswahl (unten rechts)*

ANWENDUNGSBEISPIEL – RÄUMUNG EINES HÖRSAALS

Im Anhang 2 des Leitfadens findet man die Beschreibung eines Hörsaalgebäudes, auf welches verschiedene, im Leitfaden behandelte Fragestellungen und Behandlungsmethoden, darunter auch solche die Räumung des Hörsaals betreffend, angewandt werden. Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Grenzen unterschiedlicher Entfluchtungsmodelle am Beispiel der Räumung dieses Hörsaals vorgestellt [16].

Gebäudebeschreibung und Räumungsszenarien

Ein Hörsaalgebäude mit den Abmessungen 34 m x 29 m x 12 m (L x B x H) ist mit 20 Sitzreihen zu je 32 Plätzen ausgestattet. Bei Sonderveranstaltungen können sich zu den 640 Sitzplätzen zusätzliche Personen auf den Stufengängen bzw. vor den Sitzreihen aufhalten, sodass sich bis zu 1000 Personen im Hörsaal befinden. Die leicht ansteigenden Sitzreihen werden durch zwei Seitenstufengänge und zwei Mittelstufengänge erschlossen. Hinter den Sitzreihen befindet sich eine Wandscheibe mit vier Durchgängen, durch die man von den Stufengängen über eine Vorfläche zu den beiden nebeneinander liegenden Hauptzugangstüren des Hörsaals gelangt. Die Türen führen auf die erste Ebene eines angeschlossenen Foyergebäudes. Dort führt eine Treppe hinunter ins Erdgeschoss und von dort ins Freie (Bild 6). Der zweite Rettungsweg ist durch zwei vorne angeordnete Ausgangstüren links und rechts des Podiums gegeben (Bild 7).

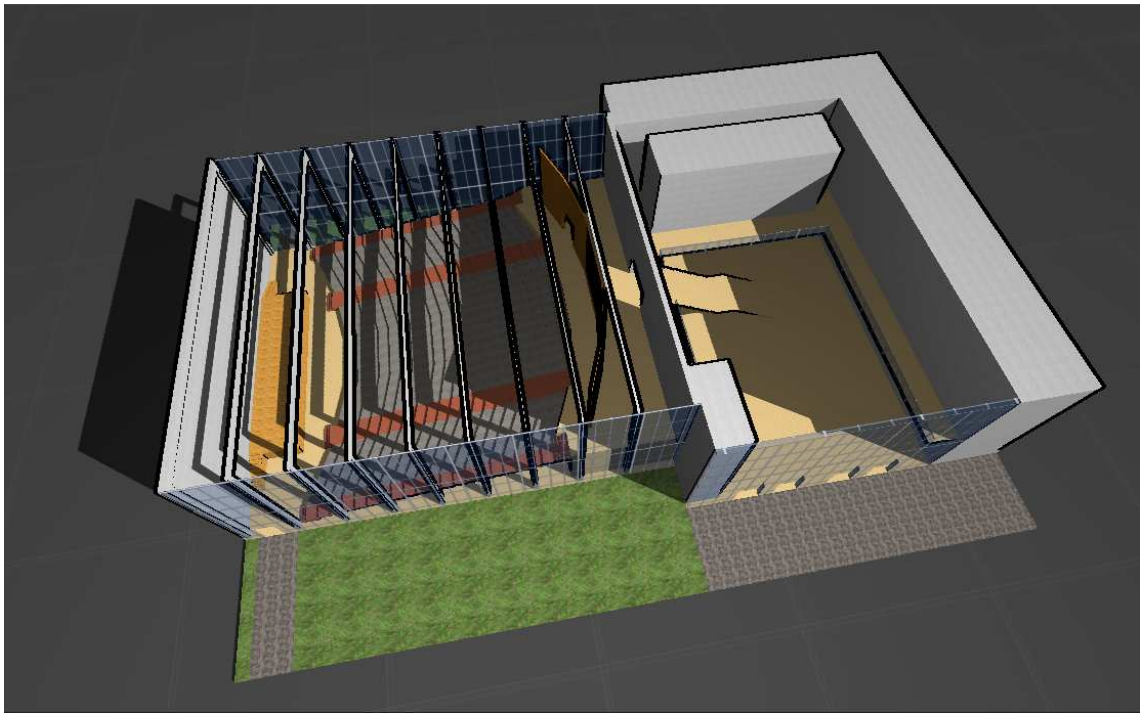


Bild 6 Blicke auf den Hörsaal und das Foyer

Die Rettungswege aus dem Hörsaal sind gemäß MVStättV [19] ausgelegt: Die Besucherzahl von knapp 1000 Personen erfordert nach § 7(4) MVStättV eine Fluchtwegbreite von zehn Modulen zu je 0,60 m, entsprechend eine freie Gesamtbreite von 6,00 m. Diese Anforderungen werden durch die zwei Hauptzugänge und die Notausgänge von jeweils 2 m Breite abgedeckt (12 Module, 8 m Gesamtbreite). Die Öffnungen in der Wandscheibe sowie die vier Stufengänge decken die Rettungswegbreite ebenfalls ab. Die maximale Länge der Rettungswege bis zum Erreichen eines sicheren Bereichs (das Foyer bzw. das Freie) wird ebenfalls eingehalten.

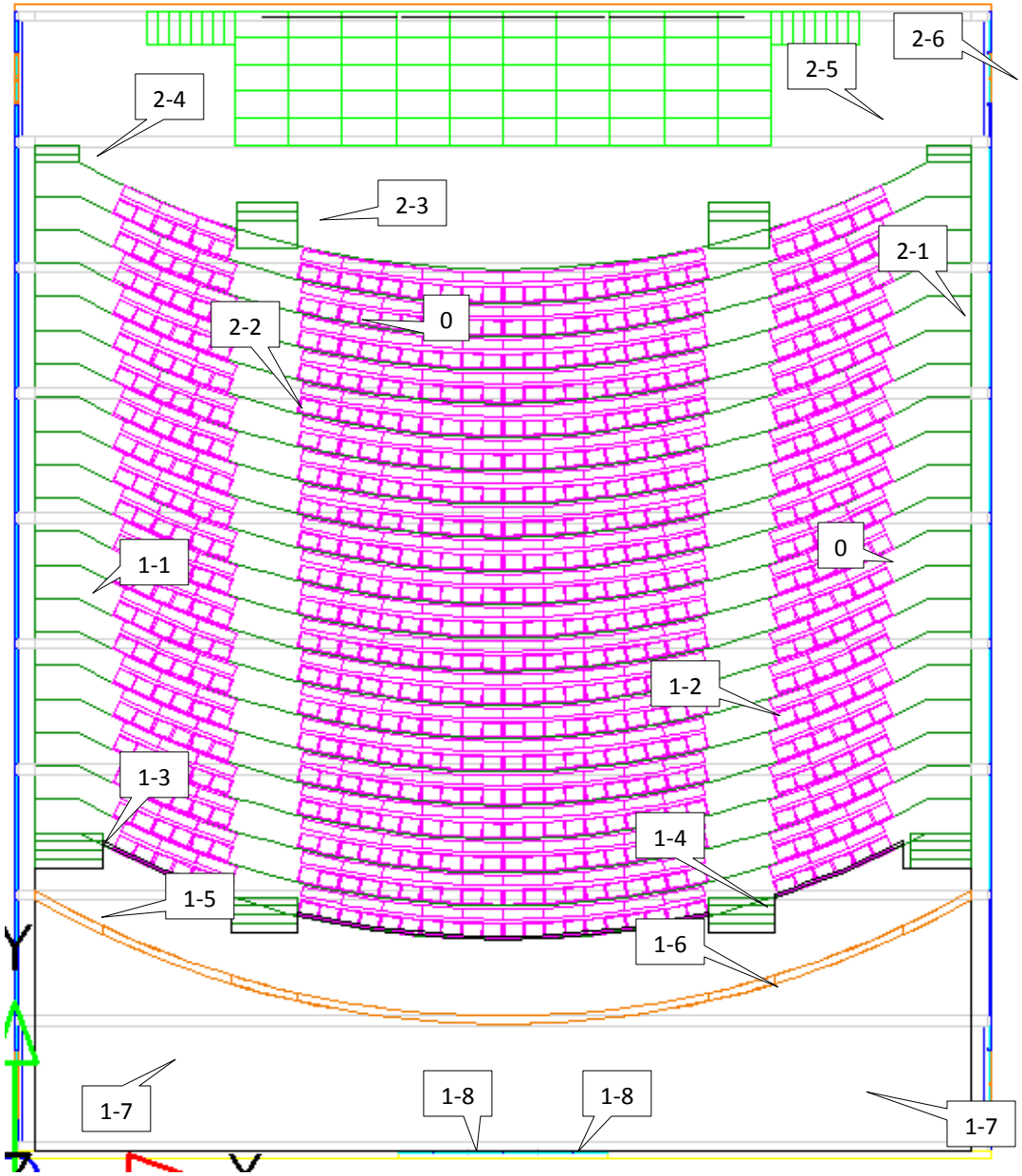


Bild 7 *Grundriss des Hörsaals mit Bezeichnung der Wegelemente des ersten (1-i) und zweiten (2-i) Rettungsweges (hier ohne Treppe 1-9 im Foyer)*

Es wird die Räumung über die Hauptausgänge (Rettungsweg 1) und Notausgänge (Rettungsweg 2) betrachtet, wobei die in Tabelle 5 genannten Modelle zur Berechnung der Fluchtzeit bis zum Verlassen des Hörsaals zum Einsatz kamen. Da hier der Modellvergleich im Vordergrund steht, wurden Reaktionszeiten nicht betrachtet.

Details zu den Berechnungen und Computersimulationen findet man in [16]. Im Folgenden sollen die Ergebnisse zusammengefasst und kommentiert werden.

Tabelle 5 Übersicht der verwendeten Modelle

Typ	Modell
Kapazitätsanalyse	Kapazitätsanalyse nach vfdb-Leitfaden „moderate“ Auslastung
dynamisches Strömungsmodell	Predtetschenski und Milinski [20] („Übergangsstraßenkleidung“, „Normalbedingungen“)
diskretes Individualmodell	buildingEXODUS (Ver. 4.00) [21] (Standardpopulation)
diskretes Individualmodell	PedGo (Vers. 2.5) [22] (Standardpopulation)
kontinuierliches Individualmodell	FDS+Evac (Vers.: FDS 5.5.3, Evac 2.3.1) [23] (Standardpopulation „adult“)
kontinuierliches Individualmodell	ASERI (Vers. 4.8) [24] („Entfluchtung“, inhomogene Population gemäß Grundeinstellungen)

Kapazitätsanalyse

Bei der Kapazitätsanalyse (Handrechnung) werden für den ersten Rettungsweg die zu den einzelnen Wegelementen gemäß Bild 7 gehörigen Laufzeiten für den Kopf des Personenstroms berechnet und die längste dieser Laufzeiten zu der Zeit addiert, welche 1000 Personen benötigen, um den durch die beiden Türen 1-8 gebildeten Engpass zu durchströmen. Dies führt für eine angenommene "moderate Auslastung" auf eine Fluchtzeit von 304 s, was gegenüber der Alternative "optimale Auslastung" wegen der geringeren Durchflüsse konservativ ist. Entsprechend ergibt sich für den zweiten Rettungsweg eine Fluchtzeit von 298 s. Dieses im vfdb-Leitfaden beschrieben Verfahren basiert auf einem Ansatz von J. Pauls [25].

Dynamisches Strömungsmodell nach Predtetschenski und Milinski

Für die Berechnung mit dem Modell von Predtetschenski und Milinski (P&M) [20] wird angenommen, dass die Gruppe aus Personen in „Übergangsstraßenkleidung“ besteht (durchschnittliche Projektionsfläche 0,113 m^2/P). Da der Hörsaal achsensymmetrisch ist, wird die Räumung von insgesamt 500 Personen über einen seitlichen (200 Personen) und mittleren (300 Personen) Stufengang betrachtet. Hier kommt es in der Berechnung für den ersten Rettungsweg zu einem Stau vor der Foyertreppe 1-9, der in den Hörsaal zurückreicht. Dies führt auf eine Fluchtzeit von 347 s bis zum Betreten der Treppe ins Foyer. Berück-

sichtigt man, dass sich im Quergang zwischen Ausgangstür (1-8) und Treppe (1-9) ca. 81 Personen aufhalten können, ergibt sich eine Fluchtzeit für den Hörsaal von 295 s. Für den 2. Rettungsweg kommt es nur auf den Stufenreihen 2-1 und 2-2 zur Staubildung. Die Fluchtzeit beträgt 318 s.

Modell buildingEXODUS

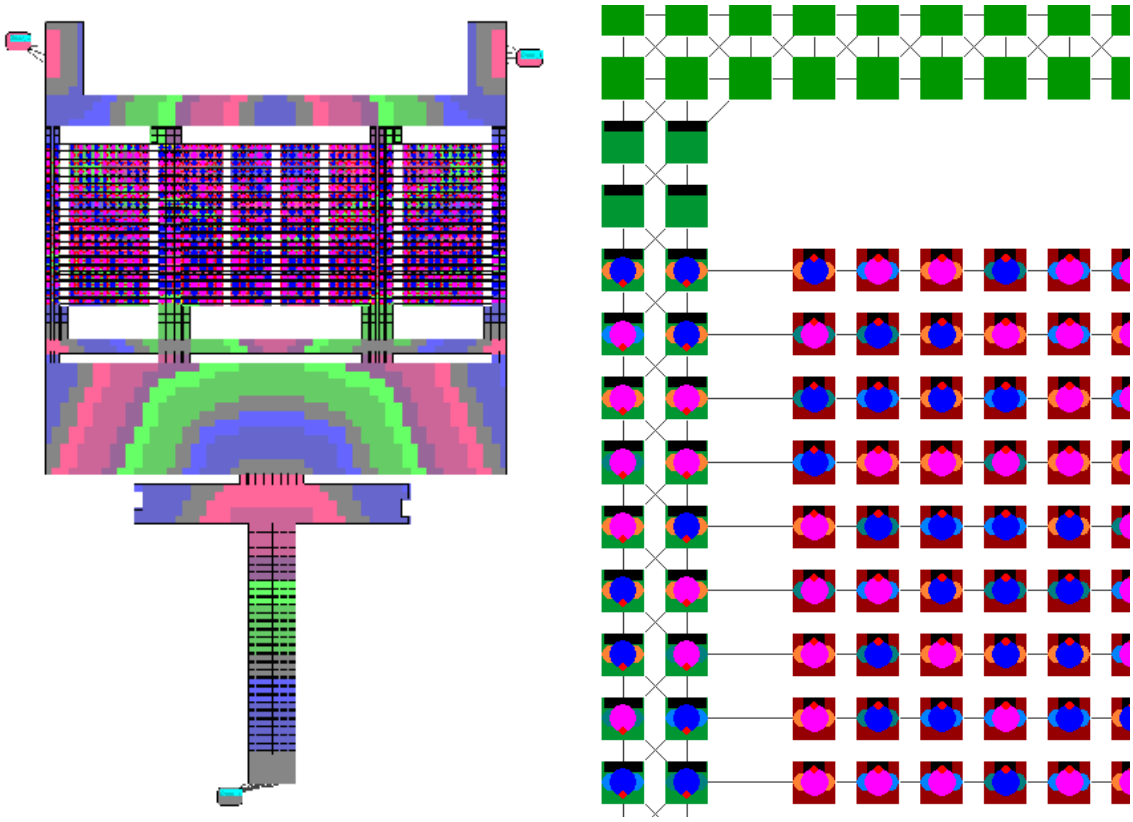


Bild 8 *Mit buildingEXODUS diskretisierter Hörsaal mit anschließender Treppe ins Foyer (links). Rechts ein Detailausschnitt der Sitzplätze und des linken Stufenganges*

In dem diskreten Individualmodell buildingEXODUS (bE) [21] wird die Geometrie durch Zellen dargestellt, die durch Bögen von standardmäßig 0,5 m Länge orthogonal bzw. entsprechend 0,707 m Länge diagonal verbunden werden. Das Hörsaalgebäude mit der anschließenden Treppe wird durch horizontale Zellen, Stufenzellen, Sitzplatzzellen und interne bzw. externe Ausgangszellen diskretisiert (Bild 8). Die Personen der voreingestellten „Standardpopulation“ befinden sich auf den Sitzen und den Stufenreihen. Die Breite der Wegelemente (Tabelle 2) wurde, der Empfehlung in der Dokumentation [21] folgend, jeweils abgerundet, sodass z. B. die 1,40 m breiten seitlichen Engstellen an der Wandscheibe (Nr. 5) nur als 1,00 m breite Durchgänge dargestellt werden. Der Vorschlagswert des maximalen spezifischen Durchflusses an den Ausgängen von 1,33 P/(m*s) wurde übernommen. Im Gegensatz zu den anderen Modellen wurde hier eine Reaktionszeit der Personen von 0 bis 30 s verwendet. Bei der

Flucht über den 1. Rettungsweg wird der Personenfluss auf den Stufengängen limitiert. Vor der Treppe (Nr. 1-9) im Foyergebäude bilden sich temporär kleine Staus, die nicht in den Hörsaal zurückwirken. Die mittlere Fluchtdauer aus vier Rechengängen beträgt 382 s. Beim zweiten Rettungsweg wird der Personenfluss ebenfalls auf den Stufengängen limitiert. Die mittlere Fluchtdauer beträgt 265 s.

Modell PedGo

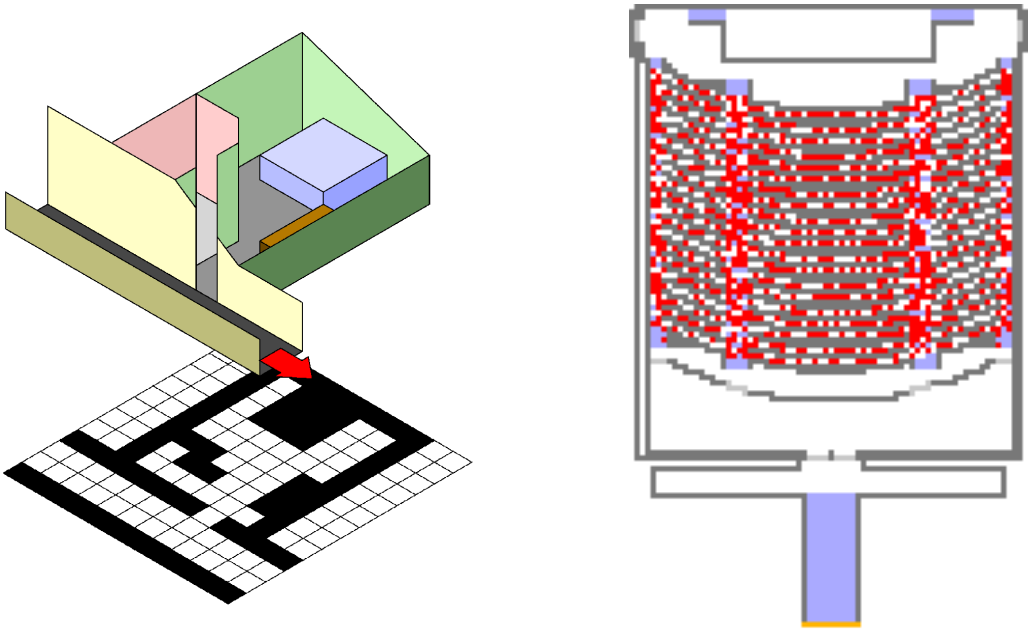


Bild 9 PedGo – Diskretisierung und Ausgangssituation (H. Klüpfel)

Grundlage der Simulation ist ein Multi-Agenten-Modell auf einem quadratischen Zellgitter mit Kantenlänge einer Zelle von 0,4 m, so dass sich eine Zellfläche von 0,16 m² ergibt (Bild 9). Die Fläche der Zelle entspricht der Standfläche einer Person in dichtem Gedränge. Im Unterschied zu buildingEXODUS werden Kanten nicht explizit repräsentiert. Jede Zelle ist mit allen zugänglichen acht Nachbarzellen verbunden. Es gibt zugängliche und nicht zugängliche (Wand, Möbel, etc.) Zellen. Personen werden als Individuen (Agenten) mit eigenständigen Verhaltensweisen, Fähigkeiten und Zielen in diskretem Raum und diskreter Zeit repräsentiert. Die Personen stehen jeweils auf einer Zelle und bewegen sich im Verlauf der Evakuierung von Zelle zu Zelle in Richtung Ausgang. Türen verringern den Personenstrom. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, reduzieren die simulierten Personen auf Türzellen ihre Laufgeschwindigkeit auf ein Viertel. Zur Berücksichtigung von Treppen werden Treppenzellen eingeführt. Hier bewegen sich die Personen mit halber Geschwindigkeit. Auf ihrem Weg zu den Ausgangszellen folgen die Personen den vom Benutzer vorgegebenen Routen. Jede Person verfügt über einen individuellen Parametersatz, der vor jedem Programmdurchlauf neu vergeben wird und der u. a. auch die Laufgeschwindigkeit (anzugeben in Zellen/Sekunde) und die Reaktionszeit enthält

[22]. Für den 1. Rettungsweg ergibt sich eine Fluchtzeit (Mittelwert aus 500 Rechenläufen) von 348 Sekunden (Standardabweichung 7 s) für das Verlassen des Hörsaales, für den 2. Rettungsweg entsprechend 276 s (Standardabweichung 5 s). Es treten signifikante Stauungen (hier definiert als Bereiche, in denen eine Dichte von 4 Personen/m^2 oder mehr während mindestens 10 % der mittleren Gesamtfluchtzeit auftritt) auf den Stufengängen (1. Rettungsweg) bzw. vor den Notausgängen 2-6 (2. Rettungsweg) auf.

Modell FDS+Evac

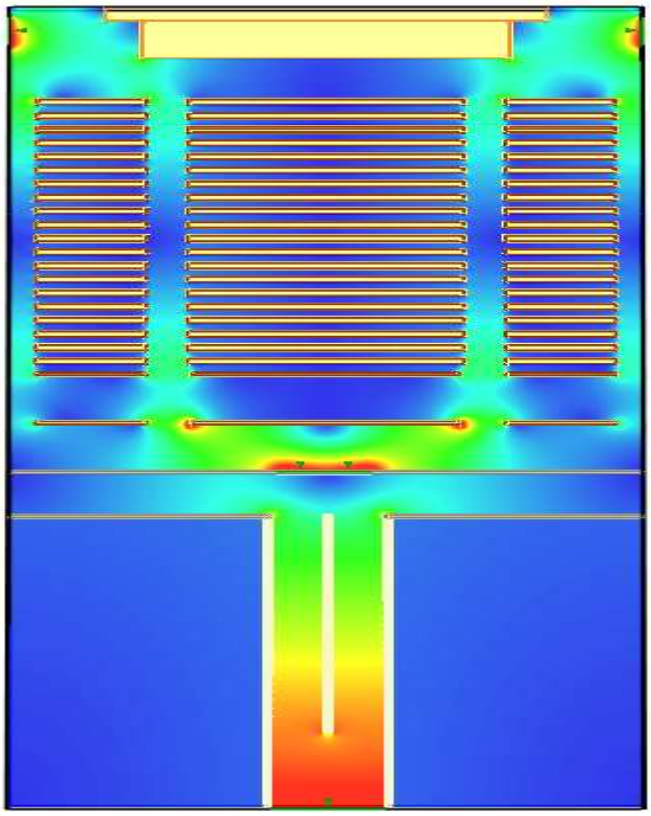


Bild 10 FDS+Evac - Initialisierung des Strömungsfeldes (S. Schelter)

Evac [23] ist ein Zusatzmodul für das CFD-Modell FDS. Basis der Betrachtung bildet ein Gitternetz mit einer Gitterweite von 0,2 m. Wie im Modell buildingEXODUS werden die Sitzränge vereinfacht geradlinig ausgeführt. Die Personen entsprechen der FDS+Evac Standardpopulation „adult“ mit einer freien Gehgeschwindigkeit von 1,25 ± 0,30 m/s. Die Geschwindigkeit auf Treppen für die Auf- und Abwärtsbewegung wird mit 50 % der freien Gehgeschwindigkeit angesetzt. Über Potentialdifferenzen gelangen die Akteure zu den verfügbaren Ausgängen. Zu Beginn der Simulation befinden sich die Personen in den Sitzreihen und Stufengängen. Für beide Szenarien wurden je 10 Rechenläufe durchgeführt und das arithmetische Mittel der Fluchtdauer gebildet. Für die Nutzung des 1. Rettungsweges ergeben sich Stauungen vor den Ausgangstüren. Im unteren Teil des Hörsaals sind wegen der Stauungen in den Stufen-

gängen deutliche Wartezeiten zu verzeichnen. Die Fluchtdauer bis zum Passieren der Hörsaal-Türen beläuft sich im Mittel auf 373 s (Schwankungsbreite < 2 %) bei einem maximalen spezifischen Fluss an den Türen von 0,85 P/ms. Analog treten für die Nutzung des 2. RW deutliche Stauungen beim Betreten der Stufengänge auf. Im Bereich der Notausgänge sind hingegen nur geringe Stauungen zu verzeichnen, sodass die Fluchtdauer im Mittel bei 239 s liegt (Schwankungsbreite < 3 %). Der maximale spezifische Fluss an den Türen beträgt 1,5 P/ms.

Modell ASERI

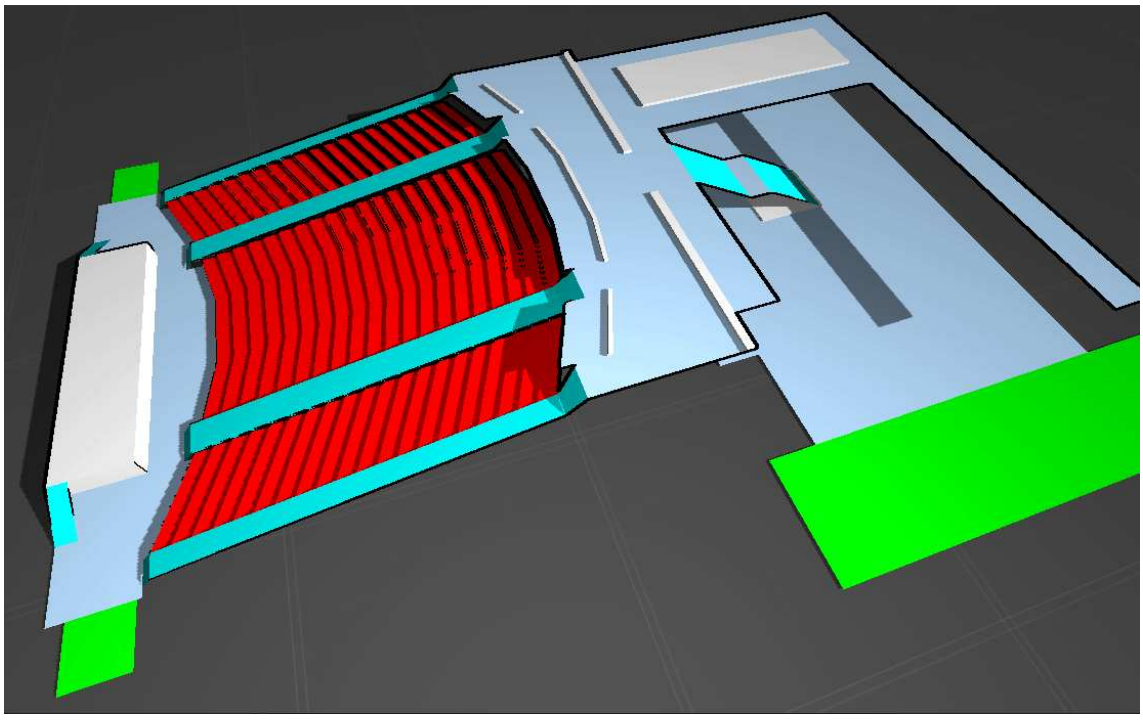


Bild 11 ASERI – 3D-Ansicht des Simulationsmodells mit Treppe im Foyer

Grundlage des Evakuierungsmodells ASERI [24] ist eine Beschreibung der individuellen Bewegung der simulierten Personen (Agenten), wobei für das Fluchtverhalten wesentliche Aspekte wie Reaktions- und Verzögerungszeiten, Wahl des Fluchtweges, Verhalten bei Staubildung, individuelle Mobilität und Raumbedarf explizit in der Simulation berücksichtigt werden. Die Gebäudegeometrie wird dreidimensional in den für den Ablauf der Räumung relevanten Details abgebildet (Bild 11). Bei der Wahl des individuellen Fluchtweges sind neben den üblichen Standards (lokal oder global kürzester Weg, gleichmäßige Auslastung der Ausgänge) u. a. auch individuelle Präferenzen oder eine individuelle Reaktion auf Staubildung möglich. Die Personenbewegung basiert auf der Simulation elementarer Bewegungsabläufe innerhalb einer Menschenansammlung (Aufschließen, Ausweichen, Überholen, Mindestabstand). Bezüglich des Raumbedarfs ist ein Agent vom Typ "Fußgänger" in ASERI durch Schulter- und Brustbreite sowie durch die unbehinderte ebenerdige Gehgeschwindigkeit charakterisiert. Auf Treppen reduziert sich die Gehgeschwindigkeit entspre-

chend eines empirischen Reduktionsfaktors, abhängig von der Stufengeometrie. Es wurden die für rechnerische Nachweise empfohlene Grundeinstellung (Bewegungsmodus Entfluchtung, inhomogene Population) eingesetzt. Das Mitführen von leichtem Gepäck (Aktentaschen) wurde hier zwecks besserer Vergleichbarkeit mit den anderen Modellen – im Gegensatz zur 2. Auflage des vfdb-Leitfadens – nicht berücksichtigt. Die mittlere Fluchtzeit aus 10 Rechenläufen beträgt für den 1. Rettungsweg 324 s (312 s - 328 s) und für den 2. Rettungsweg 311 s (306 s - 319 s). Für den 1. Rettungsweg bilden sich Staus vor den Treppen zum Foyer und vor den Hauptausgängen. Für den 2. Rettungsweg ergeben sich Staus direkt vor den beiden Notausgängen. Diese behindern den Zustrom aus den seitlichen Stufengängen, sodass die Personen in den seitlichen Sitzreihen zum Teil zu den Mittelstufengängen ausweichen.

Ergebnisvergleich

Tabelle 6 Berechnete Räumungszeiten und Staucharakteristiken

Modell	1. RW t_{Flucht}	1. RW Stauungen	2. RW t_{Flucht}	2. RW Stauungen
Kapazitätsanalyse	304 s	Eingangstür (Nr. 1-8)	298 s	Notausgang (Nr. 2-6)
Predtetschenski & Milinski	295 s	Stufengänge Foyertreppe	318 s	Stufengänge
buildingEXODUS	382 s	Stufengänge	266 s	Stufengänge
PedGo	348 s	Stufengänge Hauptausgänge Foyertreppe	276 s	Stufengänge Notausgang
FDS+Evac	373 s	Stufengänge Hauptausgänge	239 s	Stufengänge
ASERI	324 s	Stufengänge Hauptausgänge	311 s	Stufengänge Notausgang

Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse (Mittelwerte) für das Hörsaal-Szenarium im Vergleich. Der Mittelwert aus allen Modellrechnungen für die Räumung des Hörsaals (Fluchtzeit) beträgt 338 s (1. Rettungsweg) bzw. 285 s (2. Rettungsweg). D. h. es gibt Abweichungen zwischen den Modellen von -16 % bis +13 %. Diese bewegen sich damit innerhalb eines Rahmens, der für ingenieurgemäße Rechenverfahren im Brandschutz typisch ist. Es zeigt sich weiterhin, dass ein einfaches Modell wie die Kapazitätsanalyse nicht immer konservative Ergebnisse liefert. Die Lage der wesentlichen Staus in den einzelnen Berechnungen und Simulationen ist nicht immer einheitlich. Ein Grund dafür ist, dass sich die Lage der Staus durch kleine Änderungen der Wegbreiten verändern kann, wie sie schon durch Rundungen bei diskreten Modellen auftreten können.

Es zeigt sich, dass kritische Stellen im Zweifelsfall detailliert betrachtet werden müssen, wobei eine Sensitivitätsanalyse und unter Umständen die Betrachtung mit verschiedenen Modellen hilfreich sein kann.

LITERATUR

[1] Purser, D. A.: Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th Ed. 2008.

[2] ISO 13571:2007 Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data, 15.6.2007

[3] Buff, K.; Greim, H.: Abschätzung der gesundheitlichen Folgen von Großbränden, Zivilschutzforschung Band 25, Bundesamt für Zivilschutz 1997

[4] Forell, B.: Bewertung der akuten Toxizität von Brandrauch. TÜ Bd. 51 (2010), Nr. 3, S. 20-29

[5] Wilk, E.; Lindner, D.; Vock, R..: Untersuchungen zum Inhalations-Hitzeschock, Archiv für Kriminologie Band 203, Seite 159-169, 1999

[6] Brein, D.: Evakuierungskonzepte – Anforderungen, Komponenten, Bewertungen. vfdb-Jahresfachtagung, Hamburg, 1997

[7] Forell, B.: Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. Tagungsband zur 56. vfdb Jahresfachtagung 2007, 21. bis 23. Mai, Leipzig. S. 294-317

[8] Siegfried, W.; Will, J.: Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 3 (2002) 101

[9] Jin, T.: Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th Ed. 2008

[10] Bieske, K.; Gall, D.: Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen, Forschungsbericht im Auftrag des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften Sankt Augustin, Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, März 2003

[11] Schneider, V.: Erkennungsweite von Sicherheitszeichen in Rauch, vfdb-Zeitschrift 4 (2009) 188

[12] Schneider, V.: Modelling the visibility of emergency signs in smoke and smoke-free conditions, 4. Int. Symposium on Human Behaviour in Fire, Cambridge, Juli 2009

[13] Tewarson, A.: Generation of Heat and Gaseous, Liquid, and Solid Products in Fires. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th Ed. 2008

[14] Mulholland, G. W.: Smoke Production and Properties. in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 4th Ed. 2008

[15] Purser, D.: Data Benefits. Fire Prevention Fire Engineers Journal, August 2003, pp. 21 - 24

[16] Forell, B.; Klüpfel, H.; Schneider, V.; Schelter, S.: Vergleichende Anwendung verschiedener Räumungsmodelle. Tagungsband zur 59. vfdb Jahresfachtagung 2011, 30. Mai bis 1. Juni, Berlin, S. 465-493. Zweitveröffentlichung: Vergleichende Betrachtung zu Evakuierungsberechnungen, Tagung "Fire Engineering 2011" Ingenieurakademie West e.V., Düsseldorf, 6. Juli 2011, http://www.rimea.de/de/fachbeitraege/vergleichende-betrachtung-zu-evakuierungsberechnungen/

[17] Oberhagemann, D. (Hrsg.): Statische und dynamische Personendichten bei Großveranstaltungen, vfdb Technischer Bericht TB 13-01, 2012

[18] Schneider, V.: Einfluss der Fluchtwegewahl auf Räumungszeiten und Evakuierungseffizienz, vfdb-Zeitschrift 2/2008, Seite 87 - 93

[19] ARGEBAU: Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten (Muster-Versammlungsstättenverordnung – MVStättV – Fassung Juni 2005. Fachkommission Bauaufsicht, Juni 2005

[20] Predtetschenski, V.M.; Milinski, A.I.: Personenströme in Gebäuden – Berechnungsverfahren für die Projektierung. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln. 1971

[21] Galea, E.R. et al.: Building Exodus 4.00, Users Guide and Technical Manual. University of Greenwich. Greenwich. 2004

[22] PedGo Handbuch: TraffGo HT GmbH, Version 2.5. Duisburg, 2011

[23] Korhonen, T.; Hostikka, S.: Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac, Technical Reference and User`s Guide (FDS 5.5.3, Evac 2.2.3), VTT Technical Research Centre of Finland, 2010

[24] Referenzhandbuch ASERI, Ausgabe 30. Mai 2008

[25] Proulx, G.: Movement of People: The Evacuation Timing. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd Ed. 2002.

ANHANG 1

Anschriften der Referenten und Sitzungsleiter

Dr.-Ing. Cornelius Albrecht
Department of Fire Protection Engineering
Worcester Polytechnic Institute (WPI)
50 Prescott Street
Worcester, MA 01609, USA
calbrecht@wpi.edu

Brandoberrat
Peter Bachmeier
Landeshauptstadt München
Kreisverwaltungsreferat Branddirektion
Einsatzvorbeugung – Kontrolle
An der Hauptwache 8
80331 München
bfm.vb-leitung.kvr@muenchen.de

Dr.-Ing. Sebastian Festag
Hekatron Vertriebs GmbH
Brühlmatten 9
79295 Sulburg
fes@hekatron.de

Dr.-Ing. Burkhard Forell
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Schwertnergasse 1
50667 Köln
burkhard.forell@gmx.de

Dipl.-Ing. Karsten Foth
hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz
Niederlassung Hamburg
Kurze Mühren 20
20095 Hamburg
K.foth@hhpberlin.de

Dr.-Ing. Gerd Geburtig
Planungsgruppe Geburtig
Humboldtstraße 21
99423 Weimar
zentral@pg-geburtig.de

Ltd. Branddirektor
Prof. Dipl.-Phys.
Hans-Joachim Gressmann
Executive Team Head Operations
Technical Rescue & Quick Intervention Section
Abu Dhabi Police GHQ
P.O. Box 37601
Abu Dhabi (U.A.E.)
CEO@emiratesfire.ae

Dr.-Ing. Eckhard Hagen
Hagen Ingenieurgesellschaft für Brandschutz mbH
Keekener Straße 98a
47533 Kleve
office@hagen-ingenieure.de

Baudirektor
Prof. Dipl.-Ing. Günter Hoppe
Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 B
10829 Berlin
gho@dibt.de

Univ.-Prof. i.R.
Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
d.hosser@ibmb.tu-bs.de

Dipl.-Ing. Jörg Kasburg
Gruner AG
St. Jakobs-Strasse 222
4020 Basel (Schweiz)
joerg.kasburg@gruner.ch

Dipl.-Ing. Uwe Klinkhardt
Marioff GmbH
Handwerkerstraße 3
15366 Hoppegarten
uwe.klinkhardt@marioff.de

Dr.-Ing. Matthias Münch
INURI GmbH
Haderslebener Straße 9
12163 Berlin
Matthias.muench@inuri.de

Dr.-Ing. Karen Paliga
hhpberlin
Ingenieure für Brandschutz
Niederlassung Braunschweig
Frankfurter Straße 2
38122 Braunschweig
k.paliga@hhpberlin.de

Dr.-Ing. Olaf Riese
Materialprüfanstalt (MPA)
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
o.riese@ibmb.tu-bs.de

Ministerialrat Dipl.-Ing. Jost Rübel	Ministerium für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen Referat VI.1 Jürgensplatz 1 40217 Düsseldorf jost.ruebel@mwebwv.nrw.de
Dr.-Ing. Volker Schneider	IST GmbH Feuerbachstraße 19 60325 Frankfurt am Main v.schneider@ist-net.de
Dr.-Ing. Ralf Schnetgöke	Gruner AG Thurgauerstraße 56 8050 Zürich (Schweiz) ralf.schnetgoeke@gruner.ch
Dipl.-Ing. Matthias Siemon	Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Technische Universität Braunschweig Beethovenstraße 52 38106 Braunschweig m.siemon@ibmb.tu-bs.de
Dipl.-Ing. Georg Spennes	BFT Cognos GmbH Sachverständige Berater Gutachter Im Büsterfeld 1 52072 Aachen georg.spennes@bft-cognos.de
Dipl.-Ing. Reinhard Wiederkehr	Makiol + Wiederkehr Dipl. Holzbau-Ing. HTL/SISH Industriestrasse 9 5712 Beinwil am See (Schweiz) wiederkehr@holzbauing.ch
Dipl.-Ing. Judith Wachtling	Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Technische Universität Braunschweig Beethovenstraße 52 38106 Braunschweig j.wachtling@ibmb.tu-bs.de

Dipl.-Ing. Klaus-Dieter Wathling	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung VI E2 – Oberste Bauaufsicht Württembergische Straße 6 10702 Berlin Klaus- Dieter.Wathling@SenStadt.Berlin.de
Dr.-Ing. Jürgen Wiese	Sachverständigenbüro Halfkann + Kirchner Richard-Lucas-Straße 4 41812 Erkelenz wiese@hk-brandschutz.de
Dipl.-Ing. Marc Willich	DB Station&Service AG Grundlagen/Bautechnik Europaplatz 1 10557 Berlin Marc.Willich@deutschebahn.com
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß	Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Technische Universität Braunschweig Beethovenstraße 52 38106 Braunschweig j.zehfuss@ibmb.tu-bs.de

ANHANG 2

Kurzvorstellung des Veranstalters (iBMB / MPA)

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ (iBMB)

Das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der Technischen Universität Braunschweig gehört zum Fachbereich für Bauingenieurwesen. Es ist ein Gemeinschaftsinstitut von vier Fachgebieten:

Baustoffe und Stahlbetonbau	Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann	(Tel. -5405)
Massivbau	Prof. Dr.-Ing. M. Empelmann	(Tel. -5413)
Brandschutz	Prof. Dr.-Ing. J. Zehfuß Prof. i. R. Dr.-Ing. D. Hosser	(Tel. -5441) (Tel. -5484)
Organische Werkstoffe und Holzwerkstoffe	Prof. Dr.-Ing. B. Kasal	(Tel. 22077-0)
Geschäftsführender Leiter:	Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann	(Tel. -5405).

Aufbau und Gliederung des iBMB entsprechen der Vielfalt der Arbeitsgebiete, in denen Bauingenieure, Chemiker, Physiker, Metallkundler, Mineralogen, Maschinenbauer, Informatiker und Elektrotechniker tätig sind. Die Themen der Lehre und Forschung umfassen zum einen das traditionelle Gebiet der grundlegenden Untersuchungen des Festigkeits-, Verformungs- und Dauerverhaltens von Baustoffen und Bauteilen des konstruktiven Ingenieurbaus, speziell des Massivbaus.

Ziel der Forschung ist es, aus theoretischen oder experimentellen Untersuchungen gesicherte Erkenntnisse für die Anwendung in der Praxis zu finden. Zum anderen haben sich in den vergangenen Jahren aus neuen Fragestellungen der Praxis vielfältige Forschungsarbeiten entwickelt. Zu nennen sind hier u. a. die Entwicklung und Anwendung von Polymerwerkstoffen und Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen, Fragen zu Konstruktionen und Stoffen der Umwelttechnik sowie Aufgaben im Zusammenhang mit der Bauwerkserhaltung, Denkmalpflege, Dauerhaftigkeit, Instandhaltung und Instandsetzung sowie der Zuverlässigkeit und Sicherheit von Tragwerken.

Typisch für die Brandschutzforschung an der TU Braunschweig sind theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Brandverhalten von Baustoffen, Bauteilen und Tragwerken, zur Entstehung und Ausbreitung von Bränden sowie zur risikogerechten Planung von Gebäuden. Auf diesen Grundlagen werden Ingenieurmethoden des Brandschutzes kontinuierlich weiterentwickelt und in Form von Leitfäden oder über die Normung der Praxis zugänglich gemacht.

Die enge Verknüpfung von Forschung und Materialprüfung und die zeitnahe Übertragung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und Prüferfahrungen in die studentische Ausbildung sind kennzeichnend für die Arbeitsweise des iBMB.

Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig
Tel. 05 31/391-5400
Fax 05 31/391-5900

Nebenstelle: Hopfengarten 20
D-38102 Braunschweig
Tel. 0531/22077-0
Fax 0531/22077 44

MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN BRAUNSCHWEIG (MPA)

Die Materialprüfanstalt für das Bauwesen Braunschweig (MPA) ist seit dem Jahre 1963 beim IBMB angesiedelt. Sie umfasst zurzeit fünf Abteilungen:

Brandschutz	Frau Dr.-Ing. Rohling	(Tel. -5407)
Mechanische Technologie	Dr.-Ing. Gutsch	(Tel. -5446)
Bauwerkserhaltung und Bauwerksabdichtung	Dr. Herrmann	(Tel. -8251)
Chemie, Physik und Umwelt	Dr. Unterderweide	(Tel. -5419)
Zentrale Dienste	Dipl.-Ing. Rusack	(Tel. -5593)
Geschäftsleitung:	Prof. Dr.-Ing. Budelmann	(Tel. -5405)
	Prof. Dr.-Ing. Empelmann	(Tel. -5413)
	Dr.-Ing. Hinrichs	(Tel. -5902)

Die MPA Braunschweig erfüllt im Geschäftsbereich des Niedersächsischen Ministers für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr als fachlich unabhängige Landeseinrichtung vor allem folgende Aufgaben:

- Prüfung von Bauprodukten und Bauarten in den Schwerpunktbereichen
  - Brandschutz
  - Mechanische Eigenschaften von Bauprodukten und Bauarten
  - Schutz und Ertüchtigung von Bauwerken
  - Stoffliche Charakterisierung von Baumaterialien
- Zustandsuntersuchungen, Schadensanalysen und Messungen an Bauwerken
- Überwachung der Bauausführung
- Brandschutztechnische Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten
- Zulassungsprüfungen an neuen Baustoffen und Bauarten
- Ausstellung von allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnissen für Bauprodukte und Bauarten
- Fremdüberwachung der werkseigenen Produktionskontrolle bei der Herstellung von Bauprodukten
- Zertifizierung von Bauprodukten

Seit Jahrzehnten ist die MPA Braunschweig im bauaufsichtlichen Bereich als Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle anerkannt. Sie verfügt zusätzlich über zahlreiche Akkreditierungen und engagiert sich bei der Erstellung von Normen und Richtlinien im nationalen und internationalen Bereich sowie im Erfahrungsaustausch der bauaufsichtlich anerkannten Stellen.

Beethovenstraße 52
D-38106 Braunschweig
Tel. 05 31/391-5400
Fax 05 31/391-5900

ANHANG 3

VERZEICHNIS DER SCHRIFTEN AUS DEM iBMB

In der Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig sind bisher die im folgenden aufgeführten Hefte erschienen.
Vergriffene Titel können gegen Erstattung der Kopierkosten noch geliefert werden.
Lieferbare Schriften können über jede Buchhandlung bezogen werden oder direkt bei:

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Bibliothek
Beethovenstr. 52, D-38106 Braunschweig
(Tel.: 0531/391-5454, Fax : 0531/391-5900)
Die Preisangaben verstehen sich zuzüglich Versandspesen.

Heft 1
Deters, R.
Über das Verdunstungsverhalten und den Nachweis öliger Holzschutzmittel. Braunschweig, 1962. 20 S. Zugl.: Braunschweig, Tech. Hochsch., Diss., 1962.
Vergriffen.

Heft 2
Kordina, K.
Das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff. Braunschweig, 1963. 19 S. Sonderdruck aus:
Beton 13(1962), S.11-18, 81-84.
Vergriffen.

Heft 3
Eibl, J.
Zur Stabilitätsfrage des Zweigelenkbogens mit biegeweichem Zugband und schlaffen Hängestangen. Braunschweig, 1963. 92 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1963.
Vergriffen.

Heft 4
Kordina, K.; Eibl, J.
Ein Verfahren zur Bestimmung des Vorspannverlustes infolge Schlupf in der Verankerung. Zur Frage der Temperaturbeanspruchung von kreiszylindrischen Stahlbetonsilos. Braunschweig, 1964. 16 S. Sonderdruck aus: Beton- und Stahlbetonbau 58 (1963), S.265-268 ; 59(1964) S.1-11.
Vergriffen.

Heft 5
Ertingshausen, H.
Über den Schalungsdruck von Frischbeton. Braunschweig, 1965. 98 S. Zugl.: Hannover, Techn. Hochsch. , Diss., 1965.
ISBN 3-89288-060-3.
ISBN-13: 978-3-89288-060-8
7,67 €

Heft 6
Waubke, N.V.
Transportphänomene in Betonporen. Braunschweig, 1966. 76 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1968.
ISBN 3-89288-061-1.
ISBN-13: 978-3-89288-061-5
7,67 €

Heft 7
Ehm, H.
Ein Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. Braunschweig, 1967.X, 148, 32 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1967.
Vergriffen.

Heft 8
Steinert, J.
Möglichkeiten der Bestimmung der kritischen Last von Stab- und Flächentragwerken mit Hilfe ihrer Eigenfrequenz. Braunschweig, 1967.93, 27 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1967.
Vergriffen.

Heft 9
Lämmke, A.
Untersuchungen an dämmschichtbildenden Feuerschutzmitteln. Braunschweig, 1967. 151 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1967.
Vergriffen.

Heft 10
Rafla, K.
Beitrag zur Frage der Kippstabilität aufgehängter Träger. Braunschweig, 1968. V, 177 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1968.
Vergriffen.

Heft 11
Ivanyi, G.
Die Traglast von offenen, kreisförmigen Stahlbetonquerschnitten: Brazier-Effekt. Braunschweig, 1968. 89 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1968.
Vergriffen.

Heft 12
Meyer-Ottens, C.
Brandverhalten verschiedener Bauplatten aus Baustoffen der Klassen A und B. Braunschweig, 1969. 20 S.
Vergriffen.

Heft 13
Fuchs, G.
Zum Tragverhalten von kreisförmigen Doppelsilos unter Berücksichtigung der Eigensteifigkeit des Füllgutes. Braunschweig, 1968. 82 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1968.
Vergriffen.

Heft 14
Meyer-Ottens, C.
Wände aus Holz und Holzwerkstoffen unter Feuerangriff. Braunschweig., 1970. 18 S. Sonderdruck aus: Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, H.56(1969).
Vergriffen.

Heft 15
Lewandowski, R.
Beurteilung von Bauwerksfestigkeiten anhand von Betongütewürfeln und Bohrproben. Braunschweig, 1970. IX, 165 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1970.
Vergriffen.

Heft 16
Neubauer, F.-J.
Untersuchungen zur Frage der Rissesicherung von leichten Trennwänden aus Gips-Wandbauplatten. Braunschweig, 1970. 123 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Hochsch., Diss., 1969.
Vergriffen.

Heft 17
Meyer-Ottens, C.; Kordina, K.
Gutachten über das Brandverhalten von Bauteilen aus dampfgehärtetem Gasbeton; aufgestellt für den Fachverband Gasbetonindustrie. Braunschweig, 1970. 28 S.
Vergriffen.

Heft 18
Bödeker, W.
Die Stahlblech-Holz-Nagelverbindung und ihre Anwendung : Grundlagen und Bemessungsvorschläge. Braunschweig, 1971. 124 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1971.
ISBN 3-89288-057-3.
ISBN-13: 978-3-89288-057-8
7,67 €

Heft 19
Meyer-Ottens, C.
Bauaufsichtliche Brandschutzvorschriften: Beispiele für ihre Erfüllung bei Wänden, Brandwänden und Decken. Braunschweig, 1971.
Vergriffen.

Heft 20
Liermann, K.
Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbrückenpfeilern mit Rollenlagern. Braunschweig, 1972. 138 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1972.
ISBN 3-89288-056-5.
ISBN-13: 978-3-89288-056-1
7,67 €

Heft 21
Janko, B.
Zum Trag- und Verformungsverhalten ebener Stockwerkrahmen aus Stahlbeton. Braunschweig., 1972.XI, 155 S. Zugl.: Braunschweig, Tech. Univ., Diss., 1972.
ISBN 3-89288-055-7.
ISBN-13: 978-3-89288-055-4
10,23 €

Heft 22
Nürnberger, U.
Zur Frage des Spannungsrißkorrosionsverhaltens kohlenstoffarmer Betonstähle in Nitratlösungen unter Berücksichtigung praxisnaher Verhältnisse. Braunschweig, 1972. 153 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1972.
ISBN 3-89288-054-9.
ISBN-13: 978-3-89288-054-7
10,23 €

Heft 23
Meyer-Ottens, C.
Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. Braunschweig, 1972. 90 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1972.
Vergriffen.

Heft 24
El-Arousy, T.H.
Über die Steinkohlenflugasche und ihre Wirkung auf die Eigenschaften von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge im frischen und festen Zustand. Braunschweig, 1973. 165 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1973.
ISBN 3-89288-053-0.
ISBN-13: 978-3-89288-053-0
Vergriffen.

Heft 25
Rieche, G.
Mechanismen der Spannungskorrosion von Spannstählen im Hinblick auf ihr Verhalten in Spannbetonkonstruktionen. Braunschweig, 1973. 126 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1973.
ISBN 3-89288-052-2.
ISBN-13: 978-3-89288-052-3
7,67 €

Heft 26
Tennstedt, E.
Beitrag zur rechnerischen Ermittlung von Zwangschnittgrößen unter Berücksichtigung des wirklichen Verformungsverhaltens des Stahlbetons. Braunschweig., 1974. 141 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1974.
ISBN 3-89288-051-4.
ISBN-13: 978-3-89288-051-6
7,67 €

Heft 27
Schneider, U.
Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen. Braunschweig, 1973.IVX, 100 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1973.
Vergriffen.

Heft 28
Neisecke, J.
Ein dreiparametriges, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen. Braunschweig, 1974. 108 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1974.
ISBN 3-89288-050-6.
ISBN-13: 978-3-89288-050-9
7,67 €

Heft 29
Kordina, K.; Maack, P.; Hjorth, O.
Traglastermittlung an Stahlbeton-Druckgliedern: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "Traglastermittlung von Stahlbeton-Druckgliedern" (AIF-Nr. 956). Braunschweig, 1974.IV, 95, 18, 18, 52, 87 S.
ISBN 3-89288-048-4.
ISBN-13: 978-3-89288-048-6
10,23 €

Heft 30
Eibl, J.; Ivanyi, G.
Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit von Randbalken bei Stahlbetondecken: Schlussbericht. Braunschweig, 1974. 168 S.
Vergriffen.

Heft 31
Kordina, K.; Janko, B.
Stabilitätsnachweise von Rahmensystemen im Stahlbetonbau: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "Stabilitätsnachweise von Rahmensystemen im Stahlbetonbau (AIF-Nr. 1388). Braunschweig, 1974. 48, 56, 155 S.
ISBN 3-89288-049-2.
ISBN-13: 978-3-89288-049-3
Vergriffen.

Heft 32
Hjorth, O.
Ein Beitrag zur Frage der Festigkeiten und des Verbundverhaltens von Stahl und Beton bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Braunschweig, 1976. 188 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1975.
Vergriffen.

Heft 33
Klingsch, W.
Traglastberechnung instationär thermisch belasteter schlanker Stahlbetondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung. Braunschweig, 1976. 192 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1976.
Vergriffen.

Heft 34
Djamous, F.
Thermische Zerstörung natürlicher Zuschlagstoffe im Beton. Braunschweig., 1977.127 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1977.
Vergriffen.

Heft 35
Haksever, A.
Zur Frage des Trag- und Verformungsverhaltens ebener Stahlbetonrahmen im Brandfall. Braunschweig, 1977.XIV, 133, 12 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1977.
Vergriffen.

Heft 36
Storkebaum, K.-H.
Ein Beitrag zur Traglastermittlung von vierseitig gelagerten Stahlbetonwänden. Braunschweig, 1977. 88 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1977.
ISBN 3-89288-045-X.
ISBN-13: 978-3-89288-045-5
7,67 €

Heft 37
Bechtold, R.
Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. Braunschweig, 1977. V, 140, 12 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1977.
ISBN 3-89288-046-8.
ISBN-13: 978-3-89288-046-2
Vergriffen.

Heft 38
Steinert, J.
Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesbeton aus dem Wassereindringverhalten. Braunschweig, 1977. 57 S. Unveränd. Nachdr. d. Erstveröffentlichung Bad Honnef: Osang, 1977 (Zivilschutzforschung ; Bd. 7).
Vergriffen.

Heft 39
Weiß, R.
Ein haufwerkstheoretisches Modell der Restfestigkeit geschädigter Betone. Braunschweig, 1978. 112 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1978.
ISBN 3-89288-047-6.
ISBN-13: 978-3-89288-047-9
7,67 €

Heft 40
Alda, W.
Zum Schwingkriechen von Beton. Braunschweig., 1978. 209 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1978.
ISBN 3-89288-035-2.
ISBN-13: 978-3-89288-035-6
12,78 €

Heft 41.
Teutsch, M.
Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken mit rechteckigem Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Torsion. Braunschweig., 1979. 181, 220 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1979.
ISBN 3-89288-036-0.
ISBN-13: 978-3-89288-036-3
12,78 €

Heft 42
Schneider, U.
Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Braunschweig., 1979.128, 47 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1979.
Vergriffen.

Heft 43
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz - Veröffentlichungen 1967 bis 1979. Braunschweig, 1979. 54 S.
ISBN 3-89288-037-9.
ISBN-13: 978-3-89288-037-0
5,11 €

Heft 44
Kordina, K.; Fröning, H.
Druckmessungen in Silozellen mit einer neu entwickelten Sonde: Abschlussbericht eines von der DFG gef. Forschungsvorhabens mit dem Titel "Druckmessungen im Inneren von mittleren bis großen Silozellen". Braunschweig., 1979.21, 60 S.
ISBN 3-89288-038-7.
ISBN-13: 978-3-89288-038-7
7,67 €

Heft 45
Henke, V.
Ein Beitrag zur Zuverlässigkeit frei gelagerter Stahlbetonstützen unter genormter Brandeinwirkung. Braunschweig, 1980. 150 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1980.
Vergriffen.

Heft 46
Schneider, U.; Haksever, A.
Wärmebilanzrechnungen für Brandräume mit unterschiedlichen Randbedingungen (Teil 1). Braunschweig, 1980. 79 S.
Vergriffen.

Heft 47
Walter, R.
Partiell brandbeanspruchte Stahlbetondecken: Berechnung des inneren Zwanges mit einem Scheibenmodell. Braunschweig, 1981. 149 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1981.
ISBN 3-89288-039-5.
ISBN-13: 978-3-89288-039-4
7,67 €

Heft 48
Svensvik, B.
Zum Verformungsverhalten gerissener Stahlbetonbalken unter Einschluss der Mitwirkung des Betons auf Zug in Abhängigkeit von Last und Zeit. Braunschweig, 1981. 201 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1981.
ISBN 3-89288-040-9.
ISBN-13: 978-3-89288-040-0
12,78 €

Heft 49
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz - Veröffentlichungen 1967 bis 1981. Braunschweig, 1981. 89 S.
ISBN 3-89288-041-7.
ISBN-13: 978-3-89288-041-7
5,11 €

Heft 50
Ojha, S.K.
Die Steifigkeit und das Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft. Braunschweig., 1982.II, 103 S.
ISBN 3-89288-042-5.
ISBN-13: 978-3-89288-042-4
7,67 €

Heft 51
Henke, V.
Zusammenstellung und Anwendung Bayes'scher Verfahren bei der Stichprobenbeurteilung : (Projekt D1 des SFB 148). Braunschweig., 1982. 2, 49, 2, 12 S.
ISBN 3-89288-043-3.
ISBN-13: 978-3-89288-043-1
5,11 €

Heft 52
Haksever, A.
Stahlbetonstützen mit Rechteckquerschnitten bei natürlichen Bränden. Braunschweig, 1982. 143, 30 S. Zugl.: Istanbul, Techn. Univ., Habil.-Schr., 1982.
ISBN 3-89288-044-1.
ISBN-13: 978-3-89288-044-8
10,23 €

Heft 53
Weber, V.
Untersuchung des Riss- und Verformungsverhaltens segmentärer Spannbetonbauteile. Braunschweig., 1982.III, 191 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1982.
ISBN 3-89288-017-4.
ISBN-13: 978-3-89288-017-2
10,23 €

Heft 54.
Ranisch, E.-H.
Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton: geklebte Bewehrung. Braunschweig., 1986 (Unveränd. Nachdruck). 173 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1982.
ISBN 3-89288-010-7.
ISBN-13: 978-3-89288-010-3
10,23 €

Heft 55
Wiedemann, G.
Zum Einfluss tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton. Braunschweig, 1982. 149 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss. 1982.
Vergriffen.

Heft 56
Timm, R.
Ein geometrisch und physikalisch nichtlineares Rechenmodell zur optimalen Biegebemessung ebener Stahlbetonrahmen. Braunschweig, 1982. 261 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1982.
ISBN 3-89288-018-2.
ISBN-13: 978-3-89288-018-9
12,78 €

Heft 57
Diederichs, U.
Untersuchungen über den Verbund zwischen Stahl und Beton bei hohen Temperaturen. Braunschweig, 1983. 183 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1983.
ISBN 3-89288-019-0.
ISBN-13: 978-3-89288-019-6
10,23 €

Heft 58
Schneider, U.
Wärmebilanzrechnungen in Verbindung mit Versuchen in Brandräumen (Teil 2). Braunschweig, 1983. 34 S.
ISBN 3-89288-020-4.
ISBN-13: 978-3-89288-020-2
5,11 €

Heft 59
Dobbernack, R.; Schneider, U.
Wärmebilanzrechnungen in Brandräumen unter Berücksichtigung der Mehrzonenmodellbildung (Teil 3). Braunschweig, 1983. 96 S.
ISBN 3-89288-021-2.
ISBN-13: 978-3-89288-021-9
7,67 €

Heft 60
Hillger, W.
Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschallprüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen. Braunschweig, 1983. 142 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1983.
ISBN 3-89288-014-X.
ISBN-13: 978-3-89288-014-1
7,67 €

Heft 61
Blume, F.
Zur Wirklichkeitsnähe der Lastannahmen in Silovorschriften für Zellen aus Stahlbeton und Spannbeton. Braunschweig, 1984. X, 215, 124 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1984.
ISBN 3-89288-013-1.
ISBN-13: 978-3-89288-013-4
12,78 €

Heft 62
Nölting, D.
Das Durchstanzen von Platten aus Stahlbeton: Tragverhalten, Berechnung, Bemessung. Braunschweig, 1984. 8, 174, 43 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1984.
ISBN 3-89288-012-3.
ISBN-13: 978-3-89288-012-7
12,78 €

Heft 63
Wesche, J.
Brandverhalten von Stahlbetonplatten im baupraktischen Einbauzustand. Braunschweig, 1985. 130, 17 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1985.
ISBN 3-89288-009-3.
ISBN-13: 978-3-89288-009-7
10,23 €

Heft 64
Droese, S.
Untersuchungen zur Technologie des Gleitschalungsbaus. Braunschweig., 1985. VIII, 213 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1985.
ISBN 3-89288-000-X.
ISBN-13: 978-3-89288-000-4
12,78 €

Heft 65
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz - Forschungsarbeiten 1978 - 1983. Braunschweig, 1984. 305 S.
ISBN 3-89288-001-8.
ISBN-13: 978-3-89288-001-1
12,78 €

Heft 66
Hegger, J.
Einfluss der Verbundart auf die Grenztragfähigkeit von Spannbetonbalken. Braunschweig, 1985. VI, 195 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1985.
ISBN 3-89288-002-6.
ISBN-13: 978-3-89288-002-8
12,78 €

Heft 67
Kepp, B.
Zum Tragverhalten von Verankerungen für hochfeste Stäbe aus Glasfaserverbundwerkstoff als Bewehrung im Spannbetonbau. Braunschweig, 1985.147 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1985.
ISBN 3-89288-003-4.
ISBN-13: 978-3-89288-003-5
7,67 €

Heft 68
Sager, H.
Zum Einfluss hoher Temperaturen auf das Verbundverhalten von einbetonierten Bewehrungsstäben. Braunschweig, 1985. VIII, 181 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1985.
ISBN 3-89288-004-2.
ISBN-13: 978-3-89288-022-6
10,23 €

Heft 69
Haß, R.
Zur praxisgerechten brandschutztechnischen Beurteilung von Stützen aus Stahl und Beton. Braunschweig, 1986. V, 113, 48 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1986.
ISBN 3-89288-005-0.
ISBN-13: 978-3-89288-005-9
Vergriffen (Kopie: 20,45 €).

Heft 70
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz - 17. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton: März 1986; Kurzfassungen der Beiträge. Braunschweig, 1986. 148 S.
ISBN 3-89288-006-9.
ISBN-13: 978-3-89288-006-6
10,23 €

Heft 71
Ehm, C.
Versuche zur Festigkeit und Verformung von Beton unter zweiaxialer Beanspruchung und hohen Temperaturen. Braunschweig, 1986. III, 120 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1986.
ISBN 3-89288-007-7.
ISBN-13: 978-3-89288-007-3
7,67 €

Heft 72
Hartwich, K.
Zum Riss- und Verformungsverhalten von stahlfaserverstärkten Stahlbetonstäben unter Längszug. Braunschweig., 1986. V, 202 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1986.
ISBN 3-89288-008-5.
ISBN-13: 978-3-89288-008-0
12,78 €

Heft 73
Scheuermann, J.
Zum Einfluss tiefer Temperaturen auf Verbund und Rissbildung von Stahlbetonbauteilen. Braunschweig, 1987.224 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-011-5.
ISBN-13: 978-3-89288-011-0
12,78 €

Heft 74
Hinrichsmeyer, K.
Strukturorientierte Analyse und Modellbeschreibung der thermischen Schädigung von Beton. Braunschweig, 1987.II, 162 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-015-8.
ISBN-13: 978-3-89288-015-8
10,23 €

Heft 75
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz - Fachseminar Neue Bemessungsregeln durch Änderung der Stahlbeton- und Spannbetonvorschriften DIN 1045, DIN 4227: Juni 1986; Kurzfassungen der Beiträge. Braunschweig, 1986. 100 S.
ISBN 3-89288-022-0.
ISBN-13: 978-3-89288-022-6
15,34 €

Heft 76
Budelmann, H.
Zum Einfluss erhöhter Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten. Braunschweig., 1987.VI, 215 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-016-6.
ISBN-13: 978-3-89288-016-5
12,78 €

Heft 77
Großmann, F.
Spannungen und bruchmechanische Vorgänge im Normelbeton unter Zugbeanspruchung. Braunschweig, 1987.VII, 174, 160 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-023-9.
ISBN-13: 978-3-89288-023-3
12,78 €

Heft 78
Rohling, A.
Zum Einfluss des Verbundkriechens auf die Rissbreitenentwicklung sowie auf die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen. Braunschweig, 1987.VI, 230 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-024-7.
ISBN-13: 978-3-89288-024-0
12,78 €

Heft 79
Henning, W.
Zwangrissbildung und Bewehrung von Stahlbetonwänden auf steifen Unterbauten. Braunschweig, 1987.IX, 226 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-025-5.
ISBN-13: 978-3-89288-025-7
12,78 €

Heft 80
Richter, E.
Zur Berechnung der Biegetragfähigkeit brandbeanspruchter Spannbetonbauteile unter Berücksichtigung geeigneter Vereinfachungen für die Materialgesetze. Braunschweig, 1987.V, 137 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-026-3.
ISBN-13: 978-3-89288-026-4
7,67 €

Heft 81
Kiel, M.
Nichtlineare Berechnung ebener Stahlbetonflächentragwerke unter Einschluss von Brandbeanspruchung. Braunschweig, 1987.VI, 155 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1987.
ISBN 3-89288-027-1.
ISBN-13: 978-3-89288-027-1
10,23 €

Heft 82
Konietzko, A.
Polymerspezifische Auswirkungen auf das Tragverhalten modifizierter zementgebundener Betone (PCC). Braunschweig, 1988. 143 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1988.
ISBN 3-89288-028-X.
ISBN-13: 978-3-89288-028-8
10,23 €

Heft 83
Grzeschkowitz, R.
Zum Trag- und Verformungsverhalten schlanker Stahlbetonstützen unter besonderer Berücksichtigung der schiefen Biegung. Braunschweig, 1988. VIII, 139 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1988.
ISBN 3-89288-030-1.
ISBN-13: 978-3-89288-030-1
10,23 €

Heft 84
Wiese, J.
Zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonplatten unter partieller Brandbeanspruchung. Braunschweig, 1988. XI, 205 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1988.
ISBN 3-89288-031-X.
ISBN-13: 978-3-89288-031-8
12,78 €

Heft 85
Rudolph, K.
Traglastberechnung zweiachsig biegebeanspruchter Stahlbetonstützen unter Brandeinwirkung. Braunschweig, 1988. 119 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1988.
ISBN 3-89288-032-8.
ISBN-13: 978-3-89288-032-5
7,67 €

Heft 86
Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.; Noack, I.
Einfluss der Eigenbrandlast auf das Brandverhalten von Bauteilen aus brennbaren Baustoffen. Braunschweig, 1989. 60 S.
ISBN 3-89288-058-1.
ISBN-13: 978-3-89288-058-5
Vergriffen (Kopie: 10,23 €).

Heft 87
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig - Forschungsarbeiten 1984 - 1989. Braunschweig, 1989. 299 S.
ISBN 3-89288-034-4.
ISBN-13: 978-3-89288-034-9
15,34 €

Heft 88
Grossert, E.
Untersuchungen zum Tragverhalten von Massivbrücken mit zweizelligem Kastenquerschnitt. Braunschweig, 1989.VII, 206, 29 S. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 1989.
ISBN 3-89288-059-X.
ISBN-13: 978-3-89288-059-2
12,78 €

Heft 89
Weiterbildungsseminar Bauen in Europa : 15.-16. November 1990 in Braunschweig; Kurzreferate. Braunschweig, 1990.169 S.
ISBN 3-89288-063-8.
ISBN-13: 978-3-89288-063-9
12,78 €

Heft 90
Falkner, H.; Teutsch, M.; Claußen, T.; Voß, K.
Vorspannung im Hochbau. Überarb. Aufl. Feb. 1991.
ISBN 3-89288-064-6
ISBN-13: 978-3-89288-064-6
Vergriffen (Kopie: 10,23 €).

Heft 91
Fachtagung Spannbeton im Hoch- und Industriebau : Kurzreferate. 1991.
ISBN 3-89288-065-4
ISBN-13: 978-3-89288-065-3
10,23 €

Heft 92
Heins, T.
Simulationsmodell zur sicherheitstechnischen Beurteilung der Rauchausbreitung bei Bränden in ausgedehnten Räumen. 1991. VII, 142 S. Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1991.
ISBN 3-89288-066-2
ISBN-13: 978-3-89288-066-0
Vergriffen (Kopie: 10,23 €).

Heft 93
Hagen, E.
Zur Prognose des Gefährdungspotentials von Raumbränden. 1992. Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1991.
ISBN 3-89288-070-0.
ISBN-13: 978-3-89288-070-7
11,25 €

Heft 94
Fachseminar Instandsetzung und Ertüchtigung von Massivbauten : 14./15. November 1991 in Braunschweig; Kurzreferate. 1991.
ISBN 3-89288-068-9.
ISBN-13: 978-3-89288-068-4
10,45 €

Heft 95
Qualitätssicherung im Bauwesen: VMPA-Tagung 1992 ; 25.-26.6.1992, Tagungsbericht.
ISBN 3-89288-071-9.
ISBN-13: 978-3-89288-071-4
15,34 €

Heft 96
Weiterbildungsseminar Brandschutz im Industriebau: 30.9.1992 in Braunschweig; Kurzreferate.
ISBN 3-89288-070-0.
ISBN-13: 978-3-89288-070-7
Vergriffen (Kopie: 12,78 €).

Heft 97
Braunschweiger Bauseminar 1992: Neue Technologien im Bauwesen, Tagung 12.-13.11.1992 in Braunschweig.
ISBN 3-89288-073-5.
ISBN-13: 978-3-89288-073-8
20,45 €

Heft 98
Gunkler, E.
Verstärkung biegebeanspruchter Mauerwerkswände durch bewehrte Ergänzungsschichten. 1993. V, 175, 58 S. Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1992.
ISBN 3-89288-074-3.
ISBN-13: 978-3-89288-074-5
15,34 €

Heft 99
Dorn, T.
Zur Berechnung des Tragverhaltens brandbeanspruchter Tragwerke in Verbundbauweise unter besonderer Berücksichtigung der Träger-Stützen-Anschlüsse. 1993. VI, 146 S. Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1992.
ISBN 3-89288-075-1.
ISBN-13: 978-3-89288-075-2
12,78 €

Heft 100
Fachseminar Stahlfaserbeton: 4. März 1993 in Braunschweig; Neue Erkenntnisse und Anwendungsgebiete. 1993. 156 S.
ISBN 3-89288-076-X.
ISBN-13: 978-3-89288-076-9
Vergriffen (Kopie: 20,45 €).

Heft 101
Falkner, H.; Teutsch, M.
Vergleichende Untersuchungen an unbewehrten und bewehrten stahlfaserbewehrten Industriefußböden. 1993. 79 S.
ISBN 3-89288-077-8.
ISBN-13: 978-3-89288-077-8
12,78 €

Heft 102
Falkner, H.; Teutsch, M.
Comperative investigations of plain and steel fibre reinforced industrial ground slabs. 1993.
ISBN 3-89288-078-6.
ISBN-13: 978-3-89288-078-3
12,78 €

Heft 103
5. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 06./07.10.1993 in Braunschweig; Kurzreferate.
ISBN 3-89288-079-4.
ISBN-13: 978-3-89288-079-0
15,34 €

Heft 104
Thienel, K.-C.
Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung. 1993
Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1993.
ISBN 3-89288-80-8.
ISBN-13: 978-3-89288-080-6
12,78 €

Heft 105
Dauerhafte Bauwerke aus Faserbeton: Braunschweiger Bauseminar 1993; 11.-12.11.1993.
ISBN 3-89288-081-6.
ISBN-13: 978-3-89288-081-3
Vergriffen (Kopie: 20,45 €).

Heft 106
Neuentwicklungen im baulichen Brandschutz: Dr. Meyer-Ottens 60 Jahre; Fachseminar 18.03.1994 in Braunschweig.
ISBN 3-89288-085-9.
ISBN-13: 978-3-89288-085-1
15,34 €

Heft 107
Bunte, D.
Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton. 1994. Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss.,
ISBN 3-89288-086-7.
ISBN-13: 978-3-89288-086-8
20,45 €

Heft 108
Holzenkämpfer, P.
Ingenieurmodell des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1994.
ISBN 3-89288-087-5.
ISBN-13: 978-3-89288-087-5
17,90 €

Heft 109
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig [Hrsg.]
Forschungsarbeiten 1990 - 1994.
Braunschweig, 1994.
ISBN 3-89288-088-3.
ISBN-13: 978-3-89288-088-2
30,68 €

Heft 110
Falkner, H.; Teutsch, M; Huang, Z.
Untersuchung der Schubtragfähigkeit und der Wasserundurchlässigkeit von Arbeitsfugen unter Verwendung von Stremaform-Abschalelementen.
Falkner, H.; Teutsch, M; Claußen, T.
Schubtragfähigkeit des Vergussbetons zwischen Köcher-, Block- oder Hülsenfundamenten und Stützenfuß bei unterschiedlich profilierten Betonoberflächen. 1994.
ISBN 3-89288-089-1.
ISBN-13: 978-3-89288-089-9
10,23 €

Heft 111
Voß, K.-U.
Zum Trag- und Verformungsverhalten von Spannbetonträgern im Zustand II - unterschiedliches Verbundverhalten bei Schwellbeanspruchung. 1994.
Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 1993.
ISBN 3-89288-090-5.
ISBN-13: 978-3-89288-090-5
16,36 €

Heft 112
Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 05./06.10.1994 in Braunschweig. Kurzreferate. 1994
ISBN 3-89288-092-1.
ISBN-13: 978-3-89288-092-9
Vergriffen (Kopie: 15,34 €).

Heft 113
Aus der Forschung in die Praxis: 10./11.11.1994. Braunschweiger Bauseminar 1994.
ISBN 3-89288-091-3.
ISBN-13: 978-3-89288-091-2
25,56 €

Heft 114
Warnecke, P.
Tragverhalten und Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk. 1995. Zugl.: Braunschweig, Univ.; Diss., 1995.
ISBN 3-89288-094-8.
ISBN-13: 978-3-89288-094-3
Vergriffen (Kopie: 17,90 €).

Heft 115
Braunschweiger Brandschutz-Tage 1995:
6. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 04./05.10.1995; Kurzreferate.
ISBN 3-89288-093-X.
ISBN-13: 978-3-89288-093-6
Vergriffen (Kopie: 15,34 €).

Heft 116
Huang, Z.
Grenzbeanspruchung gebetteter Stahlfaserbetonplatten. 1995. Zugl.: Braunschweig. Univ., Diss. 1995.
ISBN 3-89288-095-6.
ISBN-13: 978-3-89288-095-0
Vergriffen (Kopie: 15,34 €).

Heft 117
Falkner, H.; Teutsch, M.; Huang, Z. Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton. 1995.
ISBN 3-89288-096-4.
ISBN-13: 978-3-89288-096-7
Vergriffen (Kopie: 23,01 €).

Heft 118
Kubat, B.
Durchstanzverhalten von vorgespannten, punktförmig gestützten Platten aus Stahlfaserbeton. 1995. Zugl.: Braunschweig, Univ.; Diss., 1995.
ISBN 3-89288-097-2.
ISBN-13: 978-3-89288-097-4
Vergriffen (Kopie: 17,90 €).

Heft 119
Braunschweiger Bauseminar 1995: "Dichte Betonbauwerke"; 09./10.11.1995.
ISBN 3-89288-098-0.
ISBN-13: 978-3-89288-098-1
Vergriffen (Kopie: 25,56 €).

Heft 120
Steinert, C.
Bestimmung der Wärmeübergangsbedingungen auf Bauteile im Brandfall: Abschlussbericht. 1995.
ISBN 3-89288-099-9.
ISBN-13: 978-3-89288-099-8
13,29 €

Heft 121
Schütte, J.; Teutsch, M; Falkner, H.: Fugenlose Betonbodenplatten: Forschungsbericht. 1996.
ISBN 3-89288-100-6.
ISBN-13: 978-3-89288-100-1
Vergriffen (Kopie: 17,90 €)

Heft 122
Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 24./25.09.1996 in Braunschweig.
Kurzreferate. 1996.
ISBN 3-89288-101-4.
ISBN-13: 978-3-89288-101-8
Vergriffen (Kopie: 15,34 €).

Heft 123
Droese, S.; Riese, A.
Belastungsversuche an zwei Durchlauf-Plattenstreifen aus Elementplatten mit Aufbeton aus Stahlfaserbeton. 1996.
ISBN 3-89288-102-4.
ISBN-13: 978-3-89288-102-5
10,23 €

Heft 124
Hankers, C.
Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung. 1996. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
ISBN 3-89288-103-0.
ISBN-13: 978-3-89288-103-2
Vergriffen (Kopie: 17,90 €).

Heft 125
Schmidt-Döhl, F.
Ein Modell zur Berechnung von kombinierten chemischen Reaktions- und Transportprozessen und seine Anwendung auf die Korrosion mineralischer Baustoffe. 1996. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
ISBN 3-89288-104-9.
ISBN-13: 978-3-89288-104-9
20,45 €

Heft 126
Falkner, H.; Teutsch, M.: Braunschweiger Bauseminar 1996: Ingenieurbauwerke mit neuen Konzepten. 14./15.11.1996.
ISBN 3-89288-105-7.
ISBN-13: 978-3-89288-105-6
30,68 €

Heft 127
Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte. 1990 - 1993. 1996.
ISBN 3-89288-106-5.
ISBN-13: 978-3-89288-106-3
25,56 €

Heft 128
Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr..-Ing. F. S. Rostásy. Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung. 1997.
ISBN 3-89288-107-3.
ISBN-13: 978-3-89288-107-0
26,59 €

Heft 129
Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte. 1994. 1997.
ISBN 3-89288-108-1.
ISBN-13: 978-3-89288-108-7
20,45 €

Heft 130
Forschung über Baudenkmalpflege - Arbeitsberichte. 1995. 1997.
ISBN 3-89288-109-X.
ISBN-13: 978-3-89288-109-4
20,45 €

Heft 131
Falkner, H.; Teutsch, M; Klinkert, H.: Trag- und Verformungsverhalten dynamisch beanspruchter Fahrbahnen aus Beton- und Stahlfaserbeton. Forschungsbericht. 1997.
ISBN 3-89288-110-3.
ISBN-13: 978-3-89288-110-0
10,23 €

Heft 132
Schütte, J.
Einfluss der Lagerungsbedingungen auf Zwang in Betonbodenplatten. 1997.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
ISBN 3-89288-111-1.
ISBN-13: 978-3-89288-111-7
15,34 €

Heft 133
Braunschweiger Brandschutz-Tage 1997:
7. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 01./02.10.1997; Kurzreferate.
ISBN 3-89288-112-X.
ISBN-13: 978-3-89288-112-4
Vergriffen (Kopie: 17,90 €).

Heft 134
Ameler J.
Betonverhalten bei hohen Temperaturen und triaxialer Beanspruchung - FE-Modell auf der Basis der Betonstruktur. 1997
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
ISBN 3-89288-113-8.
ISBN-13: 978-3-89288-113-1
17,90 €

Heft 135
Rostásy, F. S.; Wigger, H.
Konsolidierung von historischem Natursteinmauerwerk: 06. - 7.11.1997 in Braunschweig
ISBN 3-89288-114-6.
ISBN-13: 978-3-89288-114-8
Vergriffen (Kopie: 20,45 €).

Heft 136
Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Braunschweiger Bauseminar 1997: Innovatives Bauen; 13. - 14.11.1997 in Braunschweig.
ISBN 3-89288-115-4.
ISBN-13: 978-3-89288-115-5
16,36 €

Heft 137
Forschung über Baudenkmalpflege – Arbeitsberichte: 1996 – 1997, 1998
ISBN 3-89288-116-2.
ISBN-13: 978-3-89288-116-2
25,56 €

Heft 138
Scheibe, M.
Vorhersage des Zeitstandverhaltens unidirektionaler Aramidfaserverbundstäbe in alkalischer Umgebung. 1998. Zugl.: Braunschweig TU, Diss., 1998.
ISBN 3-89288-117-0.
ISBN-13: 978-3-89288-117-9
17,90 €

Heft 139
Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 29./30.09.1998 in Braunschweig; Kurzreferate 1998.
ISBN 3-89288-118-9.
ISBN-13: 978-3-89288-118-6
Vergriffen (Kopie: 17,90 €).

Heft 140
Gutsch, A.-W.
Stoffeigenschaften jungen Betons – Versuche und Modelle 1998. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss.
ISBN 3-89288-119-7
ISBN-13: 978-3-89288-119-3
20,45 €

Heft 141
Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Braunschweiger Bauseminar 1998: Beton auf neuen Wegen; 12./13.11.1998
ISBN 3-89288-120-0
ISBN-13: 978-3-89288-120-9
25,56 €

Heft 142
Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Falkner.
1999
ISBN 3-89288-121-9
ISBN-13: 978-3-89288-121-6
28,12 €

Heft 143
Teutsch, M; Klinkert, H.: Leistungsklassen von Stahlfaserbeton. 1999.
ISBN 3-89288-122-7
ISBN-13: 978-3-89288-122-3
6,65 €

Heft 144
Forschungsarbeiten 1995 – 1999. 1999
ISBN 3-89288-123-5
ISBN-13: 978-3-89288-123-0
23,01 €

Heft 145
Braunschweiger Brandschutz-Tage 1999:
8. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 04./05.10.1999 in Braunschweig;
Kurzreferate 1999.
ISBN 3-89288-124-3.
ISBN-13: 978-3-89288-124-7
Vergriffen (Kopie: 17,90 €).

Heft 146
Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Braunschweiger Bauseminar 1999: Bauen im nächsten Jahrtausend 11./12.11.1999.
ISBN 3-89288-125-1
ISBN-13: 978-3-89288-125-4
16,87 €

Heft 147
Weiterbildungsseminar Brandschutz bei Sonderbauten: 28./29.03.2000 in Braunschweig;
Kurzreferate 2000.
ISBN 3-89288-126-X.
ISBN-13: 978-3-89288-126-1
17,90 €

Heft 148:
Hariri, K.: Bruchmechanisches Verhalten jungen Betons - Laser-Speckle-Interferome-trie und Modellierung der Rissprozesszone. 2000.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-127-8
ISBN-13: 978-3-89288-127-8
18,41 €

Heft 149:
Wigger, H.: Rissbildung in historischem Natursteinmauerwerk : Beobachtung, Versuche und Berechnungsmodelle. 2000.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-128-6
ISBN-13: 978-3-89288-128-5
18,92 €

Heft 150:
Neubauer, U.: Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstoffaser – Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen. 2000
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2000.
ISBN 3-89288-129-4.
ISBN-13: 978-3-89288-129-2
20,45 €

Heft 151:
Hosser, D. ; Blume, G. ; Will, J.: Brandschutz in Chemikalienlagern. 2000.
ISBN 3-89288-130-8
ISBN-13: 978-3-89288-130-8
20,45 €

Heft 152:
Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]: Trends und Entwicklungen im Bauwesen : 9.-10.11.2000 ; Braunschweiger Bauseminar 2000.
ISBN 3-89288-131-6
ISBN-13: 978-3-89288-131-5
25,56 €

Heft 153:
Rostásy, F.S. ; Budelmann, H. [Hrsg.]: Rissbeherrschung massiger Betonbauteile : Bauwerk, Werkstoff, Simulation;
Braunschweig, 20.3.2001.
ISBN 3-89288-132-4
ISBN-13: 978-3-89288-132-2
30,68 €

Heft 154:
Krauß, M. ; Hariri, K. ; Rostásy, F.S.:
Hydratationsgrad, Ultraschall-Technik zur Beschreibung der Erhärtung, bruchmechanisches Verhalten jungen Betons : Berichte; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
[Enthaltene Beiträge in englischer Sprache]
ISBN 3-89288-135-9.
ISBN-13: 978-3-89288-135-3
27,61 €

Heft 155:
Gutsch, A. ; Rostásy, F.S.: Spannungs-Dehnungslinie, viskoelastisches Verhalten und autogenes Schwinden jungen Betons : Berichte ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
[Enthaltene Beiträge in englischer Sprache]
ISBN 3-89288-136-7
ISBN-13: 978-3-89288-136-0
19,43 €

Heft 156:
Rostásy, F.S. ; Krauß, M. ; Gutsch, A.:
Spannungsberechnung und Risskriterien für jungen Beton – Methoden des iBMB : Bericht ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
[Enthaltene Beitrag in englischer Sprache]
ISBN 3-89288-137-5
ISBN-13: 978-3-89288-137-7
16,36 €

Heft 157:
Rostásy, F.S. ; Krauß, M. ; Gutsch, A.:
Früher Zwang in massigen Sohlplatten : Bericht ; Forschungsprojekt der EU (Brite Euram BE96-3843), IPACS. 2001.
[Enthaltene Beitrag in englischer Sprache]
ISBN 4-89288-138-3
ISBN-13: 978-3-89288-138-4
25,56 €

Heft 158:
Braunschweiger Brandschutztage 2001: 9. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis ; 1.-2. Oktober 2001 in Braunschweig., Kurzreferate. 2001.
ISBN 3-89288-139-1
ISBN-13: 978-3-89288-139-1
23,01 €

Heft 159:
Falkner, H. ; Teutsch, M. [Hrsg.]: Bauen im Wandel der Zeit : 8.-9.11.2001 ; Braunschweiger Bauseminar 2001.
ISBN 3-89288-140-5
ISBN-13: 978-3-89288-140-7
23,01 €

Heft 160:
Beiträge zum 40. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton : 11.-12.10.2001. 2001.
ISBN 3-89288-141-3
ISBN-13: 978-3-89288-141-4
25,65 €

Heft 161:
Dora, B.: Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand – Phasenveränderungen durch Temperaturbehandlung und Einsatzmöglichkeit.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2001.
ISBN 3-89288-142-1.
ISBN-13: 978-3-89288-142-1
20 €

Heft 162:
RO 70 : 50 Jahre Forschung und 25 Dissertationen ; Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. zum 70 Geburtstag gewidmet. 2002.
ISBN 3-89288-143-X.
ISBN-13: 978-3-89288-143-8
25 €

Heft 163:
Praxisseminar 2002: Brandschutz bei Sonderbauten : 01./02.10.2002 in Braunschweig ; Kurzreferate.
2002.
ISBN 3-89288-144-8
ISBN-13: 978-3-89288-144-5
25 €

Heft 164:
Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Stahlfaserbeton – ein unberechenbares Material?: 14. und 15. November; Braunschweiger Bauseminar 2002.
ISBN 3-89288-145-6
ISBN-13: 978-3-89288-145-2
25 €

Heft 165
Niemann, P.: Gebrauchsverhalten von Bodenplatten aus Beton unter Einwirkungen infolge Last und Zwang. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2002.
ISBN 3-89288-146-4
ISBN-13: 978-3-89288-146-9
20 €

Heft 166
Bauen im Bestand: 25. März 2003 in Braunschweig.
ISBN 3-89288-147-2
ISBN-13: 978-3-89288-147-6
22 €

Heft 167
Blume, G. W.: Ingenieurmodell zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen auf der Basis von experimentell ermittelten Verbrennungseffektivitäten. 2003.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2002.
ISBN 3-89288-148-0
ISBN-13: 978-3-89288-148-3
15 €

Heft 168
Braunschweiger Brandschutztage 2003: 10. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis; 30.09. – 01.10.2003 in Braunschweig, Kurzreferate. 2003.
ISBN 3-89288-149-9
ISBN-13: 978-3-89288-149-0
25 €

Heft 169
Falkner, H.; Teutsch, M. (Hrsg.): Bauforschung und –praxis in schwierigen Zeiten: 13. und 14. November; Braunschweiger Bauseminar 2003.
ISBN 3-89288-150-2
ISBN-13: 978-3-89288-150-6
20 €

Heft 170
Hemmy, O.: Zum Gebrauchs- und Tragverhalten von Tunnelschalen aus Stahlfaserbeton und stahlfaserverstärktem Stahlbeton.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2003.
ISBN 3-89288-151-0
ISBN-13: 978-3-89288-151-3
19 €

Heft 171
Dehne, M.: Probabilistisches Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. 2003. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2003.
ISBN 3-89288-153-7
ISBN-13: 978-3-89288-153-7
18 €

Heft 172
Paliga, K.: Entstehung und Vermeidung von Betonabplatzungen bei Tunnelbränden. 2003.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2003.
ISBN 3-89288-154-5
ISBN-13: 978-3-89288-154-4
20 €

Heft 173
Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser: Brandschutz und mehr. 2003.
ISBN 3-89288-152-9
ISBN-13: 978-3-89288-152-0
30 €

Heft 174
Timm, M.: Verbundwirkung des Betons im Bereich von STREMAFORM – Abschalelementen: Untersuchungsbericht; Okt. 2000. 2004.
ISBN 3-89288-156-1
ISBN-13: 978-3-89288-156-8
5 €

Heft 175
Zehfuß, J.: Risikogerechte Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für natürliche Brandbeanspruchung. 2004.
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004.
ISBN 3-89288-155-3
ISBN-13: 978-3-89288-155-1
18 €

Heft 176
Nause, P.: Berechnungsgrundlagen für das Brandverhalten von Druckgliedern aus hochfestem Beton. 2004. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004.
Erscheint nicht in der iBMB-Schriftenreihe

Heft 177
Budelmann, H.; Falkner, H. [Hrsg.]: Bauen im Bestand: 23. März 2004.
ISBN 2-89288-158-8
ISBN-13: 978-3-89288-158-2
25 €

Heft 178
Hosser, D. [Hrsg.]: Praxisseminar 2004: Brandschutz bei Sonderbauten: 29. – 30.9.2004 in Braunschweig; Kurzreferate. 2004.
ISBN 3-89288-159-6
ISBN-13: 978-3-89288-159-9
25 €

Heft 179
Krauß, M.: Probabilistisches Nachweiskonzept zur Kontrolle früher Trennrisse in massigen Betonbauteilen 2004. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2004.
ISBN 3-89288-160-X
ISBN-13: 978-3-89288-160-5
18 €

Heft 180
Weiske, R.: Durchleitung hoher Stützenlasten bei Stahlbetonflachdecken. 2004. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2004.
ISBN 3-89288-161-8
ISBN-13: 978-3-89288-161-2
20 €

Heft 181
Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Qualität im Bauwesen: 11. und 12. November; Braunschweiger Bauseminar 2004.
ISBN 3-89288-162-6
ISBN-13: 978-3-89288-162-9
25 €

Heft 182
Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Klaus Peter Großkurth: Struktur und Anwendung der Baustoffe. 2005.
ISBN 3-89288-163-4
ISBN-13: 978-3-89288-163-6
25 €

Heft 183
Bauen im Bestand: 23. Februar 2005.
ISBN 3-89288-164-2
ISBN-13: 978-3-89288-164-3
22 €

Heft 184
Hinrichs, W.: Charakterisierung einer einheitlichen Messmethodik und Validierung ausgewählter Verfahren für die Bestimmung der Maschenweiten von Stahldrahtgeweben. Das Forschungsvorhaben wurde von der Stiftung Stahlanwendungsforschung im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V. gefördert (AZ: A182/S24/10036/02). 2005.
ISBN 3-89288-166-9
ISBN-13: 978-3-89288-166-7
25 €

Heft 185
Hosser, D. [Hrsg.]: Braunschweiger Brandschutz-Tage ´05: 11. Fachseminar Brandschutz-Forschung und Praxis, 28. und 29. September 2005 in Braunschweig; Tagungsband. 2005
ISBN 3-89288-167-7
ISBN-13: 978-3-89288-167-4
25 €

Heft 186
Will, J.: Entwicklung eines sauerstoffkalorimetrischen Verfahrens zur Bestimmung von Brandparametern bei unterschiedlich ventilierten Bränden. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2005.
ISBN 3-89288-168-5
ISBN-13: 978-3-89288-168-1
20 €

Heft 187
Rigo, E. M.: Ein probabilistisches Konzept zur Beurteilung der Korrosion zementgebundener Baustoffe durch lösenden und treibenden Angriff. 2005. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2005.
ISBN 3-89288-169-3
ISBN-13: 978-3-89288-169-8
18 €

Heft 188
Bauen im Bestand: Beton in der Abwassertechnik; 6. Sept. 2005.
ISBN 3-89288-170-7
ISBN-13: 978-3-89288-170-4
25 €

Heft 189
Gerritzen, D. P.: Zur Frage der Nachnutzbarkeit verbundlos vorgespannter Stahlbetondecken nach Brandeinwirkung. 2005. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2005.
ISBN 3-89288-171-5.
ISBN-13: 978-3-89288-171-1
18 €

Heft 190
Falkner, H.; Teutsch, M. [Hrsg.]: Bewe(ä)hrter Betonbau: 10. und 11. November; Braunschweiger Bauseminar 2005.
ISBN 3-89288-172-3
ISBN-13: 978-3-89288-172-8
25 €

Heft 191
Kurzberichte aus der Forschung 2005 [CD-ROM]. 2006
ISBN-10:3-89288-173-1
ISBN-13: 978-89288-173-5
5 €

Heft 192
Hosser, D. [Hrsg.]: Brandschutz bei Sonderbauten: Praxisseminar 2006, 26.-27. September 2006; Tagungsband. 2006.
ISBN-10: 3-89288-174-X
ISBN-13: 978-3-89288-174-2
25 €

Heft 193
Sperling, D.: Eine Methode zur automatisierten Überwachung von Spannbetonwegträgern. 2006. Inhaltsverzeichnis. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2006.
ISBN-10: 3-89288-175-8
ISBN-13: 978-3-89288-175-9
20 €

Heft 194
Grunert, J. P.: Zum Tragverhalten von Spannbetonfertigteilbalken aus Stahlfaserbeton ohne Betonstahlbewehrung. 2006. Inhaltsverzeichnis
Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2006.
ISBN-10: 3-89288-176-6
ISBN-13: 978-3-89288-176-6
25 €

Heft 195
Bau Symposium Braunschweig (BSB 2007): Stand und Entwicklung des Trockenbaus; 8. März. 2007. Inhaltsverzeichnis
ISBN 978-3-89288-177-3
ISBN-13: 978-3-89288-177-3
20 €

Heft 196
Bruder, S.: Adaptives Modell der Dauerhaftigkeit im Zuge der Überwachung von Betonbauwerken. 2007. Inhaltsverzeichnis. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2006.
ISBN 978-3-89288-178-0
ISBN-13: 978-3-89288-178-0
27 €

Heft 197
Holst, A.: Korrosionsmonitoring und Bruchortung vorgespannter Zugglieder in Bauwerken. 2007. Inhaltsverzeichnis Summary. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2007.
ISBN 978-3-89288-179-7
ISBN-13: 978-3-89288-179-7
25 €

Heft 198
Forell, B.: A Methodology to assess Species Yields of Compartment Fires by means of an extended Global Equivalence Ratio Concept. 2007. Inhaltsverzeichnis. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2006. [auch online zugänglich über die homepage der Universitätsbibliothek Braunschweig].
ISBN 978-3-89288-180-3
ISBN-13: 978-3-89288-180-3
15 €

Heft 199
Hosser, D. [Hrsg.]: Braunschweiger Brandschutz-Tage ´07: 21. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis, 26. und 27. September 2007 in Braunschweig, Tagungsband. Inhaltsverzeichnis
ISBN 978-3-89288-181-0
ISBN-13: 978-3-89288-181-0
25 €

Heft 200
Nothnagel, R.: Hydratations- und Strukturmodell für Zementstein. 2007. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2007.
ISBN 978-3-89288-182-0
ISBN-13: 978-3-89288-182-0
20 €

Heft 201
Riese, O.: Ein Brandausbreitungsmodell für Kabel. 2007. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2007.
ISBN 978-3-89288-183-4
ISBN-13: 978-3-89288-183-4
18 €

Heft 202
Hosser, D. [Hrsg,]: Braunschweiger Brandschutz-Tage ´08: 22 Fachtagung Brandschutz bei Sonderbauten, 30.09./1.10.2008 in Braunschweig. Tagungsband
ISBN 978-389288-185-8
ISBN-13: 978-3-89288-185-8
25 €

Heft 203
Klinzmann, C.: Methodik zur computergestützten, probabilistischen Bauwerksbewertung unter Einbeziehung von Bauwerksmonitoring. 2008. Inhaltsverzeichnis Summary. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2008.
ISBN 978-3-89288-186-5
ISBN-13: 978-3-89288-186-5
18 €

Heft 204
Schnetgöke, R.: Zuverlässigkeitsorientierte Systembewertung von Massivbauwerken als Grundlage für die Bauwerksüberwachung, 2008. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2008.
ISBN 978-3-89288-187-2
ISBN-13: 978-3-89288-187-2
18 €

Heft 205
Bau Symposium Braunschweig (BSB 2008): Konstruktiver Holzbau; 4. November 2008. Inhaltsverzeichnis.
ISBN 978-3-89288-188-9
25 €

Heft 206
Kampmeier B.; Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau, 2008. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2008.
ISBN 978-3-89288-189-6
18 €

Heft 207
Husemann, U.: Erhöhung der Verbundtragfähigkeit von nachträglich aufgeklebten Lamellen durch Bügelumschließungen. 2009. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2009.
ISBN 978-3-89288-190-2
15 €

Heft 208
Hosser, D. [Hrsg,]: Braunschweiger Brandschutz-Tage ´09: 23. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis, 29.09./30.09.2009 in Braunschweig. Tagungsband.
ISBN 978-3-89288-191-9
25 €

Heft 209
Sperbeck, S. T.: Seismic Risk Assessment of Masonry Walls and Risk Reduction by Means of Prestressing. 2009. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2009.
ISBN 978-389288-192-6
25 €

Heft 210
Hosser, D. [Hrsg.]: Braunschweiger Brandschutz-Tage 2010_: 24. Fachtagung Brandschutz bei Sonderbauten, 21./22.09.2010. Tagungsband.
ISBN 978-3-89288-194-0
25 €

Heft 211
Hohm, V.: Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation. 2010. Zugl.: Braunschweig TU, Diss., 2010.
ISBN 978-3-89288-195-7
25 €

Heft 212
Kruse, D.: Entwicklung von Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen zum Entzündungsschutz von Holz unter Vollbrandbedingungen. 2010. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2010.
ISBN 978-3-89288-196-4
22 €

Heft 213
Twelmeier, H.: Dauerhaftigkeitsprognose der Verfugung von gipshaltigem historischem Mauerwerk, 2011. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2010
ISBN 978-3-89288-197-1
20 €

Heft 214
Hosser, D. [Hrsg.]: Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011: 25. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis, 27.09./28.09.2011. Tagungsband.
ISBN 978-3-89288-198-8
25 €

Heft 215
Hollmann, D. W.: Grundlagen und Ingenieurmodell für den Nachweis von Holzbauteilen mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtung, 2011. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2011.
ISBN 978-3-89288-199-5
25 €

Heft 216
Rostásy, F. S.: Assessment of Mechanical Properties of Structural Materials for Cryogenic Application (June 1988), 2011.
ISBN 978-3-89288-200-8
18 €

Heft 217
Albrecht, C.: Risk-informed and performance-based life safety concept in case of fire. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss., 2012.
ISBN 978-3-89288-202-2
20 €

Heft 218
Hosser, D. [Hrsg.]: Braunschweiger Brandschutz-Tage 2012_: 26. Fachtagung Brandschutz bei Sonderbauten, 19. /20.09.2012. Tagungsband.
ISBN 978-3-89288-203-9
25 €

Heft 219
Wichers, M.: Bemessung von bewehrten Betonbauteilen bei Teilflächenbelastung unter Berücksichtigung der Rissbildung. 2013. Zugl.: Braunschweig, TU, Diss. 2013.
ISBN 978-3-89288-204-6
20 €

Heft 220
Hosser, D. [Hrsg.]: Braunschweiger Brandschutz-Tage 2013_: 27. Fachtagung Brandschutz Forschung und Praxis, 25. /26.09.2013. Tagungsband.
ISBN 978-3-89288-205-3
25 €

Außerhalb der Schriftenreihe sind noch folgende Tagungsbände zu Fachseminaren erschienen. Sie können ebenfalls bei der Bibliothek des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz unter der o. g. Anschrift bezogen werden.

1. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 16./17.09.1987 in Braunschweig; Kurzreferate. Eigenverlag iBMB, 1987.
ISBN 3-89288-0697
11 €

2. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 15./16.09.1988 in Braunschweig; Kurzreferate. Eigenverlag iBMB, 1988.
ISBN 3-89288-029-8.
11 €

3. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 06./07.09.1989 in Braunschweig; Kurzreferate. Eigenverlag iBMB, 1989.
ISBN 3-89288-033-6
Vergriffen (Kopie: 11 €)

Weiterbildungsseminar Brandschutz im Industriebau 06.09.1990 in Braunschweig; Kurzreferate. Eigenverlag iBMB, 1990.
ISBN 3-89288-062-X
11 €

4. Fachseminar Brandschutz - Forschung und Praxis: 07./08.10.1991 in Braunschweig; Kurzreferate. Eigenverlag iBMB, 1991.
ISBN 3-89288-067-0
11 €

Hosser, D [Hrsg.]: 9. Internationales Brandschutz-Symposium „Ingenieurmethoden für die Brandsicherheit“. 25. und 26. Mai 2001 in München; Kurzreferate.
ISBN 3-89288-133-2
23 €

Hosser, D [Hrsg.]: 10. Internationales Brandschutz-Symposium „Ingenieurmethoden des Brandschutzes“. 6. und 7. Juni 2005 in Hannover; Kurzreferate.
ISBN 3-89288-165-0
25 €