INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN - MPA BRAUNSCHWEIG

TU BRAUNSCHWEIG

Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011

25. Fachtagung Brandschutz – Forschung und Praxis

27. und 28. September 2011

Tagungsband

herausgegeben von Dietmar Hosser

Heft 214 · Braunschweig · 2011

ISBN 978-3-89288-198-8

ISSN 1439-3875 (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz)

ISSN 0934-2419 (Braunschweiger Brandschutz-Tage)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.ddb.de

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Geleitwort **7**
D. Hosser, Braunschweig

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

1.1 Grundlagen für die Bemessung von Hochleistungs-brandschutzbeschichtungen für Holzbauteile 11
D. Hollmann, Braunschweig

1.2 Grundlagen für die Brandschutzbemessung von Bauteilen aus ultra-hochfestem Beton 39
B. Kampmeier und D. Hollmann, Braunschweig

1.3 Erweiterung des CFD-Modells FDS für spezielle Brandszenarien und Fragestellungen 65
V. Hohm, Kiel, und D. Hosser, Braunschweig

1.4 Grundlagen und Sicherheitskonzept für den Nachweis der Entfluchtung im Brandfall 83
C. Albrecht, Braunschweig

Sitzung 2 - Normen, Richtlinien, Verordnungen **101**
Leitung: G. Hoppe, Berlin

2.1 Muster-Industriebaurichtlinie – Ziel und Stand der Novellierung 103
J. Rübel, Düsseldorf

2.2 Neue DIN 18230-1 – Vereinfachter Nachweis des baulichen Brandschutzes im Industriebau 115
H.-J. Dargel, Leverkusen

2.3 Erarbeitung von DIN 18230-4 – Nachweise durch Brandsimulation im Industriebau 125
U. Max, Bruchsal, und U. Schneider, Wien

2.4 DIN 4102-4 – Ergänzende Regelungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 149
C. Hahn, Braunschweig

Seite

Sitzung 3 - Brandschutzkonzepte für Sonderbauten **165**
Leitung: H.-J. Gressmann, Abu Dhabi

3.1 Bewegungsfreiheit für Gefahrstofflogistiker im Einklang mit der LöRüRL 167
S. Ehmann, Hamburg

3.2 Brandschutzkonzept für die Erweiterung von Terminal 1 des Flughafens Frankfurt am Main 183
J. Zehfuß, Hamburg, und H. Hofmann, Frankfurt/Main

3.3 Sicherheit für einen neuen Zürcher Stadtteil - Brandschutz bei Hochhausprojekten 201
R. Schnetgöke, Zürich

3.4 Ein Hotel im Tropischen Regenwald - Fortschreibung des Brandschutzkonzeptes für die größte Halle der Welt 217
U. Kirchner, Erkelenz

3.5 Ganzheitliches Brandschutzkonzept als ein Schlüsselelement zum Risikomanagement 245
M. Wang, Berlin

Sitzung 4 - Von der Forschung in die Praxis **257**
Leitung: J. Wesche, Leverkusen

4.1 Brandschutztechnisch sichere Verwendung von Holz und nachwachsenden Rohstoffen im mehrgeschossigen Holzbau 259
M. Dehne, Gifhorn, und B. Kampmeier, Braunschweig

4.2 Weiterentwicklungen der Betonbauweise und Konsequenzen für den baulichen Brandschutz 289
E. Richter, Braunschweig

4.3 Entwicklung von Ingenieurmethoden als Basis für leistungsorientierte Brandschutzkonzepte 317
M. Kersken-Bradley, München

4.4 Tragwerksbemessung für den Brandfall nach den Eurocodes – Chancen und Grenzen 333
P. Schaumann und J. Sothmann, Hannover

Seite

Anhänge

A.1	Anschriften der Referenten und Sitzungsleiter	349
A.2	Kurzvorstellung des Veranstalters (iBMB / MPA)	355
A.3	Verzeichnis der Schriften aus dem iBMB	359

VORWORT

Die Braunschweiger Brandschutz-Tage finden 2011 bereits zum 25. Mal statt und haben offenbar nichts von ihrer Attraktivität eingebüßt. Auch diesmal erwarten wir wieder mehr als 1200 Teilnehmer aus allen Bundesländern und dem deutschsprachigen Ausland. Viele davon sind „Stammkunden“, die jedes Jahr wiederkommen, um sich über aktuelle Entwicklungen in der Forschung und Praxis des Brandschutzes zu informieren. Sie sind ein Beleg dafür, dass die jährlich wechselnden Themen aus den verschiedenen Bereichen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes mit der einmaligen Mischung aus theoretischen Erkenntnissen, experimentellen Ergebnissen und praktischen Erfahrungen für Bauaufsichtsbehörden, Fachplaner, Feuerwehren, Bauherren und Brandschutzindustrie gleichermaßen interessant und nützlich sind.

„Brandschutz – Forschung und Praxis“ lautete das Motto der ersten Veranstaltung im September 1987 und auch der diesjährigen Jubiläumsveranstaltung. Das Zusammenführen von Forschung und Praxis war und ist ein primäres Anliegen dieser Fach- und Fortbildungstagung. Sie lässt die Praxis zeitnah an den Ergebnissen der Brandschutzforschung und Materialprüfung in Braunschweig partizipieren. Gleichzeitig erfahren die Forscher, wo es in der Praxis ungelöste Brandschutzprobleme gibt, und die Materialprüfer erkennen die Schwierigkeiten bei der Umsetzung der aus Brandprüfungen abgeleiteten Anforderungen an die Ausführung von Brandschutzmaßnahmen.

Die diesjährige Fachtagung beginnt ganz traditionell in Sitzung 1 „Neues aus der Forschung“ mit interessanten Ergebnissen aus kürzlich abgeschlossenen oder noch laufenden Forschungsvorhaben des iBMB. Die übliche Sitzung 2 „Normen, Richtlinien, Verordnungen“ am frühen Nachmittag ist etwas verkürzt. Sie widmet sich zunächst mit drei Beiträgen den neuen Entwicklungen beim Brandschutz im Industriebau und schließt mit einem Statusbericht zur Neuausgabe von DIN 4102-4 als nationale Ergänzung zu den Brandschutzteilen der Eurocodes. Als erste Besonderheit aus Anlass des 25-jährigen Jubiläums der Braunschweiger Brandschutz-Tage folgt dann am späten Nachmittag eine kleine Feierstunde mit einem Rückblick auf den Werdegang der Veranstaltungsreihe und einige Highlights der 25 Fachtagungen, einigen Grußworten und der Ehrung besonders aktiver Mitstreiter der vergangenen Jahre. Die Beiträge zur Feierstunde werden in einer separaten Jubiläumsschrift zusammengefasst.

Der Vormittag des zweiten Tages steht wie gewohnt unter dem Motto „Brandschutzkonzepte für Sonderbauten“ und bietet fünf Beiträge zu ganz unterschiedlichen Problembereichen. Am Nachmittag folgt dann als zweite Besonderheit der Jubiläumstagung die Sitzung 4 „Von der Forschung in die Praxis“. Sie greift nochmals das Credo des iBMB auf, dass die Forschung kein Selbstzweck ist, sondern Grundlagen, Methoden und Daten liefern soll, die letztlich in

Weiterentwicklungen der Praxis münden. In diesem Sinne werden exemplarisch vier Themenbereiche herausgegriffen, die in der Vergangenheit wiederholt in Beiträgen zur Fachtagung behandelt wurden und deren Entwicklung dadurch beeinflusst und gefördert wurde.

Einen wesentlichen Beitrag zum Erkenntnisgewinn der Tagungsteilnehmer leistet jedes Jahr die begleitende Fachausstellung, an der sich diesmal mehr als 70 Fachfirmen beteiligen. Diese zeigen und erläutern unterschiedliche Maßnahmen des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes, nützliche Planungsinstrumente und einschlägige Fachliteratur. Wiederum als Besonderheit zum Jubiläum bietet die Berufsfeuerwehr Braunschweig sowohl Informationen und Anschauungsmaterial auf einem größeren Ausstellungsstand als auch praktische Vorführungen vor der Stadthalle an.

Ich danke den Referenten und Moderatoren, den Ausstellern, dem Personal der Zentralstelle für Weiterbildung im Tagungsbüro und nicht zuletzt meinen Mitarbeitern für die Mitwirkung bei der Vorbereitung und Durchführung der Tagung. Allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern wünsche ich zwei spannende, erkenntnisreiche Tage mit guten Gesprächen in den Pausen und beim Abendeempfang und viel Spaß beim Lesen dieses Tagungsbandes.

Braunschweig, 27. September 2011

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Wissenschaftlicher Leiter der Fachtagung

SITZUNG 1

NEUES AUS DER FORSCHUNG

Sitzungsleitung: D. Hosser, Braunschweig

GRUNDLAGEN FÜR DIE BEMESSUNG VON HOCHLEISTUNGS-BRANDSCHUTZBESCHICHTUNGEN FÜR HOLZBAUTEILE

Dirk Hollmann
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

EINLEITUNG

Während der Baustoff Holz nach dem 2. Weltkrieg immer mehr an Bedeutung verlor und in den 1960er Jahren einen Tiefpunkt seiner Verwendung erreichte, erfreut sich Holz heutzutage immer größerer Beliebtheit – insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels [1].

In der baulichen Anwendung sind dem Baustoff Holz jedoch Grenzen gesetzt, da die Bauordnungen der Bundesländer Mindestanforderungen in Bezug auf die Brennbarkeit der Baustoffe und die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile definieren. Die Musterbauordnung – MBO [2], in Verbindung mit der Muster-Holzbaurichtlinie – M-HFHHolzR [3], erlaubt den Einsatz von Holzkonstruktionen bis einschließlich der Gebäudeklasse 4. Die tragende und aussteifende Holzkonstruktion muss jedoch durch Beplankungen gekapselt werden, damit innerhalb einer Branddauer von 60 Minuten weder die Tragfähigkeit verloren geht, noch die Holzkonstruktion entzündet. Die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung muss aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Folglich werden die tragenden Bauteile vergrößert und der natürliche, ästhetische Charakter des Holzes geht verloren. Die Forschungsarbeiten, mit denen die Grundlagen für die Regelungen zur konstruktiven Durchbildung der Bekleidung in der M-HFHHolzR geschaffen wurden, sind maßgeblich durch das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) beeinflusst worden [4]. In den Folgejahren wurde durch weitere Forschungsvorhaben des iBMB gezeigt, dass die Einhaltung des Sicherheitsniveaus in der Gebäudeklasse 4 unter Einsatz bestimmter kompensatorischer Maßnahmen auch dann möglich ist, wenn der Entzündungsschutz auf 30 Minuten oder weniger reduziert wird [5].

Ein ganz neuer Ansatz zum Erreichen eines Entzündungsschutzes bei Holzkonstruktionen ist der Einsatz einer Hochleistungsbrandschutzbeschichtung, im Folgenden HLB genannt, die in zwei InnoNet Verbundforschungsvorhaben [6] und [7] entwickelt wurde. Die HLB wird als deckender oder transparenter Anstrich auf die Holzbauteile aufgetragen und ersetzt die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung. Bei Brandbeanspruchung bildet die HLB eine voluminöse Schicht, die das darunter liegende Holz isoliert und seine Entzündung verhindert oder ausreichend lange hinauszögert. Es wurden Laborformulierungen erforscht, die die Entzündung des Holzes für eine Dauer von mehr als 30 Minuten verhindern können. Für Stahlkonstruktionen existieren schon seit längerer Zeit Beschichtungssysteme zur Verbesserung der ansonsten eher geringen Feuerwiderstandsdauer. Diese Produkte sind jedoch nicht auf

Holz anwendbar, da sie aufgrund hoher Initialtemperaturen des Intumeszenzprozesses die Entzündung nur für einen kurzen Zeitraum hinauszögern können.

Simon [8] und Kruse [9] beschreiben die Entwicklung der HLB von der Grundidee bis zum Einsatz unter Vollbrandbedingungen entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) nach DIN 4102-2 [10]. Es fehlte jedoch bisher noch der Nachweis, dass dieses völlig neue Produkt auch in der Lage ist, die gleichen Schutzziele wie eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung im Sinne der M-HFHHolzR ausreichend zuverlässig zu erreichen, obwohl es streng genommen selbst ein brennbarer Baustoff ist.

Ziel der Arbeit [11] war es, diesen Nachweis zu führen. Außerdem sollte für den planenden Ingenieur ein Bemessungswerkzeug bereitgestellt werden, mit dem die Schutzwirkung der HLB sowohl für den Entzündungsschutz als auch für die Tragfähigkeit brandbeanspruchter Bauteile dimensioniert werden kann. Am Ende darf das Sicherheitsniveau beschichteter Bauteile nicht niedriger sein als bei etablierten Bauweisen.

WIRKUNGSWEISE DER HOCHLEISTUNGSBRANDSCHUTZBESCHICHTUNG

Bisher werden reaktive bzw. dämmschichtbildende Brandschutzsysteme lediglich für die Verbesserung des Baustoffverhaltens industriell eingesetzt. In den Forschungsvorhaben [6] und [7] wurde ein intumeszierendes Beschich-tungssystem mit derart hoher Isolationswirkung entwickelt, dass der Zündzeitpunkt des Substrates aus Holzwerkstoffen über 30 Minuten hinaus verzögert wird. Die dargestellte Brandschutzwirkung geht damit deutlich über die bisher bekannten chemischen Brandschutzsysteme hinaus. Die neue Hochleistungsbrandschutzbeschichtung (HLB) basiert auf sogenannten keramisierenden Elastomeren, die bereits in Ablationsbeschichtungen für den militärischen Bereich Verwendung fanden [8].

Die HLB reagiert auf eine Erhöhung der Umgebungstemperatur bei einem Brand. Bei Überschreiten einer relativ niedrigen Grenztemperatur bildet sie eine voluminöse Kohlenstoffschicht, die das darunter liegende Holz schützt. Die Bildung der Dämmschicht basiert auf einer Reihe temperaturabhängiger chemischer Reaktionen. Die HLB bestehen aus den Komponenten Bindemittel, Gasbildner, Kohlenstoffbildner und einem sauren Katalysator. Bei steigender Temperatur wird zunächst eine Säure freigesetzt, die mit dem Kohlenstoffbildner reagiert. Parallel dazu setzt die Gasreaktion ein und führt zu der Volumenvergrößerung. Sofern die zeitliche Abfolge der Reaktion mit dem Erweichen der Bindemittelmatrix zusammenfällt, bildet sich eine Dämmschicht aus Kohlenstoff [8].

Da es im Regelfall in einem Gebäude nicht zum Brand kommt, muss die Beschichtung die ästhetischen und gebrauchstauglichen Kriterien eines herkömmlichen Oberflächenschutzsystems für Holz erfüllen. Wenn im Brandfall der oben beschriebene Chemismus einsetzt, können vier Zonen unterschieden werden:

auf der Unterseite das unzerstörte Holz, die noch unbeeinträchtigte Beschichtung, die Reaktionszone mit dem stattfindenden Intumeszenzprozess und der isolierende Schutzschaum (Bild 1).

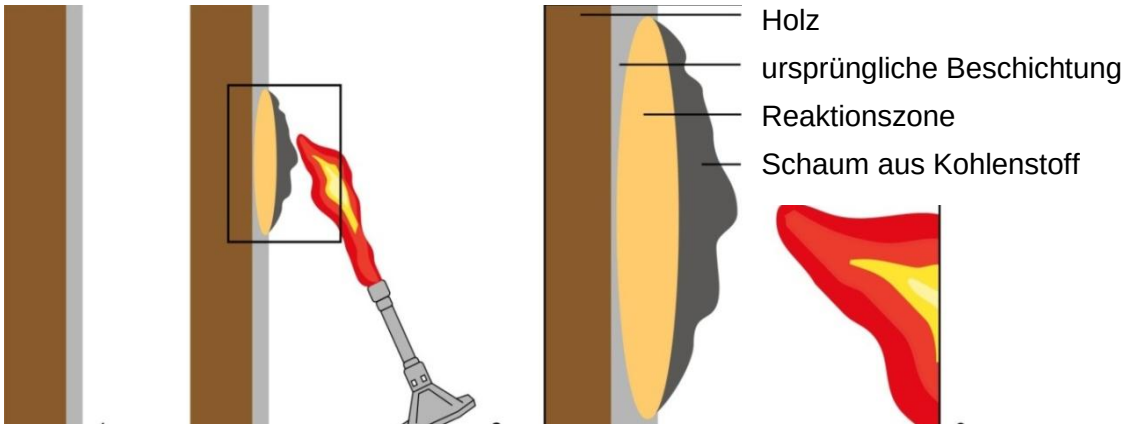


Bild 1 *Reaktionsschema der Hochleistungsbrandschutzbeschichtung: (1) Ausgangssituation: Beschichtung im Gebrauchszustand, (2) Ausbildung der schützenden Dämmschicht unter Flammenbelastung, (3) vergrößerte Ansicht; entnommen aus [6]*

ERFÜLLUNG DER SCHUTZZIELE HINSICHTLICH DER BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN

Die HLB ist ein organischer Baustoff und kann aufgrund der Verbrennungswärme maximal in die europäische Baustoffklasse B nach DIN EN 13501-1 [12] eingestuft werden [11]. Die Schutzziele des baulichen Brandschutzes müssen jedoch in gleichem Maße wie bei der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung erfüllt werden, um diese ersetzen zu können. Hierbei ist zu unterscheiden, ob die Schutzziele zeitlich in die Brandentstehungsphase oder in die Vollbrandphase fallen.

Brandentstehungsphase

Der Baustoff hat einen grundlegenden Einfluss auf die Brandausbreitungsgeschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche. Becker und Hosser [13] führen den Vergleich, dass die Brandausbreitungsgeschwindigkeit auf nichtbrennbaren Oberflächen (A-Baustoff) mit bis zu 5 cm/min deutlich geringer ist als jene auf brennbaren Oberflächen (B-Baustoff) mit bis zu 300 cm/min. Die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung ist in der Regel eine Gipsfeuerschutz- oder Gipsfaserplatte. Sie fällt damit in die Baustoffklasse A2 und behindert die Brandausbreitung optimal.

In [11] wird anhand von Baustoffuntersuchungen, Auswertungen der Brand-wieterleitung auf beschichteten Fassadenoberflächen und Literaturstudien gezeigt, dass die HLB in der Brandentstehungsphase vergleichbare Eigenschaften aufweist wie gipsgebundene Bekleidungen mit Tapete. Auf den ausführlichen

Nachweis wird an dieser Stelle verzichtet und für weitere Informationen auf die Literaturstellen [7], [11] und [14] verwiesen.

Vollbrandphase

Da die Energiefreisetzungsrate des beschichteten Holzes in Bauteilversuchen unter ETK-Bedingungen nicht gemessen werden kann, wird in [11] ein vereinfachtes Ingenieurmodell entwickelt, um die Größenordnungen theoretisch abschätzen zu können. Betrachtet wird die Branddauer von Beginn des Vollbrandes bis zum Zündzeitpunkt des Holzes, also die Dauer, die das Holz im Kontext der M-HFHHolzR durch die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung geschützt wird.

Die flächenbezogene Energiefreisetzungsrate berechnet sich zu:

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot H_u \cdot \chi \quad [\text{kW/m}^2] \tag{1}$$

mit:

$\dot{m}$ Abbrandrate [kg/ (m²h)]

H_u Heizwert [kWh/kg]

χ Verbrennungseffektivität [-]

Die Verbrennungseffektivität χ berücksichtigt global die Ventilationsbedingungen und stöchiometrischen Verhältnisse der Brandgase und nimmt Werte zwischen 0 und 1,0 an. Da für das System HLB auf Holz keine belastbaren Ergebnisse bezüglich χ vorliegen, wird bei den weiteren Betrachtungen auf der sicheren Seite liegend ein Wert χ = 1,0 angenommen.

Für Fichtenholz wird nach DIN 18230-3 [15] ein Heizwert $H_{u,Holz}$ = 4,8 kWh/kg angenommen. Für die HLB wurden untere Heizwerte $H_{u,HLB}$ von 3,7 und 2,6 kWh/kg gemessen [7]. Für die weiteren Rechnungen wird ein oberer Grenzwert von $H_{u,HLB}$ = 4,0 kWh/kg berücksichtigt.

Die Abbrandrate $\dot{m}$ konnte in Großversuchen nicht bestimmt werden. Es existieren jedoch Versuchsergebnisse aus dem Projekt [7], welche zunächst die Beschreibung der temperaturabhängigen bezogenen Massen von Holz und der HLB erlauben. In einem weiteren Schritt werden die Abbrandraten über die Temperaturänderungen in den Querschnittsfasern hergeleitet [11].

Im Folgenden wird auf die genaue Herleitung des Ingenieurmodells verzichtet und mit Bild 2 die flächenbezogene Energiefreisetzungsrate unter Annahme einer sehr großen Beschichtungsmenge von 4,0 kg/m² dargestellt.

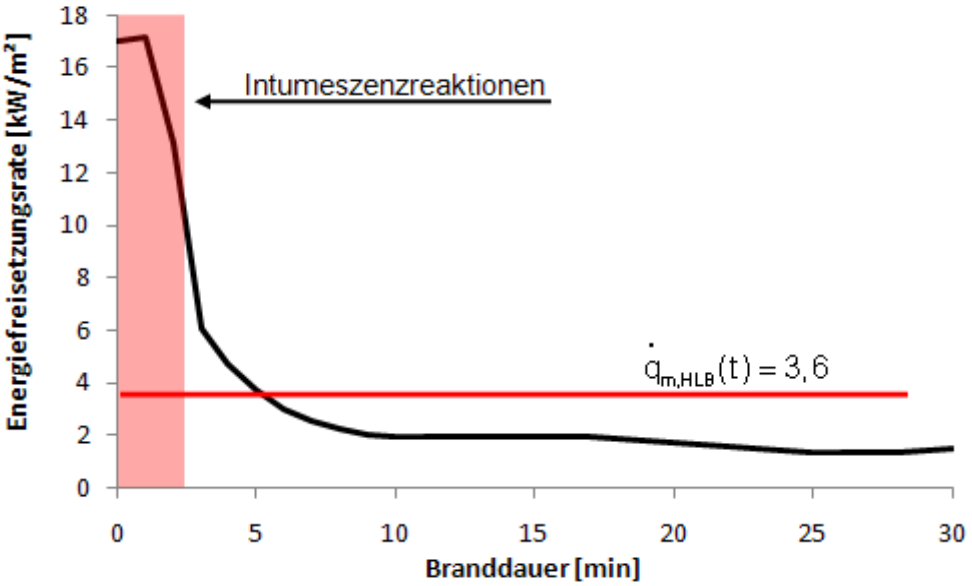


Bild 2 *Verlauf der flächenbezogenen Energiefreisetzungsrate nach dem Ingenieurmodell und Umrechnung in eine mittlere Energiefreisetzungsrate [11]*

In den ersten beiden Brandminuten ändern sich die Temperaturen im Holz und in der HLB zeitlich sehr schnell, was wiederum zu einer hohen Abbrandrate und in logischer Konsequenz zu einer hohen Energiefreisetzungsrate führt. Dieser Effekt zeichnet sich auch bei Single-Burning-Item (SBI) Versuchen ab und ist charakteristisch für Baustoffprüfungen mit Messung der Energiefreisetzungsrate. Im weiteren Verlauf des Brandes stellt sich ab der 7. Brandminute mit rund 2 kW/m² ein weitgehend konstanter Verlauf der Energiefreisetzungsrate ein.

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird der genaue Verlauf der Energiefreisetzungsrate in eine mittlere flächenbezogene Energiefreisetzungsrate von 3,6 kW/m² umgerechnet. Die umgesetzte, flächenbezogene Brandlast ergibt sich damit bei einer 30-minütigen Branddauer zu rund 6,50 MJ/m².

Die Energiefreisetzungsrate und die durch die HLB umgesetzte Brandlast haben Einfluss auf den tatsächlichen Brandverlauf. Im Folgenden wird speziell auf die beiden Parameter Brandraumtemperatur und Branddauer eingegangen. In der Betrachtung werden Räume ohne immobile Brandlast (nichtbrennbare Baustoffe) mit Räumen, deren Umfassungsbauteile aus Holz beschichtet sind, verglichen. Diese Vorgehensweise führt insgesamt zur Identifikation der maximalen Brandbeeinflussung durch die Holzbauweise mit HLB.

In Tabelle 1 werden die auf die Grundfläche bezogenen Mittelwerte der mobilen Brandlast q_{mo} für verschiedene Nutzungen angegeben. Als Quelle dient der vfdb-Leitfaden [16]. Die immobile Brandlast q_{im} ist bei der nichtbrennbaren Bauweise gleich Null. Bei Verwendung der HLB auf Holzflächen ergibt sich aufgrund der Annahmen des vorhergehenden Abschnittes eine immobile Brandlast q_{im} = 20 MJ/m². Dabei wird ferner unterstellt, dass die beschichteten

Flächen das Dreifache der Grundfläche betragen. Der in der Tabelle angegebene Faktor k_d ist ein Maß für die Verlängerung der Branddauer.

Tabelle 1 Erhöhung der Branddauer bei Verwendung beschichteter Holzbauteile im Vergleich zur nichtbrennbaren Bauweise bei unterschiedlichen Nutzungen; Bezugsbranddauer 30 Minuten ETK; Mittelwerte der mobilen Brandlasten nach [16]

Nutzung	Mobile Brandlast Mittelwert [MJ/m²]	Immobile Brandlast [MJ/m²]		k_d Faktor Branddauer [-]
		nichtbrennbar	Holz mit HLB	
Wohnraum	780	0	20	1,03
Büroraum	420	0	20	1,05
Krankenzimmer	230	0	20	1,09
Klassenraum	285	0	20	1,07
Hörsaal	140	0	20	1,14
Bücherei	1500	0	20	1,01

Bei Nutzungen mit relativ hoher Brandlast wie Wohnräumen, Büchereien oder Büroräumen erhöht sich die Branddauer durch die HLB nur um maximal 5 %. Hingegen schlägt bei Nutzungen mit sehr geringen mobilen Brandlasten wie Krankenzimmer oder Hörsälen die Zusatzbrandlast aus der HLB stärker durch. In einem Hörsaal wird die Branddauer rund 14 % länger sein. In diesem Fall ist jedoch die Annahme, dass das Dreifache der Grundfläche beschichtet wird, sicher sehr konservativ.

Mit der Erhöhung der Energiefreisetzungsrate geht die Erhöhung der Brandraumtemperatur einher. Entsprechend den Angaben in [17] und [18] ist der Zusammenhang unterproportional. Der Exponent kann mit ausreichender Genauigkeit zu n = 2/3 angenommen werden. Die Brandraumtemperatur mit beschichteten Holzbauteilen $T_{BR,HLB(t)}$ zum Zeitpunkt t berechnet sich dann ausgehend von der Brandraumtemperatur ohne immobile Brandlast $T_{BR,0(t)}$ entsprechend Gleichungen (2) und (3). Für die Berechnung des Faktors k_T zur Beschreibung der Temperaturerhöhung wird eine annähernd gleiche thermische Eindringzahl bei der Bauweise mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung und HLB unterstellt. Ferner wird wiederum das Dreifache der Grundfläche als beschichtet vorausgesetzt.

$$k_T = \left(\frac{\dot{q}_{\text{mit HLB}}}{\dot{q}_{\text{ohne HLB}}}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{2}$$

$$T_{BR,HLB}(t) = T_{BR,0}(t) \cdot k_T \tag{3}$$

Der Temperaturanstieg ist bei den Nutzungen mit geringer Energiefreisetzung erwartungsgemäß am größten (Tabelle 2). Bei einem Hörsaal ist von einer Erhöhung von 6 % auszugehen, sodass die Auswirkung der HLB auf die Brandraumtemperatur beim Vergleich mit nichtbrennbaren Umfassungsbauteilen insgesamt gering ist

Tabelle 2 Erhöhung der Brandraumtemperatur bei Verwendung beschichteter Holzbauteile im Vergleich zur nichtbrennbaren Bauweise bei unterschiedlichen Nutzungen; Bezugsbranddauer 30 Minuten ETK; Mittelwerte der mobilen Brandlasten nach [16]

Nutzung	Energiefreisetzungsrate aus mobiler Brandlast [kW/m²]	Energiefreisetzungsrate aus HLB [kW/m²]	k_T Faktor Temperaturerhöhung [-]
Wohnraum	250	11	1,03
Büroraum	250	11	1,03
Krankenzimmer	250	11	1,03
Klassenraum	150	11	1,05
Hörsaal	130	11	1,06
Bücherei	200	11	1,04

ENTZÜNDUNGSSCHUTZ

Prüfkriterium

In der Bautechnik ist es ein Novum, den Entzündungsschutz von Holzkonstruktionen mittels organischer Beschichtungen zu erreichen. Folglich mussten Forschungen bezüglich belastbarer Überprüfungskriterien unternommen werden [7, 11]. Um eine möglichst hohe Akzeptanz bei den entsprechenden Gremien zu erreichen, ist es sinnvoll, die Baustoff- und Bauteilprüfungen sowie Prüfungen der Qualitätsüberwachung an bereits bekannte und etablierte Verfahren anzulehnen. In diesem Beitrag wird der Fokus auf die Untersuchungen zum wichtigen Prüfkriterium „Entzündungstemperatur“ gelegt. In den Quellen [7] und [11] werden darüber hinaus alle erforderlichen Prüfungen und die zugehörigen Kriterien für das Zulassungsverfahren beschrieben.

Das Prüfkriterium der Klassifizierungsnorm DIN EN 13501-2 [19] in Verbindung mit der Prüfnorm DIN EN 14135 [20] für die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung besagt, dass im Mittel alle Temperaturmessstellen im Klassifizierungszeitraum um 250 K wärmer werden dürfen. Die Temperatur an einer einzelnen Messstelle darf sich um 270 K erhöhen. Unter der Annahme, dass ein gewisser Sicherheitsabstand zur Entzündungstemperatur vorhanden sein soll, unterstellt das Normenwerk eine kritische Temperatur für Holzwerkstoffe im

Bereich von 270 °C bis 300 °C. Bei der Absicherung dieses normativen Temperaturkriteriums wurden in der Hauptsache Branddauern von 30 bis 60 Minuten und damit relativ langsame Erwärmungsgeschwindigkeiten unterstellt.

Die HLB kann im Rahmen schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte auch sinnvoll für kürzere Schutzdauern eingesetzt werden. Die Untersuchungen in [7] und [11] zeigen, dass der Temperaturverlauf in der Grenzschicht zwischen Holz und Beschichtung bei sehr kurzen Schutzdauern noch vor Erreichen der 270 °C schlagartig ansteigen kann, was auf eine Entzündung des Holzes hinweist. Da in einer Literaturstudie keine eindeutigen Angaben zur Entzündungstemperatur von Nadelholz unter Glutbrandbedingungen (geschützte Oberfläche) gefunden werden konnten, wurden in [11] entsprechende Versuche durchgeführt.

In einer Versuchsreihe im Cone-Kalorimeter wurden Fichtenholzproben mit einer mittleren Rohdichte von 435 kg/m³ bei einer mittleren Feuchte von 7,9 M.-% untersucht (Bild 3). Die Probekörper wurden mit 10 mm dicker Mineralwolle abgedeckt, um die physikalische Wirkung der HLB zu simulieren. Der Heizer wurde auf verschiedene Wärmestromdichten kalibriert, um unterschiedliche Aufheizraten in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Holz zu erzwingen. Die Bandbreite der mittleren Aufheizraten reichte von 3,1 bis 14,0 K/min, womit der baupraktische Anwendungsbereich beschichteter Holzbauteile abgedeckt wurde. Die Entzündung des Holzes wird bei der späteren Auswertung zu dem Zeitpunkt angenommen, bei dem ein schlagartiger Temperaturanstieg in der Grenzschicht erkennbar ist.

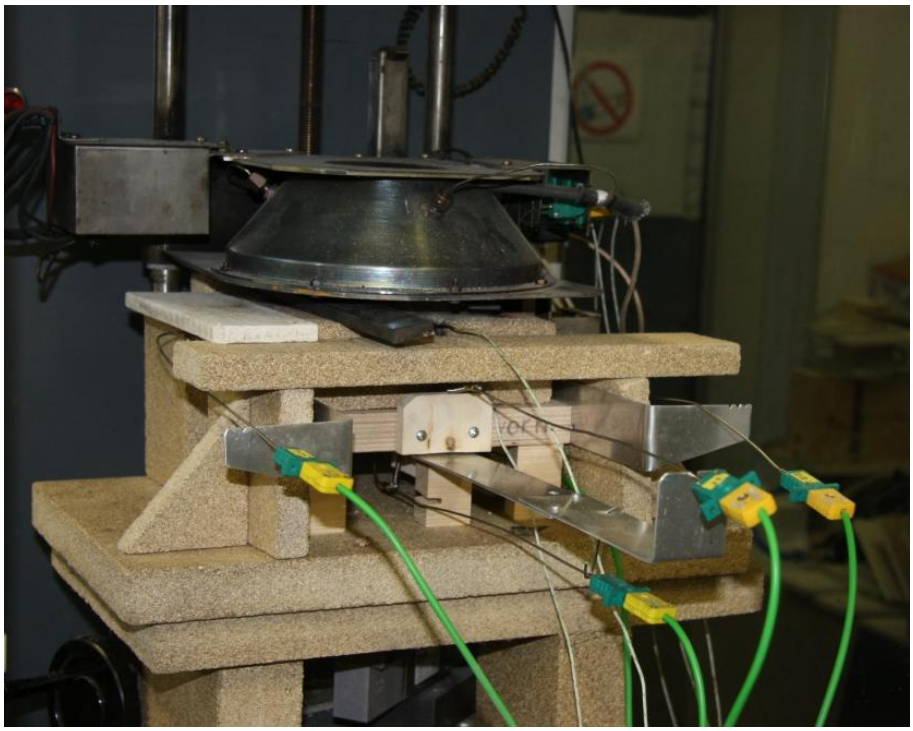


Bild 3 *Untersuchungen im Cone-Kalorimeter zum Entzündungsverhalten von Fichtenholz mit gedämmter Oberfläche [11]*

Im nächsten Schritt werden die Entzündungstemperaturen über der jeweiligen mittleren Aufheizgeschwindigkeit v_M einer Probe aufgetragen (Bild 4). Die Entzündungstemperaturen unterliegen großen Streuungen. Der Trend, das mit dem Anstieg der mittleren Aufheizgeschwindigkeit die Entzündungstemperatur sinkt, ist jedoch unverkennbar. Aufgrund der großen Streuungen ist das Bestimmtheitsmaß der Trendlinie indes sehr gering. Im Bild wurde zum Vergleich die kritische Temperatur von 270 °C nach DIN EN 14135 bzw. DIN EN 13501-2 aufgetragen. Immerhin 6 der 41 gemessenen Werte unterschreiten die 270 °C leicht. Bei diesen letzteren Versuchen wurden teilweise impulsartige Steigerungen der Aufheizgeschwindigkeiten simuliert.

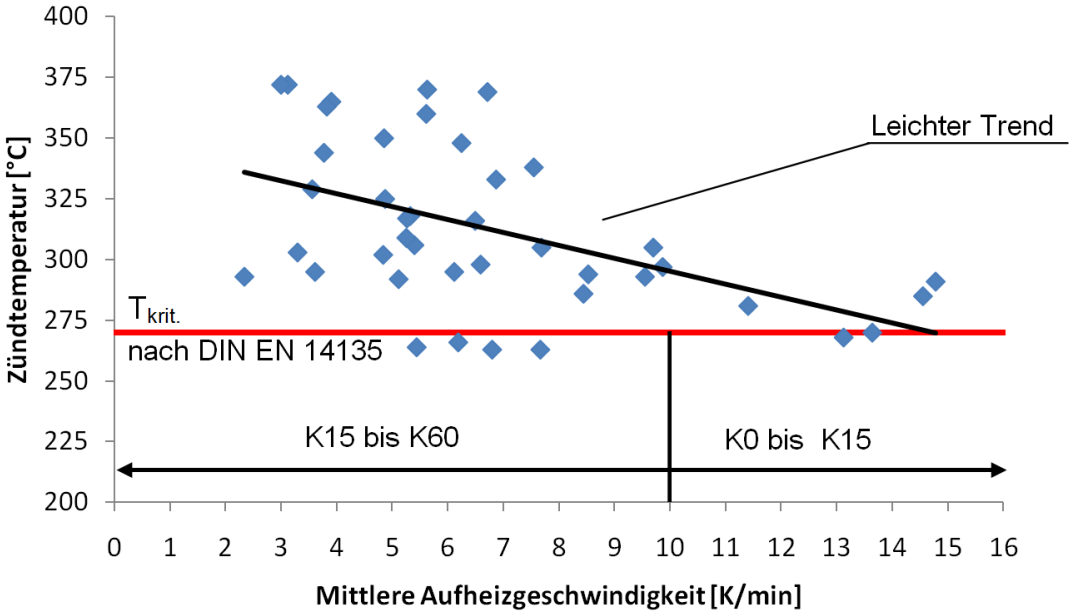


Bild 4 *Versuche im Cone-Kalorimeter zur Untersuchung der Entzündungstemperatur abgedeckter Proben: Darstellung der Entzündungstemperatur über der mittleren Aufheizgeschwindigkeit [11]*

Die Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit, wonach die Entzündungstemperatur des Holzes von der Aufheizgeschwindigkeit beeinflusst wird. Für eine exakte Modellbildung reichen die durchgeführten Versuche jedoch noch nicht aus, da die stochastischen Streuungen sehr groß sind. Weiterhin wurde ein Indiz für das Absinken der Entzündungstemperatur gefunden, sofern das Holz impulsartigen Steigerungen der Aufheizgeschwindigkeit ausgesetzt wird. Bei Systemen mit HLB könnte sich dieses bemerkbar machen, wenn Teile der Beschichtung abfallen, wenngleich auch sofort Schaum nachgebildet wird.

Die Ausführungen zeigen eindrucksvoll, dass die Festlegung einer festen Entzündungstemperatur auch für eine einzelne Holzart, gleiche Rohdichte und Holzfeuchtigkeit physikalisch nicht korrekt ist, da es sich nicht um eine Materialkonstante handelt. Man kann vielmehr nur eine Grenztemperatur definieren, bei deren Unterschreitung eine Entzündung mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit vermieden wird.

Für die Materialprüfung wird empfohlen, die in DIN EN 13501-2 normierten Temperaturkriterien beizubehalten jedoch ein zusätzlich absicherndes Kriterium einzuführen. Neben den Temperaturverläufen sollte die zeitliche Änderung, also die Aufheizgeschwindigkeit v ausgewertet werden. Wenn v schlagartig anwächst, ist mit dem Entzünden des Holzes zu rechnen.

In der praktischen Anwendung wird die Entzündung zu dem frühesten Zeitpunkt angenommen, bei dem entweder die oben beschriebenen Grenztemperaturen erreicht sind oder aber die Aufheizgeschwindigkeit v = 15 K/min beträgt. Dieser Wert v = 15 K/min erweist sich nach den Auswertungen der Versuche in [7] als praxistauglich. Der Grenzwert wird auf das Mittel aller Temperaturmessstellen angewandt. In Bild 5 wird die Auswertung beispielhaft für 2 Versuche gezeigt. Die HLB in Versuch 1 hat eine relativ hohe Schutzdauer und nach 40 Minuten ist sowohl die mittlere Grenztemperatur als auch der Grenzwert der Aufheizgeschwindigkeit erreicht. Die HLB des zweiten Versuchs erreicht die Grenztemperatur nach 16 Minuten, die kritische Aufheizgeschwindigkeit dagegen bereits nach 13,5 Minuten. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die mittlere Temperatur rund 240 °C, also deutlich weniger als das normierte Temperaturkriterium.

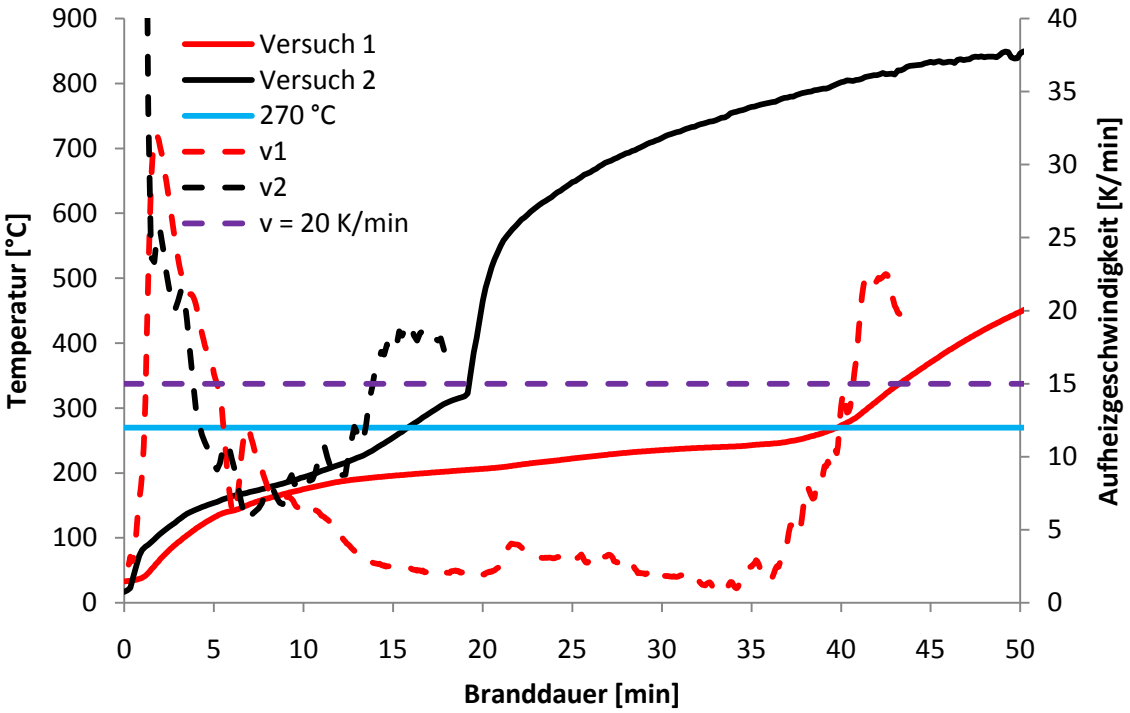


Bild 5 *Auswertung zweier Versuche entsprechend dem erweiterten Temperaturkriterium [11]*

Abhängigkeit von der Trockenschichtdicke

Für die Entwicklung eines Bemessungsverfahrens ist es erforderlich, den Zusammenhang zwischen Schutzdauer und Trockenschichtdicke der HLB beschreiben zu können. Hierfür wurde in [11] eine Versuchsreihe im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 durchgeführt. Die Probekörper wiesen beflammte Ober-

flächen mit Abmessungen von 50/50 [cm²] auf. Die Temperatureinwirkung entsprach dabei der ETK.

Grundlage der Versuche war die sogenannte Laborformulierung RAB7-10, die vom Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Institut WKI speziell für diese Reihe zur Verfügung gestellt wurde. Jeweils 2 Probekörper wurden mit einer entsprechenden Auftragsmenge versehen, sodass sich Trockenschichtdicken, von 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 und 3,0 mm einstellten. Da die Laborformulierung hinsichtlich der Applizierbarkeit nicht optimiert war, muss eine Ungenauigkeit von mindestens +/- 10 % angenommen werden.

In Bild 6 sind die Schutzdauern über der Trockenschichtdicke aufgetragen. Angegeben sind die Trendlinien für folgende Kriterien: 270 °C mittlere Temperatur aller Messstellen, 290° C an einer Messstelle, Erreichen einer Aufheizgeschwindigkeit von maximal 15 K/min im Mittel aller Messstellen entsprechend dem vorhergehenden Abschnitt. Weiterhin wurde zu jeder Trockenschichtdicke das Kriterium mit der minimalen Schutzdauer betrachtet und ebenfalls einer Regression unterzogen. Die Trendlinie ist im Bild 6 fett dargestellt. Während die Schutzdauer der HLB zunächst linear mit der Trockenschichtdicke anwächst, geschieht dies ab ca. 2,0 mm nur noch unterproportional. Ab einer Schichtdicke von 2,5 mm fällt die Schutzdauer sogar wieder ab, was auf das Abrutschen des Schaumes zurückzuführen ist, im Bild durch einen roten Balken hinterlegt. Dieses Abrutschen trat während der Versuche schlagartig auf.

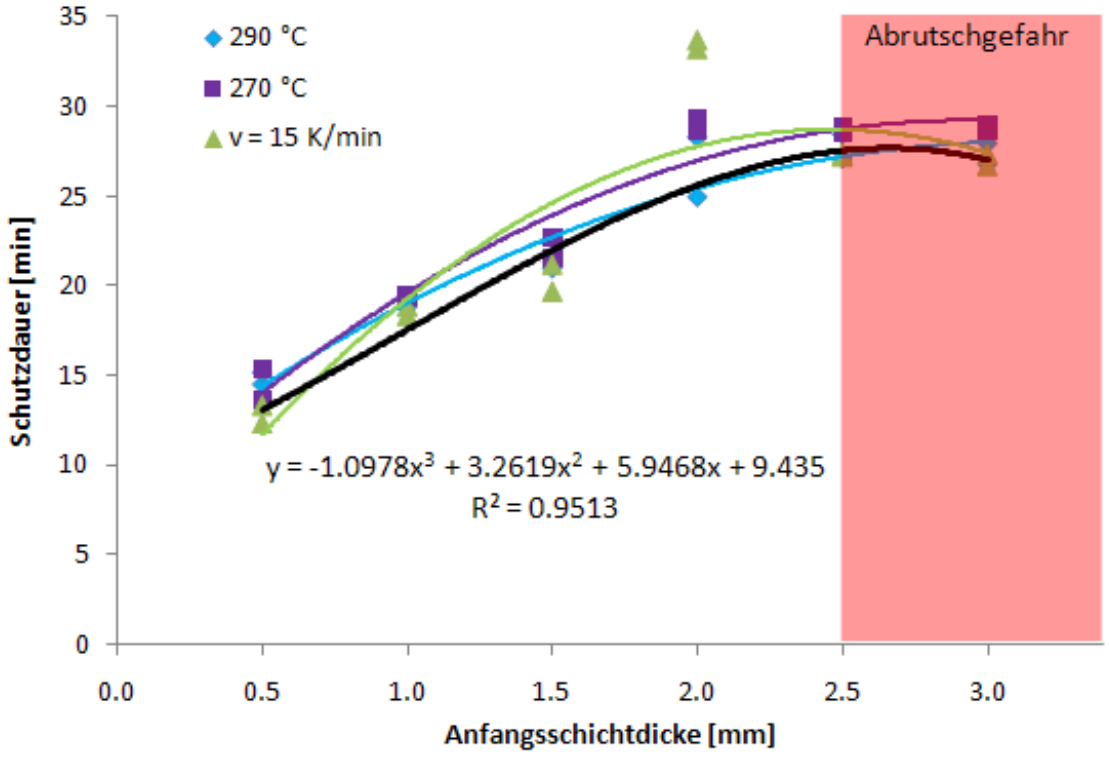


Bild 6 *Versuche im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8; Darstellung der erreichten Schutzdauer in Abhängigkeit von der Anfangsschichtdicke [11]*

GRUNDLAGEN FÜR DIE THERMISCHE ANALYSE

Für die Entwicklung eines Bemessungsverfahrens für Holzbauteile mit HLB, welches nicht ausschließlich auf Versuchen basiert, ist die numerische Simulation der Querschnittstemperaturen erforderlich. Dabei ist ein instationäres Wärmeleitungsproblem zu lösen, welches mathematisch durch die Fouriergleichung beschrieben wird:

$$\frac{\delta}{\delta x}\left(\lambda\frac{\delta T}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(\lambda\frac{\delta T}{\delta y}\right)-\rho c_{\mathrm{p}}\frac{\delta T}{\delta t}=-\dot{q} \tag{4}$$

Vereinfacht gesagt, muss die Differenz aus der durch den Körper hindurch geleiteten Wärme und der gespeicherten Wärme dem von außen einwirkendem Wärmestrom entsprechen. Die zwei linken Terme in Gleichung (4) beschreiben die zweidimensionale Wärmeleitung und sind von dem thermischen Materialkennwert Wärmeleitfähigkeit λ abhängig. Der dritte Term ist der „Speicherterm“ und enthält die thermischen Materialkennwerte spezifische Wärmekapazität c_{p} und Rohdichte ρ. Bei dem vorliegenden Problem Beschichtung auf Holz müssen temperaturabhängige Materialkennwerte für die HLB und langsam erwärmtes Holz formuliert werden. Dafür wird in der Arbeit [11] sowohl auf rein experimentelle Methoden als auch auf Kombinationen von Versuchen und rechnerischen Simulationen zurückgegriffen. Auf die ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle mit dem Verweis auf die Literaturstelle [11] verzichtet.

Die physikalische Schutzwirkung von Dämmschichtbildnern hängt sehr stark von den Brandraumbedingungen und der Ausformulierung des jeweiligen Produktes ab. Ferner besteht ein Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und der Anfangsschichtdicke, sodass letztlich beliebig viele Temperaturfelder beschrieben werden könnten [11]. Für die Erarbeitung eines allgemeingültigen deterministischen Bemessungsmodells ist jedoch eine einheitliche thermische Analyse erforderlich.

Als Ausweg werden nun Beschichtungssysteme mit verschiedenen Schutzdauern $t_{\mathrm{pr,0}}$ standardisiert. Die entsprechenden, allgemeingültigen Temperaturverläufe in der Grenzschicht zwischen Substrat und Beschichtung werden in Bild 7 bei eindimensionalem Wärmeeintrag dargestellt. Für die zugrunde liegenden Modelle bezüglich Anfangsschichtdicke, Schaumfaktor und therm. Materialkennwerte wird auf Literaturstelle [11] verwiesen. Bild 8 dient exemplarisch der Veranschaulichung der thermischen Materialkennwerte für eine Beschichtung mit 30-minütiger Schutzdauer. Da der Intumeszenzprozess indirekt berücksichtigt wird, handelt es sich im unteren Temperaturbereich (bis 200 °C) um Rechenwerte.

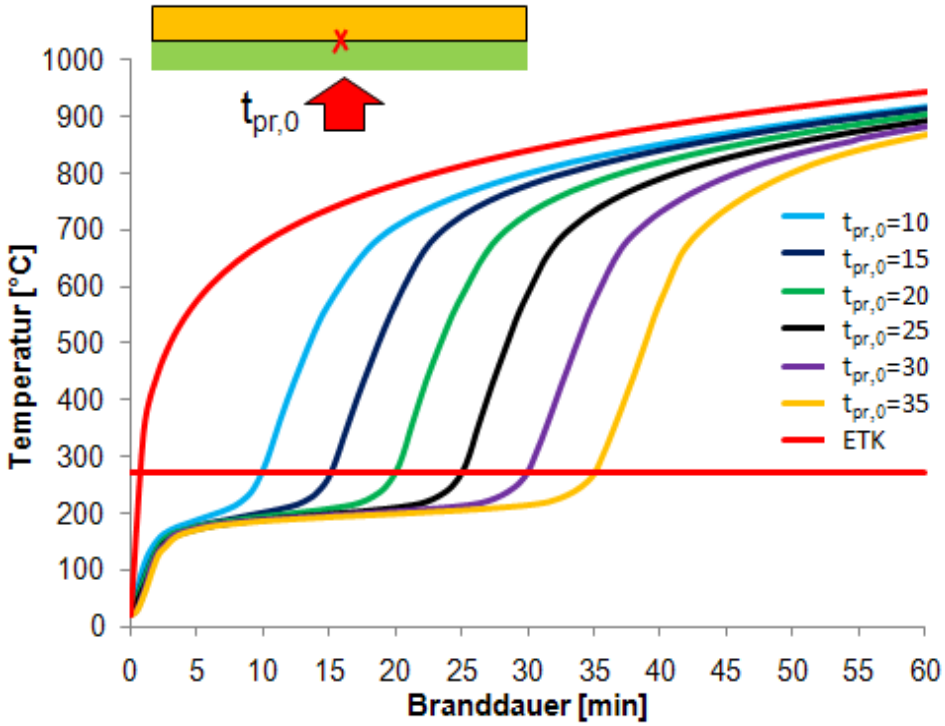


Bild 7 *Standardisiertes Rechenmodell; allgemeingültige Temperaturverläufe in der Grenzschicht zwischen Beschichtung und Substrat bei verschiedenen Schutzstufen*

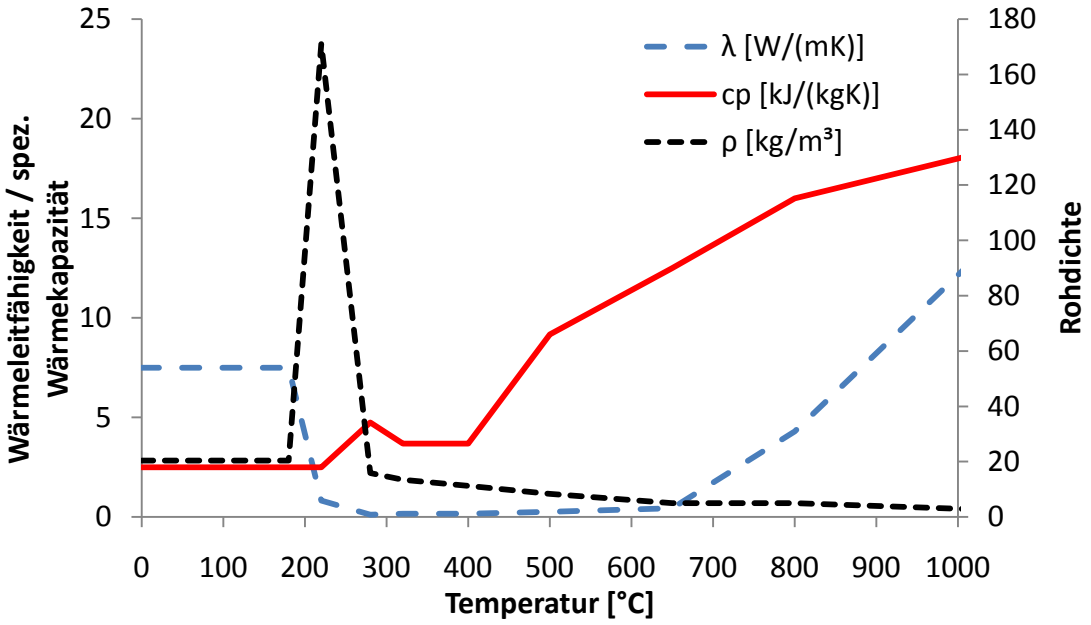


Bild 8 *Standardisierte thermische Materialkennwerte für HLB, Schutzdauer 30 min*

Die Modellparameter sind so eingestellt, dass die Schutzwirkung der Beschichtung auf der Holzoberfläche erst bei einer Temperatur von mindestens 130 °C wirksam wird. Die Schutzdauer entspricht dem Zeitpunkt des Eintretens des 270 °C-Kriteriums. Das zusätzlich eingeführte Prüfkriterium der Aufheizgeschwindigkeit ist nicht allein temperaturabhängig und kann mit dem hier angewendeten einfachen numerischen Modell nicht nachempfunden werden. Dazu wäre ein eigenes Pyrolysemodell für Glutbrände zu entwickeln. Die Annahmen bleiben in Summe dennoch auf der sicheren Seite, da bei den klassifizierenden Bauteilversuchen alle Prüfkriterien Anwendung finden.

Im Zeitraum kurz vor der Entzündung und danach nähern sich die standardisierten Temperaturen sehr schnell der Brandraumtemperatur an. Die entsprechende Festlegung der Modellparameter soll das Abfallen des Schaumes simulieren, welches in Versuchen nach der Entzündung häufig beobachtet wurde. Bei den standardisierten Modellen werden folglich umhüllende Temperaturverläufe erzeugt, die zu einem Bemessungsmodell auf der sicheren Seite führen.

Auf welche Weise bei der Standardisierung das Sicherheitsniveau erreicht wird, soll zusätzlich Bild 9 verdeutlichen. Die dünneren Linien zeigen Temperaturverläufe in den Grenzschichten zwischen Holz und Beschichtung der entsprechenden Bauteilversuche mit einer bestimmten Anfangsschichtdicke. Das untersuchte System wird nunmehr auf der sicheren Seite liegend einer Schutzstufe zugeordnet, welche dann als Eingangswert für das im nachfolgenden Abschnitt beschriebene deterministische Bemessungsmodell dient.

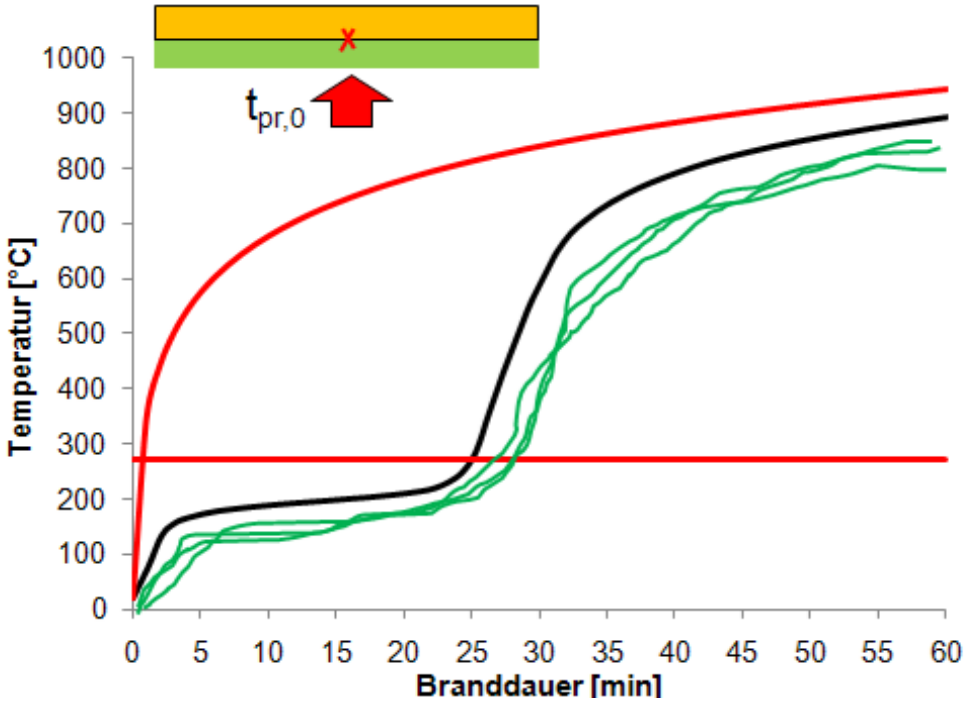


Bild 9 *Gewährleistung des Sicherheitsniveaus durch Klassifizierung des Produktes auf Basis der Zulassungsversuche*

DETERMINISTISCHES BEMESSUNGSMODELL

Das deterministische Bemessungsmodell lässt sich grob in drei Bereiche unterteilen: Bemessung des Entzündungsschutzes, Abbrand nach Verlust der Schutzwirkung und Bemessung des Bauteils auf Basis ideeller Querschnittswerte.

Bemessung des Entzündungsschutzes

Die im vorhergehenden Abschnitt eingeführte Schutzdauer $t_{pr,0}$ bei eindimensionaler Beflammung bildet die Grundlage aller weiteren Bemessungsmodelle. Für stabförmige Bauteile mit Rechteckquerschnitt sind weitere Bemessungsstellen zu definieren, die Seitenmitte eines Querschnitts als Stelle 1 und die Ecke als Stelle 2. Für beide Bemessungsstellen werden entsprechende Schutzdauern $t_{pr,1}$ und $t_{pr,2}$ eingeführt (Bild 10). Um die Schutzdauer $t_{pr,0}$ in $t_{pr,1}$ und $t_{pr,2}$ überführen zu können, wird ein Umrechnungsfaktor benötigt. In Anlehnung an die Nomenklatur von Eurocode EC5-1-2 [21] wird dieser mit $k_{mod.fi,U/A,i}$ bezeichnet (5). Die Anzahl der Stellen i ist hierbei nicht auf 2 begrenzt, im weiteren Verlauf werden jedoch keine weiteren polygonalen Querschnitte, z. B. mit Innenecken oder stumpfen bzw. spitzen Winkeln, behandelt.

$$t_{pr,i} = t_{pr,0} \cdot k_{mod,fi,U/A,i} \tag{5}$$

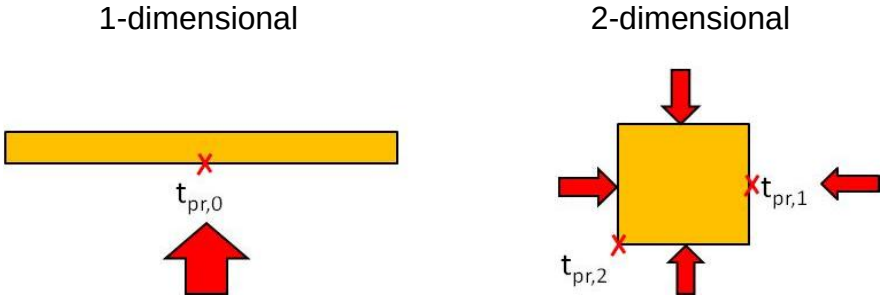


Bild 10 Definition der verschiedenen Zündzeitpunkte bei unterschiedlicher Beflammung

Auf Basis der standardisierten thermischen Materialeigenschaften des vorhergehenden Abschnitts wurden Parameterstudien durchgeführt, um den Faktor $k_{mod,fi,U/A}$ in Abhängigkeit von der eindimensionalen Schutzdauer $t_{pr,0}$ und dem U/A-Wert bestimmen zu können. Der U/A-Wert beschreibt dabei den allgemein bekannten Profilfaktor als Quotienten des beflammten Umfangs U zur Querschnittsfläche A. In Bild 11 wird exemplarisch die Interpolationsfläche für die Stelle 1 mit dem Umrechnungsfaktor $k_{mod,fi,U/A,1}$ dargestellt.

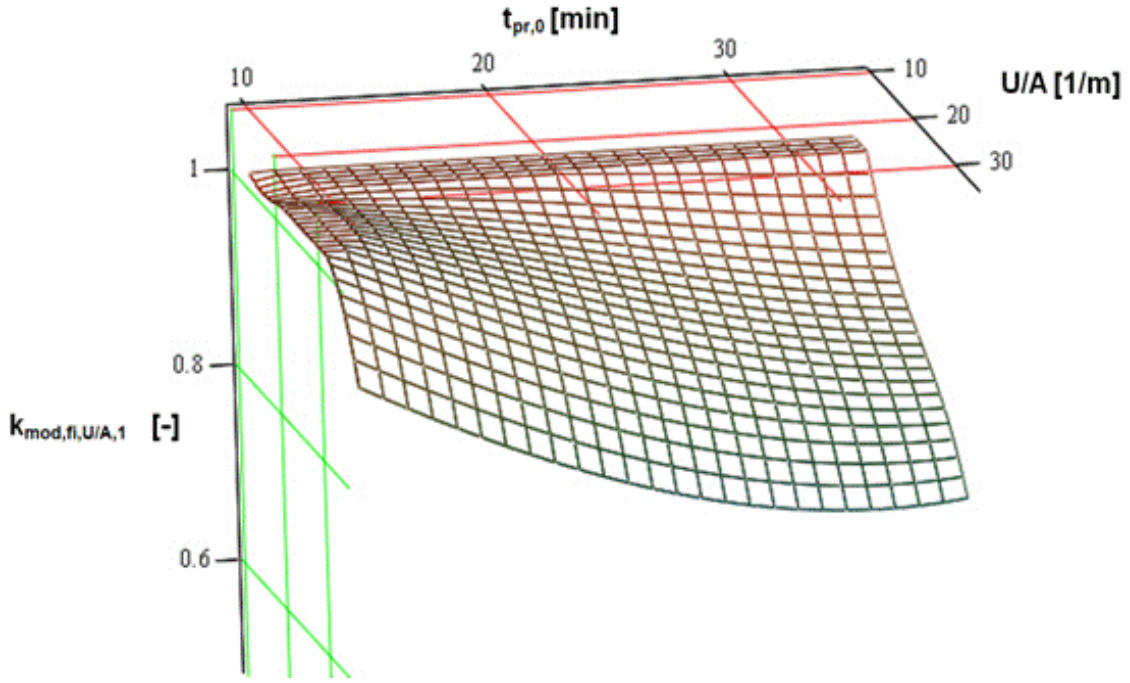


Bild 11 Bemessungsstelle 1: Umrechnungsfaktor $k_{mod,fi,U/A,1}$ in Abhängigkeit von der Schutzdauer $t_{pr,0}$ und dem U/A-Wert des Anfangsquerschnittes

Die Werte für $k_{mod,fi,U/A,1}$ sinken mit steigendem U/A-Wert erwartungsgemäß deutlich ab. Denn je größer der U/A-Wert ist, umso weniger Speichervolumen für die eingetragene Wärmeenergie steht zur Verfügung. Die Temperaturen im Querschnitt steigen schneller an, was wiederum zu einer früheren Entzündung führt. $k_{mod,fi,U/A,1}$ sinkt jedoch auch mit steigender Schutzdauer $t_{pr,0}$. Dieses lässt sich über den Einfluss des Eckabbrandes erklären. In einem Versuch wurde gezeigt dass die Schutzdauer an der Ecke nur rund 50 % jener des eindimensionalen Referenzszenarios entspricht [7]. Mit steigender Schutzdauer steigt demnach auch die absolute Zeit, in der der Brand von der Ecke bis zum Mittelpunkt der Seitenfläche ausstrahlt und dort zu einer stärkeren Erwärmung führt. Je kürzer die Seitenlängen des Querschnittes sind, umso heftiger schlägt der beschriebene Effekt durch.

Für die Stelle 2 (an der Ecke) wird in [11] als konservative Annahme der Rechenwert $k_{mod,fi,U/A,1}$= 0,45 vorgeschlagen.

Abbrandrate nach Verlust des Entzündungsschutzes

Das deterministische Bemessungsmodell für beschichtete Bauteile orientiert sich an dem Verfahren mit reduziertem Restquerschnitt bzw. ideellen Querschnittswerten des Eurocode EC5-1-2 [21].

Die ideellen Querschnittswerte werden durch Reduktion des Ausgangsquerschnittes um die effektive Abbrandtiefe d_{ef} ermittelt (Bild 14 rechts). Die

effektive Abbrandtiefe setzt sich zusammen aus der realen Abbrandtiefe d_{char} und der ideellen Abbrandtiefe d_0:

$$d_{ef} = d_{char} + d_0 \tag{6}$$

Im Folgenden wird immer davon ausgegangen, dass d_{char} an der Stelle 1 in Anlehnung an Bild 10 gemessen wird, also am Mittelpunkt der Seitenfläche.

Im normierten Standardfall unbeschichteter Holzoberflächen ist die reale Abbrandtiefe das Produkt aus der Branddauer nach dem Entzünden t_{char} und der eindimensionalen Abbrandrate β_0:

$$d_{char} = t_{char} \cdot \beta_0 \tag{7}$$

In EC5-1-2 [21] wird für übliches Vollholz und Brettschichtholz ein Wert $\beta_0 = 0{,}65$ mm/min angegeben. Neben der eindimensionalen Abbrandrate gibt die Norm auch Werte für nominelle Abbrandraten β_n an. Diese höheren Werte sollen Effekte aus Eckausrundungen und Risse im Querschnitt berücksichtigen. Im vorliegenden Modell wird der Eckeinfluss durch die ideelle Abbrandtiefe d_0 unter Ansatz des realen Abbrandes mit der eindimensionalen Abbrandtiefe β_0 berücksichtigt. Da aufgrund der Vorwärmung nach dem Verlust der Schutzwirkung ein beschleunigter Abbrand einsetzt, muss β_0 durch einen Vorfaktor an die jeweiligen Randbedingungen angepasst werden.

Auf Basis der Parameterstudien wurde in [11] ein bilineares Modell entwickelt (Bild 12). Die Regressionsanalysen der berechneten Temperaturfelder führen zu einer geeigneten Darstellung, wenn der erste Teil des bilinearen Ansatzes jeweils für eine Dauer von 15 Minuten angesetzt wird. Die Abbrandraten der beiden Äste β_1 und β_2 ergeben sich durch Multiplikation der eindimensionalen Abbrandrate $\beta_0 = 0{,}65$ mm/min mit den Faktoren κ_1 und κ_2:

$$\beta_1 = \kappa_1 \cdot \beta_0 \tag{8}$$

$$\beta_2 = \kappa_2 \cdot \beta_0 \tag{9}$$

Die reale Abbrandtiefe d_{char} ergibt sich dann mit den Zeitintervallen Δt_1 und Δt_2 für den jeweiligen Abschnitt zu:

$$d_{char} = \Delta t_1 \cdot \kappa_1 \cdot \beta_0 + \Delta t_2 \cdot \kappa_2 \cdot \beta_0 \tag{10}$$

Die in der Parameterstudie erzeugten Temperaturfelder wurden auf die Abbranddraten β_1 und β_2 hin untersucht. Dazu wurde zunächst für verschiedene Querschnitte und eindimensionale Schutzdauern $t_{pr,0}$ ein bilineares Modell durch lineare Regression erstellt. Die so ermittelten Werte für κ_1 und κ_2 wurden dann wiederum einer multivariablen Regressionsanalyse unterzogen. Ergebnis ist schlussendlich die Darstellung von κ_1 und κ_2 in Abhängigkeit vom U/A-Wert des Anfangsquerschnittes und von der eindimensionalen Schutzdauer $t_{pr,0}$ der HLB.

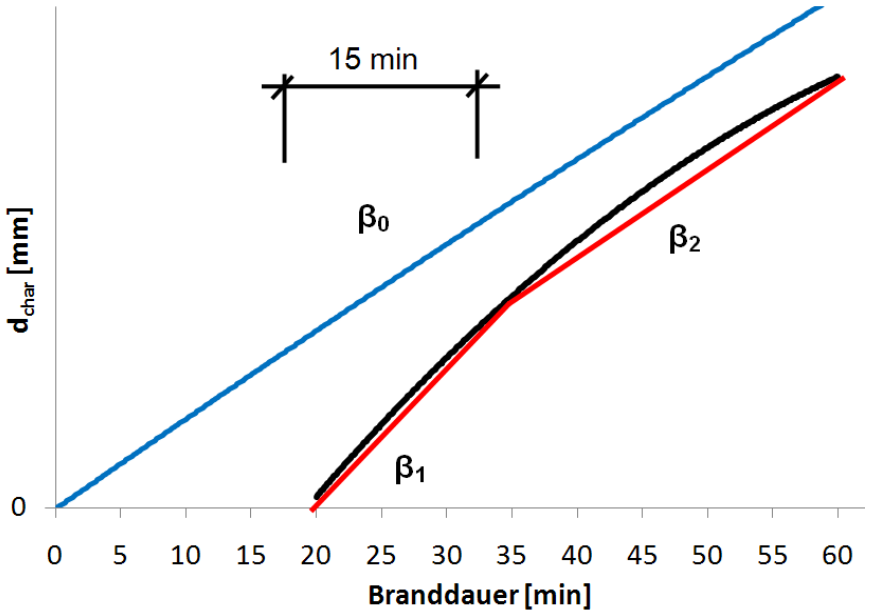


Bild 12 *Bilinearer Ansatz zur Approximation des realen Verlaufs der Abbrandtiefe d_{char}*

In diesem Beitrag wird exemplarisch die Interpolationsfläche für κ_1 gezeigt (Bild 13). Erwartungsgemäß steigt κ_1 mit dem U/A-Wert und Schutzdauer $t_{pr,0}$ stark an. Dieses ist auf der einen Seite darauf zurückzuführen, dass Querschnitte mit geringerer Massigkeit grundsätzlich stärker durchwärmt werden und auf der anderen Seite führt eine höhere Schutzdauer zu einem höheren Energieniveau (Vorwärmung) im Holz. Dieses erhöhte Energieniveau entsteht durch die langsam, aber sehr tief vordringende thermische Welle. Insgesamt entlädt sich die Vorwärmung durch eine hohe Abbrandrate nach Verlust des Entzündungsschutzes. Eine Schutzwirkung durch den Schaum findet nicht mehr statt, da dieser entsprechend der Modellannahmen unmittelbar nach dem Entzünden des Holzes abfällt.

Die Interpolationsfläche für κ_2 ist qualitativ vergleichbar, jedoch sind die Werte erwartungsgemäß im Mittel niedriger. Für die bildliche Darstellung von κ_2 und die mathematischen Formulierungen der Interpolationsflächen wird auf [11] verwiesen.

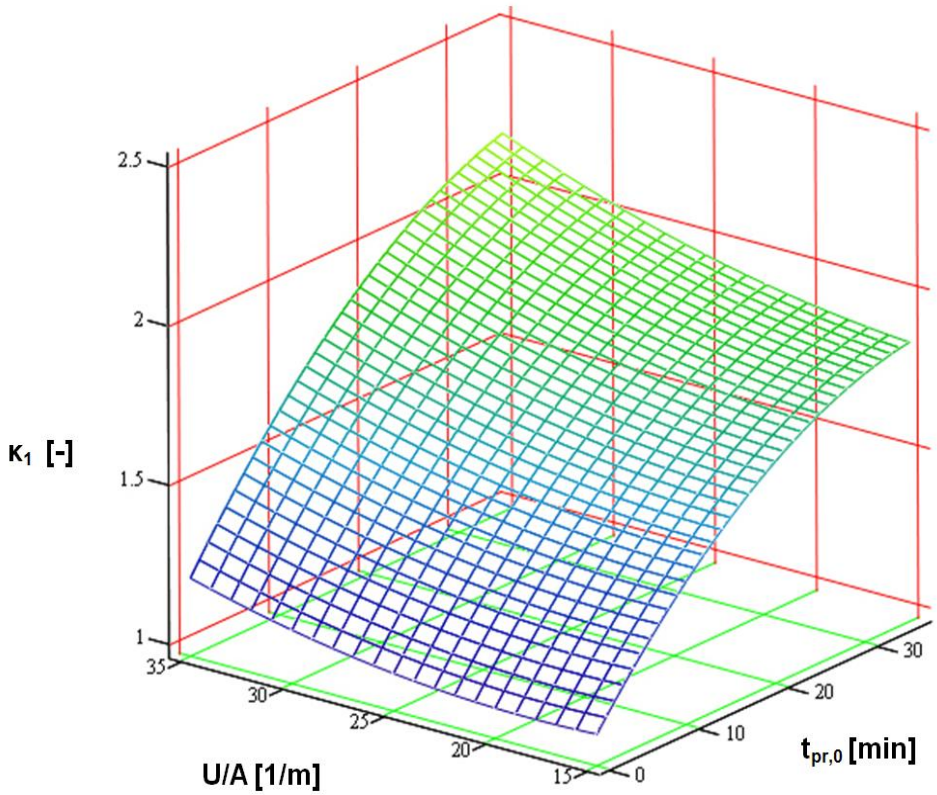


Bild 13 *Umrechnungsfaktor κ_1 in Abhängigkeit von der Schutzdauer $t_{pr,0}$ und dem U/A-Wert des Anfangsquerschnittes*

Bemessung der Tragfähigkeit mittels ideeller Querschnittswerte

In [22] wird erläutert, wie das im Eurocode EC5-1-2 [21] konstante Maß d_0 = 7 mm hergeleitet wird. Annahme ist eine zeitlich konstante Breite des Temperaturgradienten von der Abbrandgrenze bis zu unwesentlich erwärmten Bereichen (50° C) von 25 mm. Bei einer mittleren Temperatur im Gradienten von 70 °C und der Übernahme der temperaturabhängigen Festigkeitseigenschaften von [23] darf der Gradient nur mit einer Restbreite von 18 mm angerechnet werden. Folglich beträgt die ideelle Abbrandtiefe d_0 = 7 mm.

Bei beschichteten Bauteilen kann wegen der langen Vorwärmungsphase nicht angenommen werden, dass der Gradient über die Branddauer konstant ist. Weiterhin ist es der mechanischen Präzision wegen nicht sinnvoll, den Wert für d_0 nur über die anrechenbare Fläche des Gradienten zu bestimmen. Vielmehr sollten ebenfalls die Auswirkungen auf das Flächenträgheitsmoment 2. Ordnung berücksichtigt werden, damit das Verfahren für Biege- und Stabilitätsversagen genauere Ergebnisse liefert.

In der mechanischen Analyse wird die Elementierung der thermischen Analyse übernommen (Bild 14). Den Elementen werden die temperaturabhängigen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften zugeordnet, woraus dann die effektiven Flächenwerte A_{ef} und $I_{y,ef}$ des Gesamtquerschnitts berechnet werden. Die

Beiwerte zur Beschreibung der temperaturabhängigen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften k_θ werden der Literatur entnommen und sind in [11] angegeben.

$$A_{ef} = 4 \cdot \sum_{i=1}^{m \cdot n} k_{\theta,i} \cdot A_i \tag{11}$$

$$I_{y,ef} = 4 \cdot \sum_{i=1}^{m \cdot n} k_\theta \cdot I_{y,i} + k_\theta \cdot z_i^2 \cdot A_i \tag{12}$$

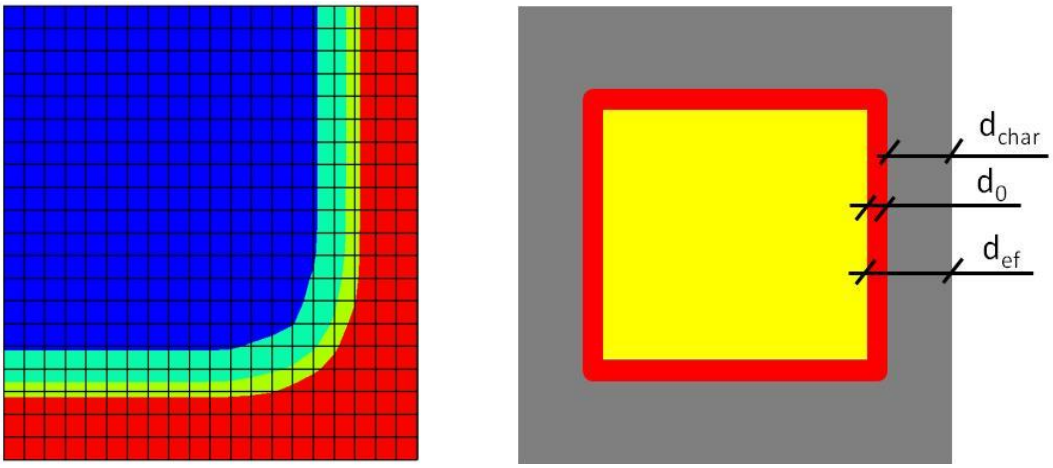


Bild 14 *Verknüpfung thermischer und mechanischer Analyse; links: Elementierung eines Querschnittsviertels entsprechend der thermischen Analyse; rechts: ideeller Restquerschnitt mit eindimensionaler Abbrandtiefe d_{char}, ideelle Abbrandtiefe d_0 und effektive Abbrandtiefe d_{ef}*

Aus der Forderung, dass die ideellen Flächenwerte A_{id} und $I_{y,id}$ den effektiven Flächenwerten entsprechen, kann die ideelle Abbrandtiefe d_0 mittels Zielwertsuche bestimmt werden:

$$A_{ef} = (h - 2d_{char} - 2d_0) \cdot (b - 2d_{char} - 2d_0) = A_{id} \tag{13}$$

$$I_{y,ef} = (b - 2d_{char} - 2d_0) \cdot (h - 2d_{char} - 2d_0)^3 / 12 = I_{y,id} \tag{14}$$

In [11] wurden für den jeweiligen Flächenwert 6 Modelle für d_0 entwickelt. Diese unterscheiden sich in den mechanischen Widerstandsgrößen: Biegefestigkeit/-steifigkeit, Druckfestigkeit/-steifigkeit und Zugfestigkeit/-steifigkeit. Die umfangreichen Kurvenverläufe wurden für jede Widerstandsgröße in ein trilineares Modell überführt, welches den exakten Verlauf entweder auf der sicheren Seite liegend umhüllt oder nur ganz unwesentlich auf der unsicheren Seite liegt (Bild 15). Der in Bild 15 dargestellte ansteigende Ast stellt den Verlauf von d_0 für die Dauer bis zum Entzünden des Querschnittes an der Stelle 1 zum Zeitpunkt t_1 dar, es gilt $t_1 = t_{pr,1}$. Der zweite Ast, welcher sowohl einen negativen als auch einen positiven Gradienten aufweisen kann wird durch den Zeitpunkt t_2 begrenzt, welcher für alle Modelle einheitlich der 50. Minute entspricht.

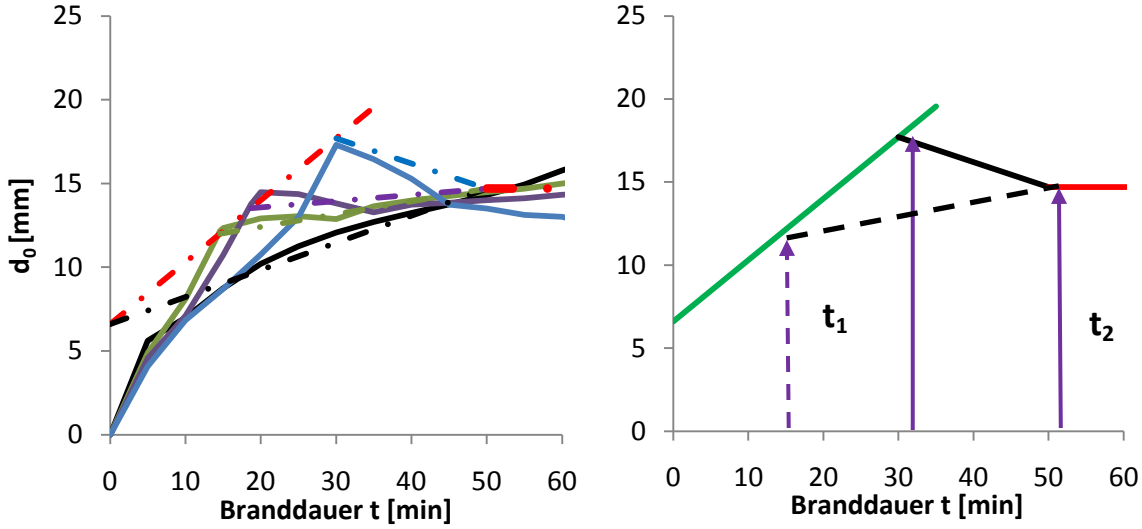


Bild 15 Ideelle Abbrandtiefe d_0, Annäherung mit trilinearen Modell

Physikalisch lässt sich das Modell für d_0 auch über den Zusammenhang zwischen der in den Querschnitt eindringenden thermischen Welle und dem Verlauf der Abbrandgrenze erklären. Zunächst wird der Querschnitt erwärmt, die Abbrandgrenze dringt jedoch bis zum Versagen des Beschichtungssystems noch nicht in den Querschnitt ein. Die Fläche des Temperaturgradienten wird immer größer und folglich muss auch die ideelle Abbrandtiefe d_0 anwachsen. Nach dem Versagen der Beschichtung setzt ein beschleunigter Abbrand ein. Die Abbrandgeschwindigkeit ist dabei zunächst schneller als die thermische Welle, die in die tieferen Regionen des Querschnittes eindringt und damit wird d_0 wieder kleiner. Nach einer gewissen Zeit nimmt die Änderung der Fläche des Temperaturgradienten ab und d_0 strebt einen konstanten Wert an. Es stellen sich Verhältnisse wie bei einem anfänglich ungeschützten Querschnitt ein.

SICHERHEITSKONZEPT

Den grundlegenden Anforderungen des Eurocode EC0 [24] folgend, sind Gebäude derartig zu planen und zu erstellen, dass sie während der Nutzungsdauer mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit den äußeren Einwirkungen standhalten. Hierzu zählt ebenfalls die Einwirkung Brand, der das Tragwerk mit einer ausreichenden Feuerwiderstandsdauer zu begegnen hat.

Für die Weiterentwicklung der Eurocodes empfiehlt EC0 [24], auf probabilistische Methoden zurückzugreifen. Beispielsweise in [25] wird ein Sicherheitskonzept für die Brandschutzbemessung von Bauteilen unter Naturbrandeinwirkung auf Basis derartiger probabilistischer Methoden erarbeitet, welches in das nationale Anwendungsdokument zu Eurocode EC1-1-2/NA [26] übernommen worden ist.

Die Betrachtung der Zuverlässigkeit durch HLB geschützter Holzbauteile erfolgt in [11] in Anlehnung an den Forschungsbericht [25]. Hierzu werden zunächst die Anforderungsniveaus der Zuverlässigkeit und die stochastischen Modelle auf Widerstands- und Einwirkungsseite beschrieben. Danach werden Untersuchungen an ausgewählten Bauteilen durchgeführt, die letztlich in einen Vorschlag für ein Sicherheitsformat münden.

Neben dem Sicherheitskonzept für die Tragfähigkeit wird in [11] ebenfalls gezeigt, inwiefern die HLB in der Lage ist, das Sicherheitsniveau bezüglich der Personenrettung bei Ersatz nichtbrennbarer Deckenbekleidungen durch beschichtete Holzoberflächen zu erhalten. In diesem Beitrag wird jedoch im weiteren Verlauf ausschließlich das Sicherheitsformat für die Tragfähigkeit erläutert.

Da entsprechend dem Sicherheitskonzept des Eurocodes für Holzbauteile im Brandfall die 20 %-Fraktilen der Festigkeiten und Steifigkeiten mit $\gamma_{M,fi}$ =1,0 belegt werden und auch die Abbrandrate als unveränderlicher Nennwert gegeben ist, kann nur der Bemessungswert der Schutzdauer der HLB durch den Teilsicherheitsbeiwert eingestellt werden. Mathematisch wäre es sinnvoller, die Abbrandrate nicht als Nennwert, sondern durch einen entsprechenden Bemessungswert zu berücksichtigen, da der Einfluss auf die Zuverlässigkeit vergleichsweise groß ist [11]. Um eine weiterhin konsequente Bemessungspraxis zu ermöglichen, wird hierauf jedoch verzichtet.

Die Wirkung der Beschichtung kann durch die Definition eines Bemessungswertes der Schutzdauer $t_{pr,0,d}$, durch einen Bemessungswert der Anfangsschichtdicke $l_{0,d}$ oder durch eine Kombination von beiden eingestellt werden.

Da der Einfluss von l_0 im Vergleich zur Schutzdauer sehr gering ist, wird der Bemessungswert $l_{0,d}$ innerhalb des Sicherheitsformats durchgehend mit dem Mittelwert gleichgesetzt.

Der Bemessungswert der eindimensionalen Schutzdauer $t_{pr,0,d}$ wird gemäß Gleichung (15) bestimmt. Der charakteristische Wert $t_{pr0,k}$ ist der Mittelwert aus den Ergebnissen der Bauteilversuche. Brandversuche unterliegen ausgeprägten Maßstabseffekten. So sind Kleinbrandversuche im Kleinbrandofen nach DIN 4102-8 sicherlich nicht konservativ. Da es aber aus praktischen Überlegungen nicht sinnvoll ist, sämtliche Eingangsdaten für das Bemessungsverfahren in Großversuchen zu ermitteln, wird der Korrekturfaktor $k_{sc,fi}$ (engl.: scale) eingeführt, der die Werte für $t_{pr,0,k}$ aus den Kleinversuchen an die zu erwartenden Schutzdauern im Großversuch anpasst.

Die Leistungsfähigkeit der Beschichtung nimmt ggf. durch Alterungsprozesse ab. Im Bemessungskonzept wird diese Abnahme durch den Faktor $k_{dur,fi}$ (engl.: durability) berücksichtigt.

$$t_{pr,0,d} = k_{dur,fi} \cdot k_{sc,fi} \cdot 1/\gamma_{M,fi} \cdot t_{pr,0,k} \tag{15}$$

Die aktuelle Normengeneration des konstruktiven Ingenieurbaus verfolgt ein semi-probabilistisches Sicherheitskonzept mit konstanten Teilsicherheitsbei-

werten. Diese Vorgehensweise wird jedoch zugunsten einer präziseren Formulierung der Teilsicherheitsbeiwerte nicht verfolgt, um einen möglichst wirtschaftlichen Einsatz der HLB zu ermöglichen.

Allgemein zeigt sich bei den Analysen eine höhere Zuverlässigkeit bei den R 30-Bauteilen gegenüber den R 60-Bauteilen – sowohl bei Querschnitts- als auch bei Stabilitätsversagen. Weiterhin nimmt die Zuverlässigkeit deutlich erkennbar mit steigendem U/A-Wert ab. Bei der Unterscheidung zwischen Querschnitts- und Stabilitätsversagen ist das Zuverlässigkeitsniveau stabilitätsgefährdeter Bauteile tendenziell geringer. Die maximale Schutzdauer führt ebenfalls zu einer geringeren Zuverlässigkeit, da jegliche Streuung der Anfangsschichtdicke l_0 zu einer verminderten Schutzwirkung führt (Extremstelle in der Regressionsgleichung von Bild 6). Der zu definierende nicht- konstante Teilsicherheitsbeiwert ist in logischer Konsequenz von der Branddauer, der Versagensart, dem U/A-Wert und der Schutzdauer abhängig.

Es wird vorgeschlagen, den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,fi}$ für die Schutzdauer aus dem Produkt eines Sicherheitsbeiwertes $\gamma_{M,UA}$ zur Berücksichtigung des U/A-Wertes und eines Sicherheitsbeiwertes $\gamma_{M,tpr}$ zur Berücksichtigung der Schutzdauer zu bilden:

$$\gamma_{M,fi} = \gamma_{M,UA} \cdot \gamma_{M,tpr} \tag{16}$$

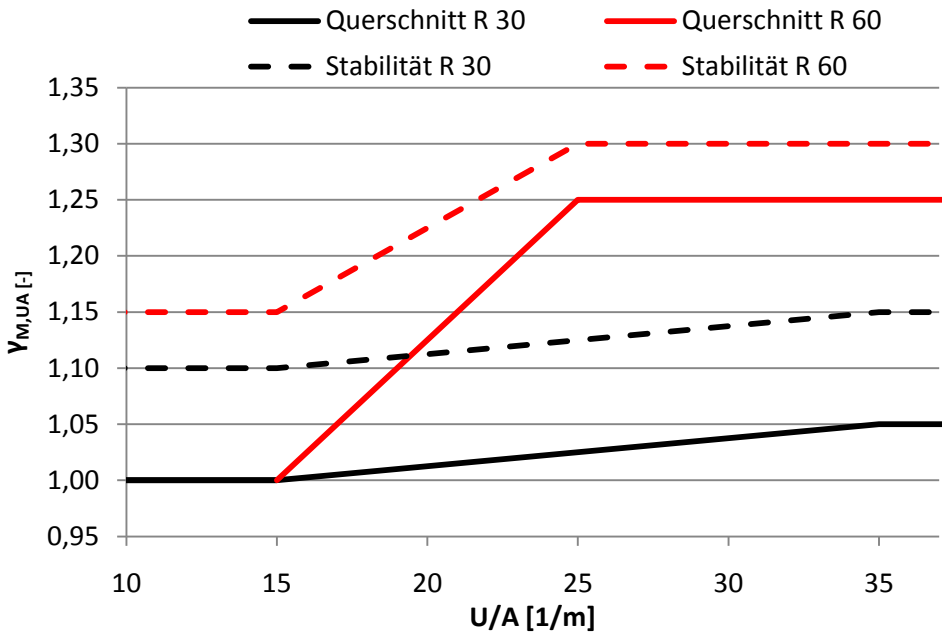


Bild 16 *Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,UA}$ in Abhängigkeit von: U/A-Wert, Feuerwiderstandsdauer und Versagensart*

Bild 16 zeigt den Sicherheitsbeiwert $\gamma_{M,UA}$, der als trilineare Funktion formuliert wird. Die Definitionen unterscheiden sich dabei nach Branddauer und Versagensart. Die U/A-Werte der Knickstellen sind auf die zu erwartenden Querschnittsabmessungen der jeweiligen Feuerwiderstandsdauer abgestimmt.

Die Formulierung des Sicherheitsbeiwertes $\gamma_{M,tpr}$ ist in Bild 17 wiedergegeben. Bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen wird konstant mit $\gamma_{M,tpr}$=1,1 gerechnet. Bei Querschnittsversagen bis zur charakteristischen Schutzdauer $t_{pr,0,k}$=20 Minuten mit $\gamma_{M,tpr}$=1,0. Im weiteren Verlauf erfolgt dann eine lineare Steigerung bis $\gamma_{M,tpr}$=1,1, wobei dieser Wert der maximalen Schutzdauer der HLB zugrunde gelegt wird und somit systemabhängig ist.

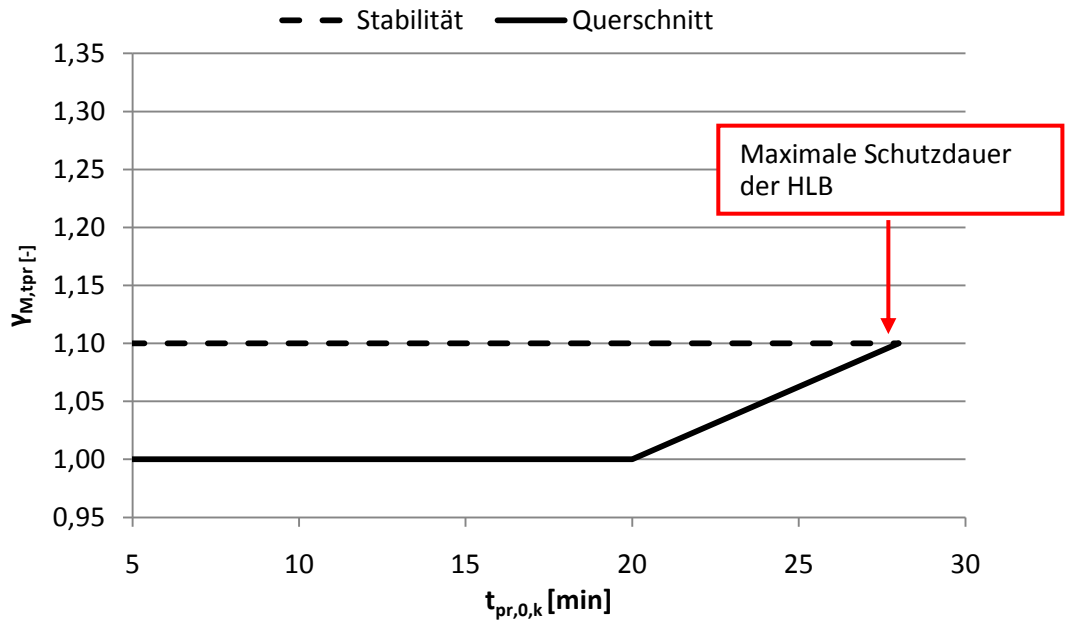


Bild 17 *Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M,tpr}$ in Abhängigkeit von der charakteristischen, eindimensionalen Schutzdauer $t_{pr,0,k}$ und der Versagensart*

BEISPIEL PENDELSTÜTZE

Der Einfluss der HLB auf die Traglastentwicklung von Bauteilen wird im Folgenden anhand von Stützen verdeutlicht.

Die in Bild 18 dargestellten bezogenen Traglastverläufe gehören zu Pendelstützen mit Querschnitten 14/14 und 22/22 [cm²] mit U/A-Werten von 28,6 bzw. 18,2 1/m. Der Schlankheitsgrad in der 0. Brandminute λ_0 beträgt bei beiden Stützen 75. Die auf die Anfangshöhe bezogene Ausmitte der Normalkraft e/h_0 wird zu 0 gewählt. Die horizontalen gestrichelten Linien in den Diagrammen markieren das in praktischen Anwendungen zu erwartende Lastniveau.

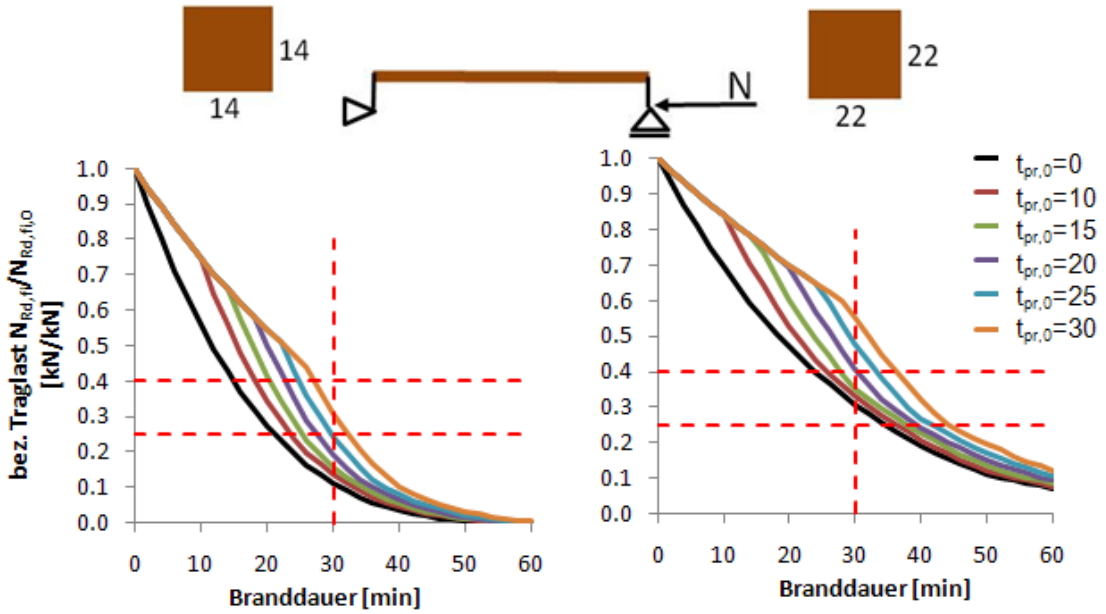


Bild 18 *Anwendung der HLB auf Pendelstützen; Querschnitte 14/14 und 22/22 [cm²], Schlankheitsgrad λ_0=75 , Ausmitte $e/h_0 = 0$*

Die Stütze mit dem weniger massigen Querschnitt 14/14 [cm²] verliert mit fortschreitender Branddauer rapide an Tragfähigkeit. Auch die Anwendung der HLB ermöglicht die Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten nur für mittlere Ausnutzungsgrade. Die Stütze mit dem deutlich massigeren Querschnitt 22/22 erreicht bereits ohne Schutzsystem bei geringer Lastausnutzung eine Branddauer von 30 Minuten und kann mithilfe der HLB sogar für solch hohe Lastausnutzungen ausgerüstet werden, dass diese aufgrund der Kaltbemessung nicht aktiviert werden können. Die Branddauer von 60 Minuten bleibt jedoch auch mit der HLB gänzlich unerreichbar, da nach dem Verlust der Schutzwirkung der Entzündungsschutz durch die anfänglich erhöhte Abbrandrate wieder zunichte gemacht wird.

Weitere Bauteilbemessungen und entsprechende Schlussfolgerungen für die allgemeine Anwendung werden in [11] gegeben. Im Wesentlichen zeigt sich, dass die HLB insbesondere für die Ausrüstung filigraner Bauteile hinsichtlich der Feuerwiderstandsklasse R 30 geeignet ist. R 60-Konstruktionen sind nur dann realisierbar, wenn der Feuerwiderstand nur noch geringfügig gegenüber der ungeschützten Konstruktion gesteigert werden muss.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Beitrag verschafft einen Überblick über die Bemessung von Holzbauteilen, die durch Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen geschützt werden. Dabei ist es möglich, das allgemein anerkannte Sicherheitsniveau sowohl hinsichtlich des Entzündungsschutzes als der Tragfähigkeit zu gewährleisten. Obwohl die Beschichtung selbst ein organischer Baustoff ist, gelingt der Ersatz

der nichtbrennbaren brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung unter Einhaltung der Schutzziele des baulichen Brandschutzes. Das Bemessungskonzept ist derartig aufgebaut bzw. standardisiert, dass es auch auf andere, am Markt erhältliche Produkte übertragbar sein wird.

Im jetzigen Forschungsstadium ist es möglich, auf Basis von Pilotanwendungen praktische Erfahrungen bei der Materialprüfung, Qualitätsüberwachung und Anwendung im Bauwerk zu sammeln, die dann wiederum in den Zulassungsprozess einfließen müssen. Um das Bemessungskonzept weiter zu vervollständigen, sind insbesondere noch Modelle für Dauerhaftigkeitsprognose zu entwickeln.

LITERATUR

[1] Glos, P.: Holz – Potenziale des nachhaltigen Baustoffes. Informationsdienst Holz, 2008.

[2] Argebau: Musterbauordnung (MBO); Fassung November 2002, letzte Änderung 2008.

[3] Argebau: Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (Muster-HolzbauRichtlinie M-HFHHolzR); Fassung Juli 2004.

[4] Hosser, D.; Becker, K.; Wesche, J.; Dehne, M.; Tichelmann, K.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 in Holzbauweise; Abschlussbericht. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Braunschweig; Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau (VHT), Heusenstamm, März 2001.

[5] Kampmeier, B.: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau. Dissertation, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), 2008.

[6] Hosser, D. et al: Brandverhalten von massiven Holzbauteilen und Fassade-elementen mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtung“. Abschlussbericht; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) TU Braunschweig; Fraunhofer Wilhelm Klauditz Institut für Holzforschung (WKI), Braunschweig; Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), 2005.

[7] Hosser, D.; Marutzky, M.; Hollmann, D.; Kruse, D.; Gettwert, V. et al: Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen und Entwicklung überprüfbarer Beurteilungskriterien. Abschlussbericht; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) TU Braunschweig; Fraunhofer Wilhelm Klauditz Institut für Holzforschung (WKI), Braunschweig; Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), 2009.

[8] Simon, S.: Untersuchungen zur systematischen Entwicklung von intumeszierenden Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen. Dissertation TU Braunschweig, Fraunhofer IRB Verlag, 2006

[9] Kruse, D.: Entwicklung von Hochleistungsbrandschutzsystemen zum Entzündungsschutz von Holz unter Vollbrandbedingungen. Dissertation TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Heft 212, 2010

[10] DIN 4102-2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 2: Bauteile, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; September 1977.

[11] Hollmann, D.: Grundlagen und Ingenieurmodell für den Nachweis von Holzbauteilen mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen. Dissertation TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Heft 215, 2011.

[12] DIN EN 13501-1:Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Januar 2010.

[13] Becker, K.; Hosser, D.; u. a.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz mehrgeschossiger Gebäude in Holzbauweise; Stufe 1: Theoretische Grundlagenuntersuchungen. DGfH-Forschungsvorhaben; 1997.

[14] Hollmann, D.: Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen für Holzbauteile. In: Hosser, D. (Hrsg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage ´09, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 208, Braunschweig 2009.

[15] DIN 18230-3 Baulicher Brandschutz im Industriebau – Teil 3: Rechenwerte; August 2002.

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

[17] McCaffrey, B.J.; Quintiere, J.G.; Harkleroad, M.F.: Estimating Room Tempera-tures and the Likehood of Flashover Using Fire Test Data Correlations. Center for Fire Research, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, 1981.

[18] Delichatsios, M.A.; Lee, Y.-P.; Tofilo, P.: A new corelation for gas temperature inside a burning enclosure. Fire Safety Journal, Vol. 44, 2009.

[19] DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2007 +A1:2009; Februar 2010.

[20] DIN EN 14135: Brandschutzbekleidungen - Bestimmung der Brandschutzwirkung; Deutsche Fassung EN 14135:2004; November 2004.

[21] DIN EN 1995-1-2 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009; Dezember 2010.

[22] Frangi, A.: Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken. Dissertation an der ETH Zürich, September 2001.

[23] Glos, P.; Henrici, D.: Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen. Abschlussbericht 87505; Institut für Holzforschung der Universität München, 1990.

[24] DIN EN 1990: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010; Dezember 2010.

[25] Hosser, D.; Albrecht, C.; Klinzmann, C.; Mahlmann, C.; Weilert, A.: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2. Abschlussbericht zum DIBT-Forschungsvorhaben ZP 52-5-4.168-1239/07. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 2008.

[26] DIN EN 1991-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010.

GRUNDLAGEN FÜR DIE BRANDSCHUTZBEMESSUNG VON BAUTEILEN AUS ULTRAHOCHFESTEM BETON

Björn Kampmeier und Dirk Hollmann
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

EINLEITUNG

Der Wunsch von Architekten und Ingenieuren nach immer imposanteren und höheren Gebäuden, deren Strukturen zugleich immer schlanker werden sollen erfordert die Entwicklung neuer Materialien, die diese Anforderungen erfüllen können. Ein aktuelles Ergebnis dieser Bestrebungen ist die Entwicklung von ultrahochfestem Beton (UHPC).

Betone werden nach ihrer Festigkeit in Normalbeton, hochfesten Beton und ultrahochfesten Beton unterschieden. Als Normalbeton wird nach DIN EN 206-1 [1] ein Beton verstanden, der einer der Festigkeitsklassen zwischen C8/10 bis C50/60 entspricht. Als hochfest gelten Betone, wenn Sie höhere Festigkeiten erreichen bis zur höchsten in DIN EN 206-1 definierten Festigkeitsklasse C100/115. Als ultrahochfest werden schließlich Betone bezeichnet, die Druckfestigkeiten oberhalb der in DIN EN 206-1 definierten Festigkeitsklassen erreichen. Sie fallen dann nicht mehr in den durch eingeführte Normen abgedeckten Festigkeitsbereich und benötigen für ihre Anwendung eine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall. Im Allgemeinen werden bei UHPC Festigkeiten von mehr als 150 N/mm² erzielt, Werte > 200 N/mm² sind ebenfalls möglich.

In dem aktuell laufendem Schwerpunktprogramm 1182 der Deutschen Forschungsgemeinschaft „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton (UHPC)“ sollen abgesicherte, wissenschaftliche Datengrundlagen zum Bauen mit UHPC von den Ausgangsstoffen bis zum fertigen Bauteil geschaffen werden. Dadurch soll das Verständnis der grundlegenden strukturellen Zusammenhänge zur stofflichen Zusammensetzung und deren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit erweitert werden und es sollen die Grundlagen für Bemessungsverfahren erarbeitet werden.

Aufgrund der hohen Festigkeit von UHPC können die Bauteile bei gleicher Tragfähigkeit mit kleineren Bauteilabmessungen ausgeführt werden als bei Normalbeton. Dadurch reduziert sich das Eigengewicht der Bauteile erheblich, was bei großen Spannweiten ausschlaggebend ist. Bauteile aus UHPC können damit schlank, leicht und ästhetisch ansprechend gestaltet werden. Im Allgemeinen weist UHPC neben der hohen Festigkeit auch eine sehr hohe Dauerhaftigkeit auf. Dies ist auf den niedrigen Anteil an Kapillarporen zurückzuführen. Bauschäden könnten somit bei Verwendung von UHPC zukünftig eher vermieden werden. Daher wird in der Literatur für UHPC auch der Begriff Ultrahochleistungsbeton oder englisch ultra-high-performance concrete gefunden.

Das Schwerpunktprogramm besteht aus insgesamt 34 Forschungsvorhaben, von denen einige bereits abgeschlossen sind und andere noch bis 2012 laufen. In dem Forschungsvorhaben „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung und Optimierung des Brandverhaltens von ultrahochfestem Beton“ sollen vom iBMB die notwendigen Grundlagen geschaffen werden, um UHPC auch im Hochbau mit Anforderungen an den Brandschutz einsetzen zu können. Zurzeit bestehen hier erhebliche Kenntnislücken sowohl hinsichtlich der thermischen also auch der mechanischen Materialkennwerte von UHPC unter Brandeinwirkung. Zudem gilt das Abplatzverhalten von UHPC im Brandfall als äußerst kritisch, sodass hier geeignete Lösungen gefunden werden müssen.

In diesem Bericht werden Zwischenergebnisse aus dem laufenden Forschungsvorhaben vorgestellt. Dabei wird insbesondere auf die thermischen Materialkennwerte für die Berechnung der Bauteilerwärmung und die thermo-mechanischen Materialkennwerte für die Brandschutzbemessung mit vereinfachten oder allgemeinen Rechenverfahren gemäß Eurocode 2 Teil 1-2 (im Folgenden: EC 2-1-2) eingegangen. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wird ein numerisches Modell zur Berechnung des Erwärmungs- sowie des Trag- und Verformungsverhaltens von Bauteilen aus UHPC erarbeitet, das durch abschließende Belegversuche unter Normbrandbeanspruchung an belasteten Stützen validiert werden soll.

Für die im Forschungsvorhaben durchzuführenden Versuche zum Brandverhalten werden zwei Betonrezepturen exemplarisch untersucht, die im Zuge des seit 2005 laufenden Schwerpunktprogramms entwickelt wurden. Dies sind ein Mörtel mit der Kurzbezeichnung M3Q und ein Beton mit der Kurzbezeichnung B5Q. Die Zusammensetzung der untersuchten Betone ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1 Typische Rezepturen für 1 m³ Mischvolumen der UHPC M3Q (Mörtel) und B5Q (Beton)

Ausgangsstoff	M3Q Masse [kg]	B5Q Masse [kg]
Wasser	175	155
CEM I 52,5 R HS/NA	825	650
Mikrosilika	175	170
Fließmittel	27,5	34,5
Quarzmehl	200	456
Quarzsand 0,125/0,5	975	354
Basalt 2/5	0	298,5
Basalt 5/8	0	298,5
Stahlfasern 0,19/9 mm	80 (1 Vol.-%)	201 (2,5 Vol.-%)
PP-Fasern	bis zu 2,5 kg/m³ *	bis zu 2,5 kg/m³ *
* Optimale Faserzugabe ist noch Gegenstand der Forschung		

AUSGANGSLAGE

Bei der Verwendung von UHCP im Hochbau müssen neben Anforderungen der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit auch brandschutztechnische Anforderungen erfüllt werden. Diese beziehen sich auf die Brennbarkeit und die Feuerwiderstandsdauer. UHCP kann ohne weiteren Nachweis nach DIN 4102-4 in die Baustoffklasse A (nichtbrennbar) eingestuft werden. Die Erfüllung der Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer kann jedoch nicht so schnell beantwortet werden, da die Bemessungsregeln für Normalbeton im Brandfall nicht eins zu eins auf UHPC übertragen werden können. Durch die Erwärmung verändern sich die Festigkeitswerte und das Verformungsverhalten eines Baustoffes. Entscheidend für die Feuerwiderstandsdauer eines Stahlbetonteils ist dabei die Temperatur der eingelegten Bewehrung. Es ist somit erforderlich im Brandfall die Temperaturverteilung im Querschnitt berechnen zu können. Dazu werden die thermischen Materialkennwerte λ, ρ, c_p benötigt, die ihrerseits temperaturabhängig sind. Mit diesen Eingangswerten kann dann der Bauteilwiderstand im Brandfall berechnet werden. Dazu muss jedoch sichergestellt sein, dass es durch die Brandeinwirkung zu keiner wesentlichen Schädigung der die Bewehrungseisen schützenden Betondeckung kommt. Bei diesen Schädigungen spricht man von Abplatzungen, die minimiert werden müssen. Andernfalls liegen die Bewehrungseisen frei und sind ungeschützt dem Brand ausgesetzt, was zu einem raschen Verlust der Tragfähigkeit führt. Im Brandfall wird der Beton auf Temperaturen > 100° C erwärmt. Dies führt zur Umwandlung des im Beton enthaltenen Wassers in Wasserdampf. Wasserdampf hat im Vergleich zu Wasser ein etwa um den Faktor 1500 größeres Volumen. Da nicht ausreichend Raum für diese extreme Volumenvergrößerung vorhanden ist entstehen im Querschnitt Zugspannungen die zum Abplatzen der äußeren Betonschichten führen können. Die Abplatzneigung von Beton ist nach aktuellem Stand der Forschung von folgenden Parametern abhängig [2]:

- Temperaturbeanspruchung
  Je höher die Erwärmungsgeschwindigkeit, desto größer ist die Gefahr zerstörender Betonabplatzungen. Bei Normalbeton kann davon ausgegangen werden, dass es erst ab einem Temperaturanstieg < 70 K/min in den ersten 10 Brandminute zu Abplatzungen kommen kann. Bei einer Temperaturbeanspruchung entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve wird dieser Grenzwert erreicht.
- Wassergehalt
  Die Betonabplatzungen entstehen durch die Volumenvergrößerung des im Beton eingelagerten Wassers in Wasserdampf. Je trockener der Beton ist, desto geringer ist die Gefahr von Betonabplatzungen.
- Permeabilität
  Je durchlässiger der Beton ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit von Betonabplatzungen, da der sich im Brandfall bildende Wasserdampf besser entweichen kann. Diese Durchlässigkeit (Permeabilität) ist unter anderem vom Wasser-Zement-Wert abhängig. Hochfeste Betone haben einen nie-

drigen Wasser-Zement-Wert, sodass ein sehr dichtes Betongefüge entsteht. Dies erhöht die Abplatzneigung erheblich.

- Gesteinskörnung
  Die dem Beton zugegebene Gesteinskörnung beeinflusst das Abplatzverhalten ebenfalls. So ist es unumstritten, dass quarzhaltige Zuschlagsstoffe die Gefahr von Abplatzungen erhöhen. Neben der Zuschlagsart spielt die Größe des Zuschlagsstoffs ebenfalls eine entscheidende Rolle, da durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen Eigenspannungen im Bauteil entstehen. Je größer der Durchmesser ist, desto größer ist die Abplatzgefahr.
- Bauteilabmessungen
  Insbesondere die Dicke von Bauteilen beeinflusst das Abplatzverhalten. Je massiger ein Bauteil ist, desto langsamer erwärmt. Bei langsamer Erwärmung sind die Eigenspannungen infolge unterschiedlicher thermischer Ausdehnungen geringer. Zudem verbleibt dem im Brandfall entstehendem Wasserdampf mehr Zeit über die Oberfläche abgeführt zu werden.
- Druckspannungen aus äußerer Belastung
  Bei Druckspannungen > 20 % der Betondruckfestigkeit steigt die Gefahr von Betonabplatzungen, da durch den triaxialen Spannungszustand die Zugfestigkeit des Betons senkrecht zur Oberfläche schneller überschritten wird.
- Thermische Ausdehnung
  Das unterschiedliche Ausdehnungsverhalten von Zuschlägen und Zementstein ist eine weitere Ursache für die Abplatzneigung von Beton im Brandfall. Zusammenfassend kann gesagt werden, je kleiner die thermische Ausdehnung des Gesamtsystems ist, desto geringer ist die Gefahr zerstörender Abplatzungen.
- Bewehrung
  Bewehrungsstäbe stellen Schwachpunkte im Betongefüge dar und begünstigen so die Ausbildung von Rissflächen. Je kleiner die gewählten Stabdurchmesser für die Tragbewehrung sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit von Abplatzungen. Darüber hinaus gilt, dass in der Regel die Betonabplatzungen nicht über die erste Lage der Bewehrung hinausgehen. So besteht die Möglichkeit, dass die tragende Längsbewehrung durch eine zusätzliche außenliegende Brandschutzbewehrung geschützt wird.

ARBEITSPROGRAMM

Um die hohen Festigkeiten von UHPC auch im Brandfall nutzen zu können müssen die Bauteile vor zu rascher Erwärmung und zerstörenden Abplatzungen geschützt werden. Eine Möglichkeit, die Abplatzungen zu begrenzen, besteht in der Beimischung von Kunststofffasern in die Betonrezeptur. Hierzu werden überwiegend Polypropylenfasern (PP-Fasern) genutzt, deren Wirksamkeit in Brandversuchen erfolgreich nachgewiesen werden konnte. Im Brandfall zersetzen sich die PP-Fasern und hinterlassen ein fein verteiltes Netz von Hohl-

räumen. In diese Hohlräume kann der Wasserdampf entweichen und über das feinverteilte Netz an die Oberfläche geführt werden [3]. Zusätzlich wird vermutet, dass durch die PP-Fasern kleine „Sollbruchstellen“ innerhalb des Betons vorhanden sind, an denen Spannungen abgebaut werden, ohne dass es zu Abplatzungen kommt [4]. Die Dauerhaftigkeit des Betons wird nach aktuellen Untersuchungen durch den Zusatz von Polypropylenfasern nicht negativ beeinflusst. Hingegen konnte durch Zugabe von Stahlfasern die Abplatzgefahr nicht signifikant reduziert werden [3].

Weiterhin soll in dem Projekt untersucht werden, ob durch Bekleidungen oder Beschichtungen das Erwärmungsverhalten und das Abplatzverhalten der Bauteile günstig beeinflusst werden können. Auf Grund der hohen Festigkeiten des UHPC ergibt die Bemessung für Normaltemperatur deutlich schlankere Querschnitte als bei normalfestem Beton. Dies hat wiederum zur Folge, dass sich die schlankeren Querschnitte aus UHPC im Brandfall rascher erwärmen als Querschnitte aus Normalbeton mit gleicher Tragfähigkeit [5]. Um zu vermeiden, dass die kritische Temperatur in den Bewehrungsstäben früher erreicht wird, muss der Achsabstand der Bewehrung vergrößert werden. Das führt zu einer geringeren statischen Höhe des Querschnitts und demzufolge zu einem größeren Bewehrungsquerschnitt. Beispielsweise muss bei einem vollausgelasteten, statisch bestimmt gelagerten Biegebalken aus Normalbeton mit einer Querschnittsbreite von 300 mm der Achsabstand mindestens 40 mm betragen, während er bei einer Querschnittsbreite von nur 150 mm mindestens 55 mm betragen muss [5].

Erste Erkenntnisse zum Abplatzverhalten und zum Erwärmungsverhalten von UHPC sollen anhand von Normbrandversuchen mit 60 cm langen Stützenabschnitten gewonnen werden. Die Ergebnisse dienen ebenfalls der späteren Validierung der ermittelten Materialgesetze für λ, ρ und c_p.

Die Formulierung des thermo-mechanischen Materialverhaltens von ultrahochfestem Beton erfolgt in Anlehnung an EC 2-1-2 in Form von temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien, die in die gebräuchlichen Computer-Programme zur Ermittlung des Last- und Verformungsverhaltens brandbeanspruchter Bauteile integriert werden können. Die entsprechend erweiterten Computerprogramme können dann für die Erstellung von Bemessungshilfen für eine vereinfachte brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton verwendet werden.

Als Verfahren zur Ermittlung der temperaturabhängigen thermischen Materialkennwerte λ, ρ, c_p werden die Transient-Plane-Source-Methode (TPS), die thermogravimetrische Analyse (TGA), sowie die dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) eingesetzt. Die Festkörperstrukturen und deren Veränderungen nach definierter thermischer Belastung sollen anhand der Quecksilberdruckporosimetrie mit Hilfe der Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) und der Messung des Diffusionswiderstandes genauer untersucht werden.

Parallel zum Erwärmungsverhalten wird das Festigkeitsverhalten von UHPC durch stationäre Druckversuche und das Verformungsverhalten durch instationäre Warmkriechversuche in der für dieses Forschungsvorhaben neu angeschafften Heiß-Druck-Prüfmaschine untersucht.

ABPLATZ- UND ERWÄRMUNGSVERHALTEN

Zur Untersuchung des Abplatz- und Erwärmungsverhaltens bei einer Brandbeanspruchung entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve wurden jeweils 10 Stützenabschnitte aus den Betonen M3Q und B5Q in zwei Brandversuchen untersucht. Die Stützenabschnitte hatten einen Querschnitt von 20 x 20 cm² und eine Länge von 60 cm. Sie wurden unbelastet geprüft. Die Enden der Stützenabschnitte waren durch Vermiculitplatten geschützt, sodass von einem zweidimensionalen Wärmeeintrag ausgegangen werden kann. Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau.

Bild 1 *Versuchsaufbau zur Untersuchung des Abplatz- und Erwärmungsverhalten von Stützenabschnitten aus UHPC unter ETK-Beanspruchung*

Ziel der Versuche war es zu zeigen, bei welcher Kombination aus Brandschutzbekleidung und Gehalt an PP-Fasern die geringsten Betonabplatzungen unter ETK-Brandbelastung zu erwarten sind. Dazu wurden den Betonrezepturen unterschiedliche Mengen an PP-Fasern beigemischt und die Stützenabschnitt durch Bekleidungen bzw. Beschichtungen vor dem direkten Temperatureintrag geschützt. Eine Übersicht der untersuchten Querschnitte zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2 Übersicht der untersuchten Varianten aus PP-Fasergehalt und Bekleidung

Rezeptur	PP-Fasergehalt [kg/m³]	Schutzschicht
B5Q	0,0	----------
	0,75	----------
		Hochleistungsbrandschutzbeschichtung
		Mineralwolle 10 mm
		Mineralwolle 20 mm
		Ablationsbeschichtung
		Dämmschichtbildner
	1,5	----------
	2,25	----------
M3Q	0,0	----------
	0,75	----------
		Hochleistungsbrandschutzbeschichtung
		Mineralwolle 10 mm
		Mineralwolle 20 mm
		Ablationsbeschichtung
		Dämmschichtbildner
	1,5	----------
	2,25	----------

Jede Kombination aus PP-Fasergehalt und Bekleidung wird für beide Betone B5Q und M3Q untersucht. Hierbei werden die PP-Fasergehalte in dem Bereich von 0 bis 2,25 kg/m³ variiert. Als Bekleidung werden Mineralwollplatten 10 mm und 20 mm Dicke, eine ursprünglich für Holzbauteile entwickelte Hochleistungs-brandschutzbeschichtung, eine Ablationsbeschichtung und ein handelsüblicher Dämmschichtbildner verwendet. Zur Untersuchung des alleinigen Einflusses von PP-Fasern auf das Abplatzverhalten des Betons und zu Vergleichszwecken werden auch Probekörper ohne Bekleidung untersucht. Die vierseitige Beflam-mung erfolgt gemäß Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) über 90 Minuten. Zur Temperaturmessung innerhalb des Querschnitts sind jeweils auf halber Höhe des Probekörpers an der Betonoberfläche sowie in 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm und 50 mm Tiefe Thermoelemente angebracht. Das Verhalten der Probe-körper unter Brandbelastung, insbesondere die zeitliche Veränderung der Schutzsysteme und der Verlauf des Abplatzens, werden durch Videoaufnah-men dokumentiert und analysiert. Zusätzlich werden die Probekörper vor und nach dem Versuch zur objektiven Bewertung der Betonabplatzungen gewogen.

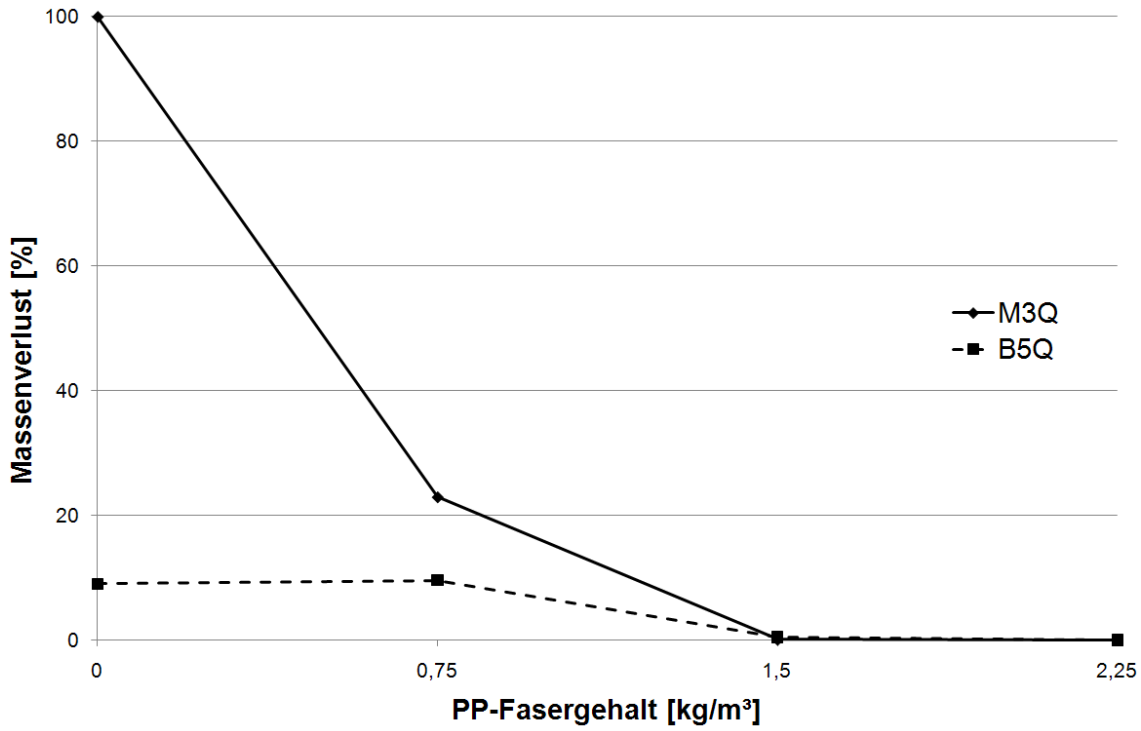


Bild 2 *Masseverlust nach 90-minütiger Brandbeanspruchung gemäß ETK in Abhängigkeit des PP-Fasergehalts*

Wie Bild 2 zu entnehmen ist, haben sich bei den Probekörpern ohne Bekleidung eindeutige Abhängigkeiten der abgeplatzten Betonmasse von der Betonmischung und dem Kunststofffasergehalt ergeben. So ist festzuhalten, dass der Probekörper mit der M3Q-Rezeptur vollständig zerstört wird, wenn dem Beton keine PP-Fasern beigefügt werden (Bild 3). Der Masseverlust durch Abplatzungen nimmt mit steigendem PP-Fasergehalt ab. Dagegen zeigt der Beton B5Q eine deutlich geringere Abplatzneigung: er weist bereits ohne Zugabe von PP-Fasern nur wenig Abplatzungen auf. Erhöht man bei beiden Betonmischungen den Fasergehalt auf 1,5 kg/m³ und mehr, so sind die Proben nach dem Versuch praktisch beschädigungsfrei. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich um unbelastete Probekörper handelt. Eine Untersuchung an belasteten Probekörpern steht noch aus und kann z. B. höhere PP-Fasergehalte erfordern.

Stellt man den Masseverlust infolge von Abplatzungen den unterschiedlichen Bekleidungsvarianten gegenüber, so ist ein eindeutiger Trend feststellbar. Die dieser Auswertung zu Grunde liegenden Probekörper mit den Betonrezepturen M3Q und B5Q besitzen einen konstanten PP-Fasergehalt von 0,75 kg/m³. Bild 4 vergleicht den Masseverlust in Abhängigkeit der Bekleidungsstärke am Beispiel von ungeschützten Probekörpern und mit Mineralwolle in 10 mm und 20 mm Dicke geschützten Probekörpern.

Bild 3 *Abplatzversuche unter ETK-Beanspruchung an Prismen 20/20/60 [cm³] mit verschiedenen PP- Fasergehalten aus M3Q (oben) und B5Q (unten)*

Wird keine Mineralwolle als Schutzschicht verwendet, so liegt der Masseverlust eines M3Q bei ca. 23 % und der des B5Q bei ca. 10%. Bei Verwendung einer Bekleidung aus Mineralwolle treten geringere Abplatzungen auf. Bei einer 20 mm dicken Bekleidung aus Mineralwolle sind keine Beschädigungen am Beton zu beobachten.

Leider konnten die bisher untersuchten Beschichtungssysteme nicht die gleiche Wirkung erzielen wie die Bekleidungen aus Mineralwolle. Die Beschichtungssysteme versagten spätestens nach 30 Minuten. Danach kam es zu einem raschen Temperaturanstieg, sodass die Abplatzungen lediglich zeitverzögert auftraten. Hier sind noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, um Beschichtungssysteme mit einer Schutzdauer bis 90 Minuten zu finden.

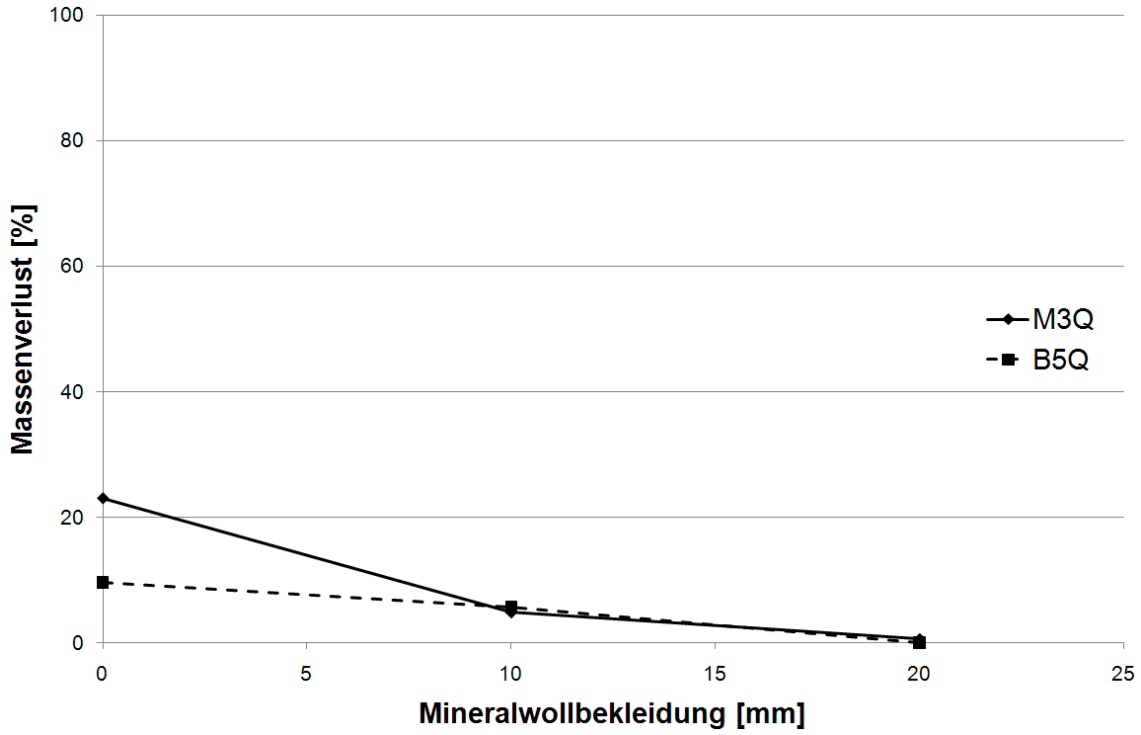


Bild 4 *Masseverlust nach 90-minütiger ETK-Beanspruchung in Abhängigkeit der Bekleidungsstärke*

Stellvertretend für die Untersuchungen zum Erwärmungsverhalten der eingelegten Bewehrungsstäbe bei Probekörpern mit Bekleidung oder Beschichtung wird die Temperaturentwicklung auf der Seitenfläche in 3 cm Tiefe eines B5Q-Stützenabschnittes mit 0,75 kg/m³ PP-Fasern betrachtet. Bild 5 zeigt die Temperaturen über die Zeit, zum Vergleich ist die Temperaturentwicklung ohne Bekleidungssystem abgebildet.

Bemerkenswert ist, dass die ungeschützte Probe an der betreffenden Stelle nach 90-minütiger Beflammung eine Temperatur von ca. 700 °C aufweist. Eine thermische Analyse nach EC 2-1-2 mit den Materialkennwerten für Normalbeton ergibt eine Temperatur von nur 615 °C. Die Ursachen für die schnellere Erwärmung des UHPC werden im folgenden Kapitel ausführlich erläutert.

Durch die untersuchte Ablationsbeschichtung kann die Temperatur im Vergleich zur ungeschützten Probe bereits um ca. 120 °C reduziert werden, die Hochleistungsbrandschutzbeschichtung bringt sogar eine Reduktion um ca. 350 °C. Die zur Verfügung stehenden Beschichtungssysteme sind somit sehr wohl geeignet, die Erwärmung der eingelegten Zugbewehrung auch bei sehr filigranen Querschnitten ausreichend zu begrenzen. Die zum Vergleich geprüfte Bekleidung aus Mineralwollplatten liefert sogar nur Endtemperaturen um etwa 200 °C und zeigt damit nochmals den Vorteil dieser Bekleidungsvariante.

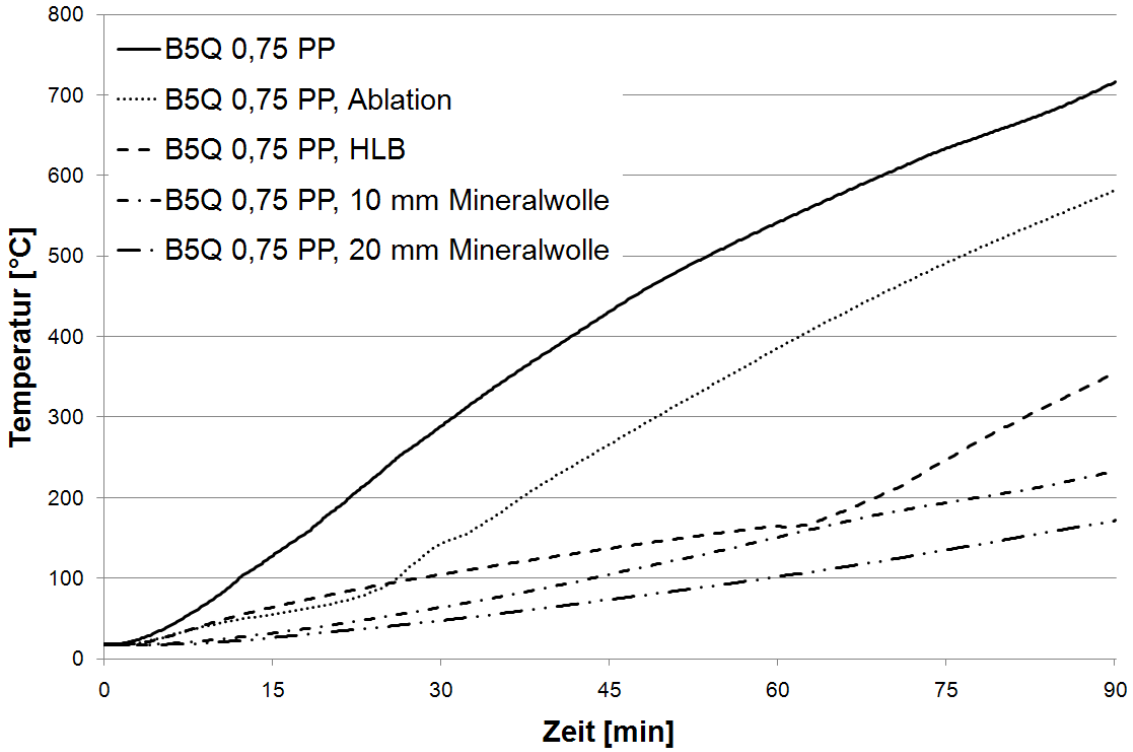


Bild 5 *Temperaturentwicklung während 90-minütiger ETK-Beflammung im 3 cm Tiefe*

THERMISCHE MATERIALKENNWERTE

Für die Bemessung brandbeanspruchter Bauteile werden die Temperaturverteilungen in den Querschnitten benötigt. Hierzu wird die sogenannte thermische Analyse durchgeführt. Das zugrunde liegende instationäre Wärmeleitproblem wird durch die Fouriergleichung (1) beschrieben. Die Lösung dieser Differenzialgleichung erfolgt häufig mit numerischen Näherungsverfahren, beispielsweise der Methode der finiten Elemente.

$$\frac{\delta}{\delta x}\left(\lambda\frac{\delta T}{\delta x}\right)+\frac{\delta}{\delta y}\left(\lambda\frac{\delta T}{\delta y}\right)-\rho c_p\frac{\delta T}{\delta t}=-\dot{q} \qquad (1)$$

Vereinfacht gesagt, muss die Differenz aus der durch den Körper hindurch geleiteten Wärme und der gespeicherten Wärme dem von außen einwirkendem Wärmestrom entsprechen. Die zwei linken Terme in Gleichung (1) beschreiben die zweidimensionale Wärmeleitung und sind von dem thermischen Materialkennwert Wärmeleitfähigkeit λ abhängig. Der dritte Term ist der „Speicherterm“ und enthält die thermischen Materialkennwerte spezifische Wärmekapazität c_p und Rohdichte ρ. Alle thermischen Materialkennwerte sind mehr oder weniger ausgeprägt temperaturabhängig, sodass nicht einfach die bekannten Angaben für Raumtemperatur für die thermische Analyse brandbeanspruchter Bauteile verwendet werden dürfen.

Im Folgenden werden die Laborversuche zur Ermittlung der thermischen Materialkennwerte von UHPC beschrieben und Ergebnisse bezüglich der Rezepturen B5Q und M3Q dargestellt. Bei allen Untersuchungen handelt es sich um Probekörper, die nach Herstellung mindestens 100 Tage alt waren und nach 28 Tagen bei Raumklima gelagert wurden. Die zu erwartenden Feuchtegehalte liegen damit in einem Bereich von 2,5 bis 3,2 M.-%.

Die Materialkennwerte beziehen sich ausschließlich auf die Erwärmungsphase eines Brandes. Darüber hinaus werden am iBMB jedoch auch erste Versuche zur Beschreibung der Materialkennwerte während der Abkühlphase eines Brandes durchgeführt.

Transientes Prüfverfahren

Die temperaturabhängige volumetrische spezifische Wärmekapazität c_p und die Wärmeleitfähigkeit λ können simultan mithilfe der sogenannten TPS- Methode (Transient Plane Source) nach DIN EN ISO 22007-2 [6] untersucht werden. Es handelt sich um ein transientes Verfahren, bei dem ein Sensor zwischen zwei Probekörperhälften eingespannt wird und gleichzeitig als Heizelement und Temperatursensor fungiert (Bild 6). Aus den Messdaten werden die Wärmeleitfähigkeit λ und die Temperaturleitfähigkeit $a=\lambda/(\rho \cdot c_p)$ bestimmt, woraus sich durch Division ferner die volumetrische spezifische Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ errechnen lässt. Mit Hilfe eines Rohdichtemodells wird wiederum die benötigte massenbezogene spezifische Wärmekapazität c_p abgeleitet. Die TPS-Methode wird am iBMB in der Regel bis zu einer Temperatur von 600 °C angewendet und ist in Einzelfällen auch bis 750 °C einsetzbar – jedoch mit hohen Verbrauchskosten für das Sensormaterial. Die genauere Theorie des Verfahrens kann in [7] nachgelesen werden. Die TPS-Methode ist im deutschsprachigen Raum noch recht wenig verbreitet, die Anwendbarkeit für Baustoffe wird jedoch in einem Bericht der schwedischen *SP Fire Technology* [8] eindeutig belegt.

Bild 6 Halterung und Sensor der TPS-Einrichtung sowie Probekörper aus UHPC

Die Probekörper werden als Scheibe von den Versuchszylindern der mechanischen Untersuchungen abgetrennt und plan geschliffen, sodass das Material jeweils eine Stichprobe aus einem größeren Mischvolumen darstellt.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit von Beton bei Raumtemperatur hängt unter anderem von den Parametern Betonfeuchte, Rohdichte, Wasser/Zement- Wert und der Gesteinskörnung ab. Auf Basis der Angaben in [9] wird in Bild 7 der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C über der Rohdichte als Exponentialfunktion aufgetragen. Der Feuchtegehalt wird dabei praxisgereicht zu 3 % angenommen. Da das Modell die Wärmeleitfähigkeit der Gesteinskörnung und den Wasser/Zement-Wert nicht direkt berücksichtigt, wird ein Streubereich von ± 20 % angegeben. Mit steigender Rohdichte wächst auch die Wärmeleitfähigkeit stark an. Dieses ist insofern nachvollziehbar, als die Wärmeleitfähigkeit in Festkörpern auf Gitterschwingungen beruht. Je dichter ein Körper ist und je weniger Fehlstellen vorhanden sind, desto besser können die Schwingungen von Molekül zu Molekül weitergegeben werden. Die gemessenen Werte von B5Q und M3Q mit 0,75 kg/m³ PP-Fasergehalt und die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton nach EC 2-1-2 werden durch den oberen Grenzwert des Modells [9] verhältnismäßig zutreffend dargestellt. Dieses wiederum ist auch eine Bestätigung für die Plausibilität der TPS-Messungen.

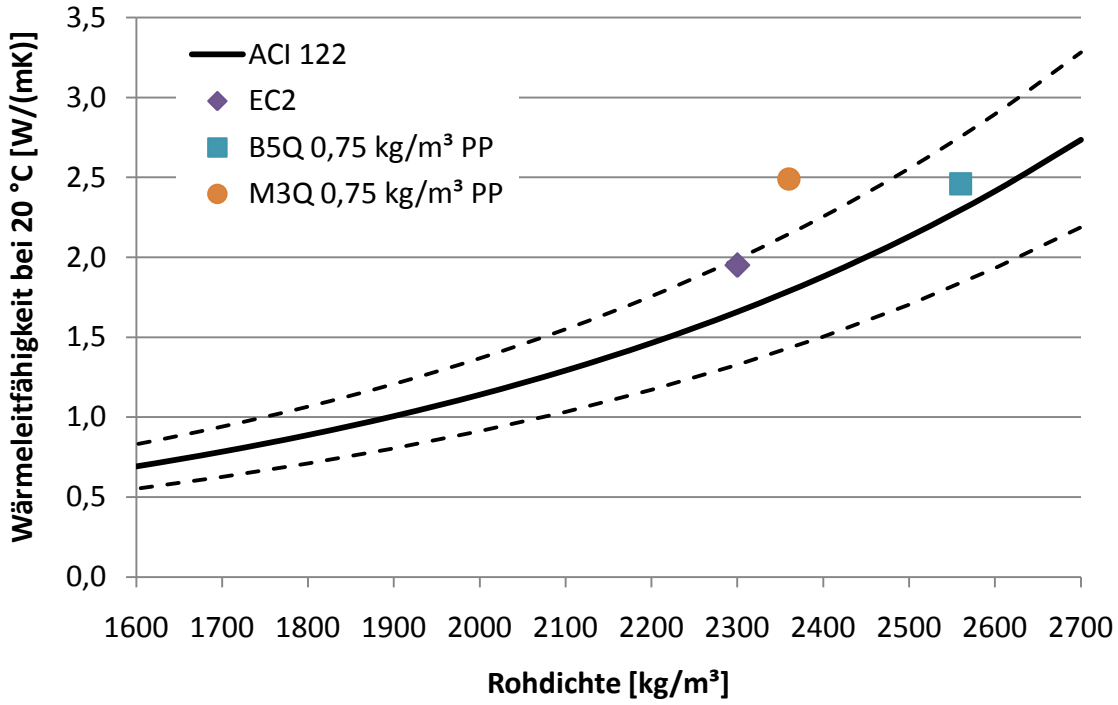


Bild 7 *Wärmeleitfähigkeit von UHPC bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Rohdichte; Rezepturen B5Q und M3Q mit 0,75 kg/m³ PP-Fasergehalt im Vergleich zur Angabe im Eurocode 2; Darstellung des funktionalen Zusammenhangs mit 20 % Streubereich nach ACI 122 [9]*

Die temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der UHPC-Rezepturen B5Q und M3Q mit jeweils 0,75 kg/³ Fasergehalt werden in Bild 8 dargestellt. Der zum Vergleich aufgetragene Verlauf des oberen Grenzwertes nach EC 2-1-2 ist insgesamt deutlich niedriger. Bei *SP-Fire-Technology* [8] wurde ein hochfester Beton ebenfalls mit der TPS-Einrichtung untersucht und es ergaben sich noch höhere Werte als bei den Untersuchungen an B5Q und M3Q. Um die Mechanismen der Temperaturabhängigkeit von UHPC in Zukunft besser erklären zu können, werden am iBMB derzeit Gefügeuntersuchungen hinsichtlich Porosität und Permeabilität sowie REM-Aufnahmen durchgeführt. Die Auswirkung der erhöhten Wärmeleitfähigkeit auf die Bemessung von Bauteilen aus UHPC wird anschließend anhand einer Versuchsnachrechnung gezeigt.

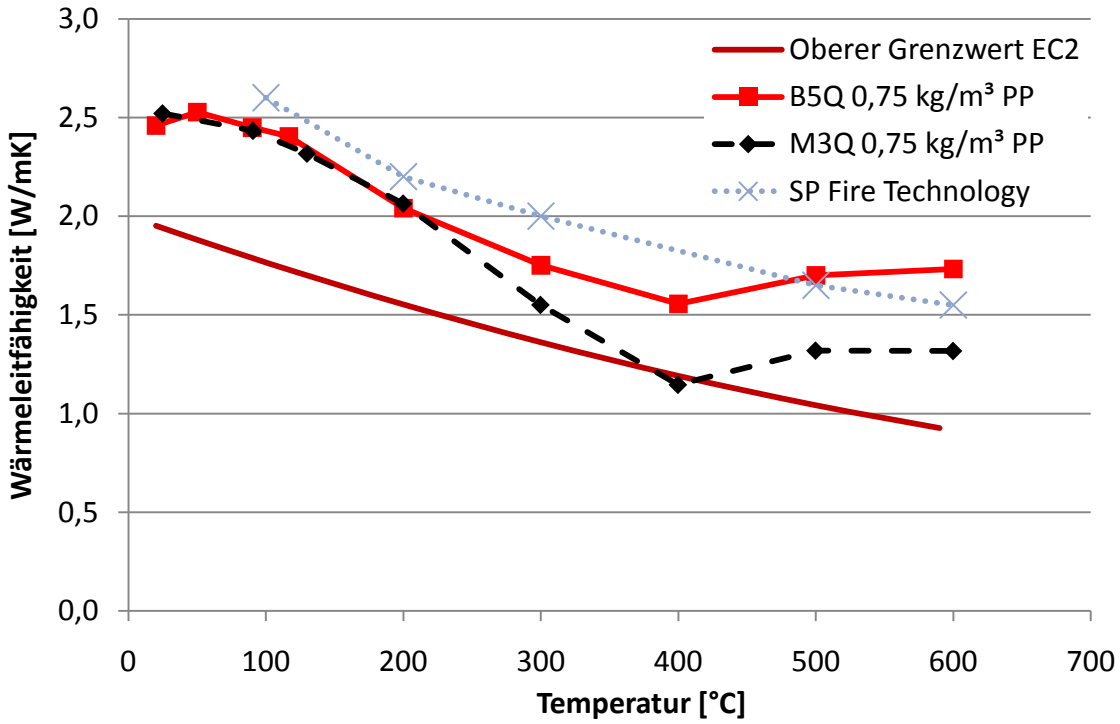


Bild 8 *TPS-Messungen: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Rezepturen B5Q und M3Q mit PP-Fasergehalt 0,75 kg/m³; Vergleich mit Angaben zum Normalbeton in EC 2-1-2 und Messungen bei SP Fire Technology [8] an hochfestem Beton*

Rohdichte

Der temperaturabhängige Massenverlust von UHPC kann mittels thermogravimetrischer Analysen (TGA) nach DIN 51006 [10] bestimmt werden. Unter Vernachlässigung der Volumenänderung des Betons resultiert aus den Daten der TGA direkt ein Modell für die Rohdichte.

Bild 9 zeigt den bezogenen temperaturabhängigen Verlauf der Rohdichte für die beiden UHPC-Rezepturen B5Q und M3Q mit einem mittleren PP-Fasergehalt von 1,50 kg/m³. Im Bereich von 100 °C bis 200 °C ist ein sehr deutlicher Abfall

der Rohdichte festzustellen. Dieser resultiert aus dem Verlust des freien und physikalisch gebundenen Wassers. Im weiteren Verlauf sinkt die Rohdichte annähernd linear auf 91 % bzw. 92 % der Anfangsrohdichte ab. Diese wird im Laufe des Forschungsvorhabens laufend ausgewertet. Nach derzeitigem Stand der Untersuchungen pendelt sich in einem Alter von mindestens 100 Tagen und Lagerung bei Raumklima die Anfangsrohdichte von B5Q bei ca. 2500 bis 2600 kg/m³ und die von M3Q bei ca. 2300 bis 2400 kg/m³ ein. In EC 2-1-2 wird für Betone mit quarzitischem Zuschlag standardmäßig eine etwas niedrigere Anfangsrohdichte von 2300 kg/m³ genannt.

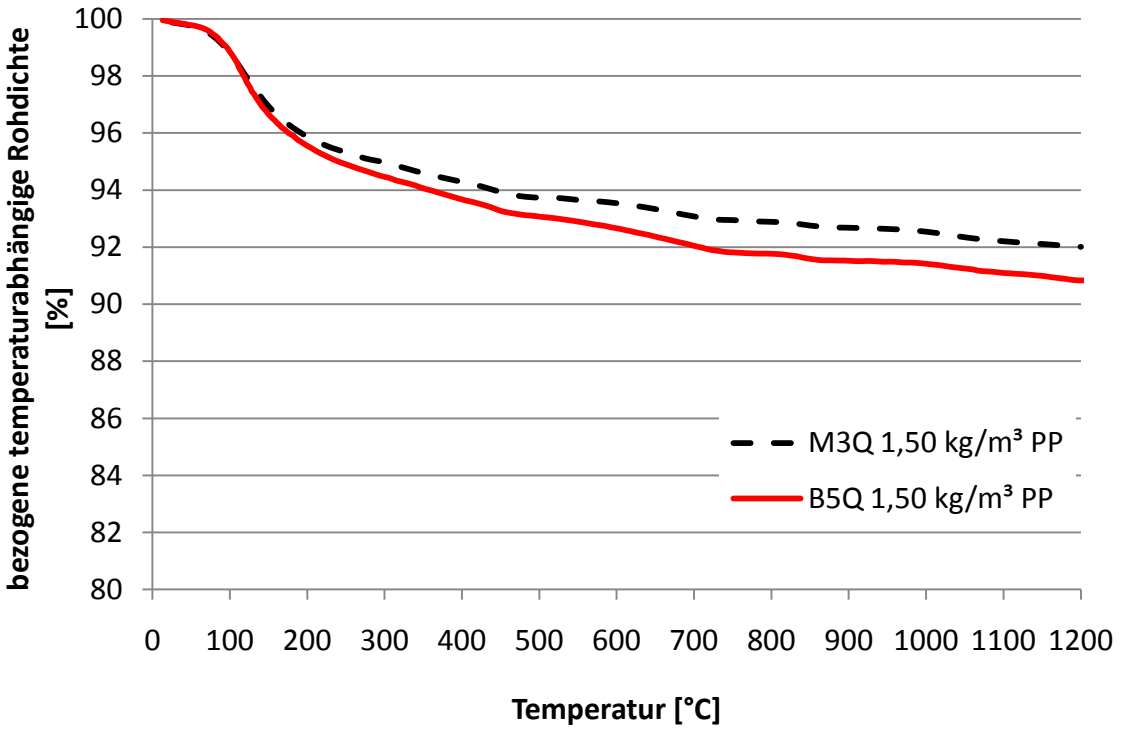


Bild 9 *TGA Messungen: bezogene temperaturabhängige Rohdichte von UHPC; Rezepturen B5Q und M3Q mit 1,50 kg/m³ PP-Fasergehalt*

Spezifische Wärmekapazität

Für die Anwendung der TPS-Methode ist es erforderlich, die Temperatur in Probe und Sensor sehr exakt zu stabilisieren. Die daraus resultierenden Haltezeiten führen dazu, dass energetische Effekte in Folge chemischer Reaktionen oder Verdampfen von freiem und gebundenem Wasser nicht detektiert werden. Als Ergänzung zur TPS- Methode werden daher DSC-Messungen (dynamische Differenzkalorimetrie) in Anlehnung an DIN 51007 [11] durchgeführt. Am iBMB findet hierfür die sogenannte Saphirmethode Anwendung. Die DSC ermöglicht die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität bis zu Temperaturen von 600 °C. Im Folgenden werden ausschließlich die Ergebnisse der DSC-Messungen an B5Q und M3Q mit 0,75 kg/m³ PP-Fasergehlt dargestellt und diskutiert (Bild 10).

Nach Erreichen einer Temperatur von 100 °C ist ein sehr ausgeprägter Peak in der Wärmekapazität erkennbar, der auf die Verdampfungswärme des freien und physikalisch gebundenen Wassers zurückzuführen ist. Der Peak bei 450 °C beruht auf der Zersetzung des Portlandits und der etwas kleinere Peak bei ca. 570 °C auf der Gitteränderung des Quarzes [12].

Die Größenordnungen der Angaben in EC 2-1-2 sind vergleichbar, wenngleich diese als Rechenwerte die Peaks der physikalischen und chemischen Prozesse verschmiert beinhalten.

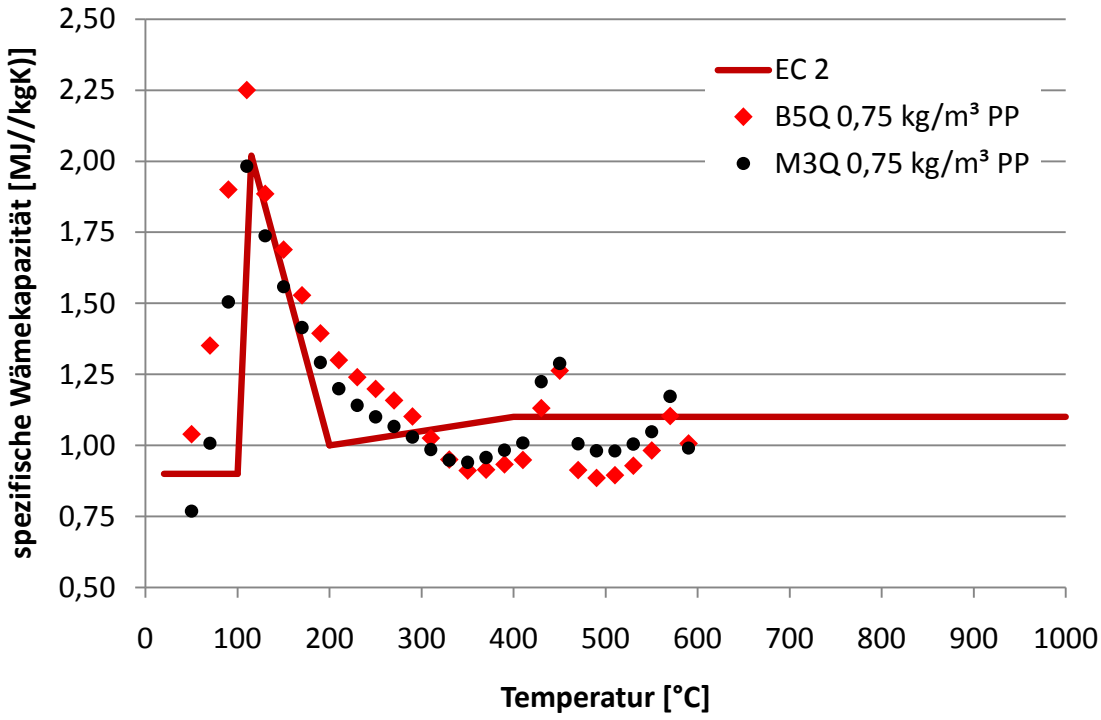


Bild 10 *DSC Messungen: spezifische Wärmekapazität von UHPC; Rezepturen B5Q und M3Q mit 0,75 kg/m³ PP-Fasergehalt*

Versuchsnachrechnung

Die dargestellten thermischen Materialeigenschaften resultieren aus kleinmaßstäblichen Laborversuchen, sodass die Vorgänge in realmaßstäblichen Bauteilen ggf. noch nicht ganz korrekt wiedergegeben werden können. Im späteren Normungsprozess werden die Laborergebnisse in angepasste Rechenwerte überführt, sodass die thermischen Analysen der Brandschutznachweise konservativ sind.

In Bild 11 ist ein solches Rechenmodell für die thermischen Materialkennwerte von B5Q dargestellt. Die Wärmekapazität $\rho \cdot c_p$ wird aus dem Produkt der Rohdichte und der massenbezogenen spezifischen Wärmekapazität gebildet. Für die Wärmeleitfähigkeit wird ein oberer Grenzwert in Form einer quadratischen Funktion angenommen. Mit diesem Rechenmodell wird ein Stützenabschnitt

aus dem dargestellten Normbrandversuch unter ETK-Beanspruchung nachgerechnet.

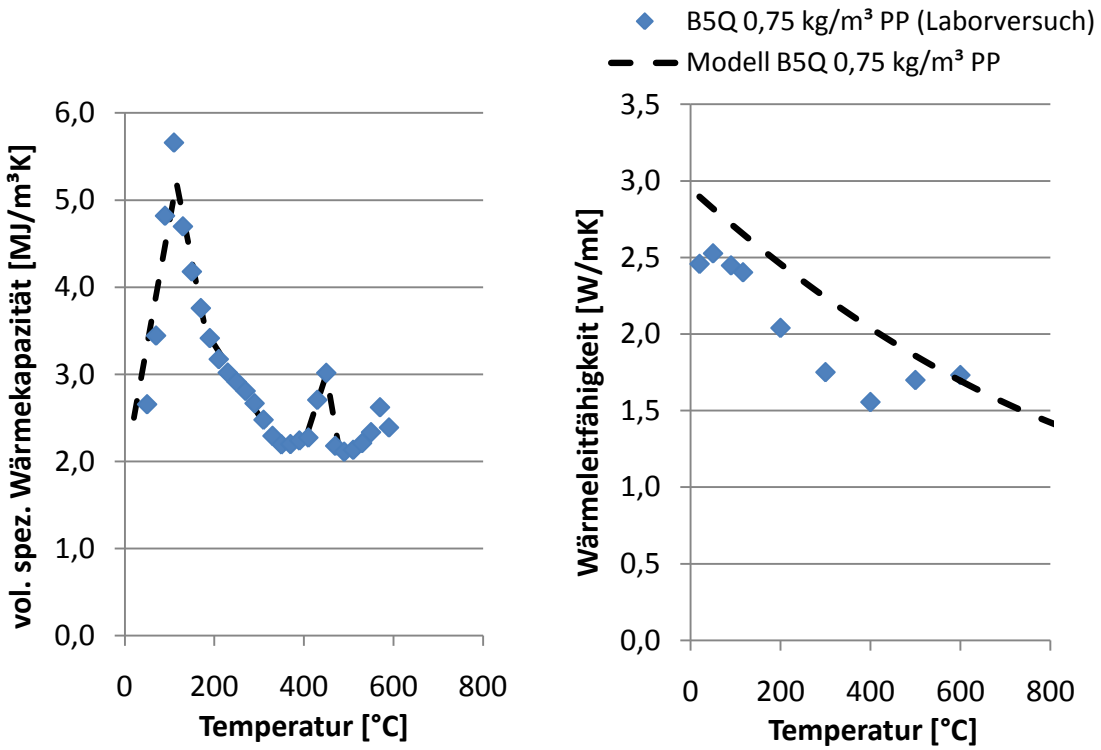


Bild 11 *Rechenmodelle für die thermischen Materialeigenschaften von B5Q mit einem PP-Fasergehalt von 0,75 kg/m³*

Im Bild 12 sind die jeweiligen Temperaturverläufe der Eckbewehrung in einem Abstand u = 50 mm angegeben. Zum Vergleich wird auch der Temperaturverlauf auf Basis der Modelle im EC 2-1-2 für Normalbeton angegeben. Das Wärmespeicherungsvermögen des B5Q wird bei niedrigen Temperaturen sowohl im Modell für B5Q als auch nach EC 2-1-2 überschätzt, wie sich am stark gekrümmten und zu niedrigen Temperaturverlauf ablesen lässt. Im weiteren Temperaturverlauf nähert sich das B5Q-Modell an die Versuchsergebnisse an. Die für die Bemessung kritische Temperatur von 500 °C wird im Versuch nur 4 Minuten früher erreicht als im Modell. Die thermische Analyse entsprechend EC 2-1-2 führt zu stark auf der unsicheren Seite liegenden Ergebnissen, da die kritische Temperatur erst 15 Minuten später als im Versuch erreicht wird. Dieses ist bereits ein erster Hinweis, dass die Tabellen und vereinfachten Bemessungsmodelle aus EC 2-1-2 nicht ohne Modifikationen auf den UHPC übertragbar sind.

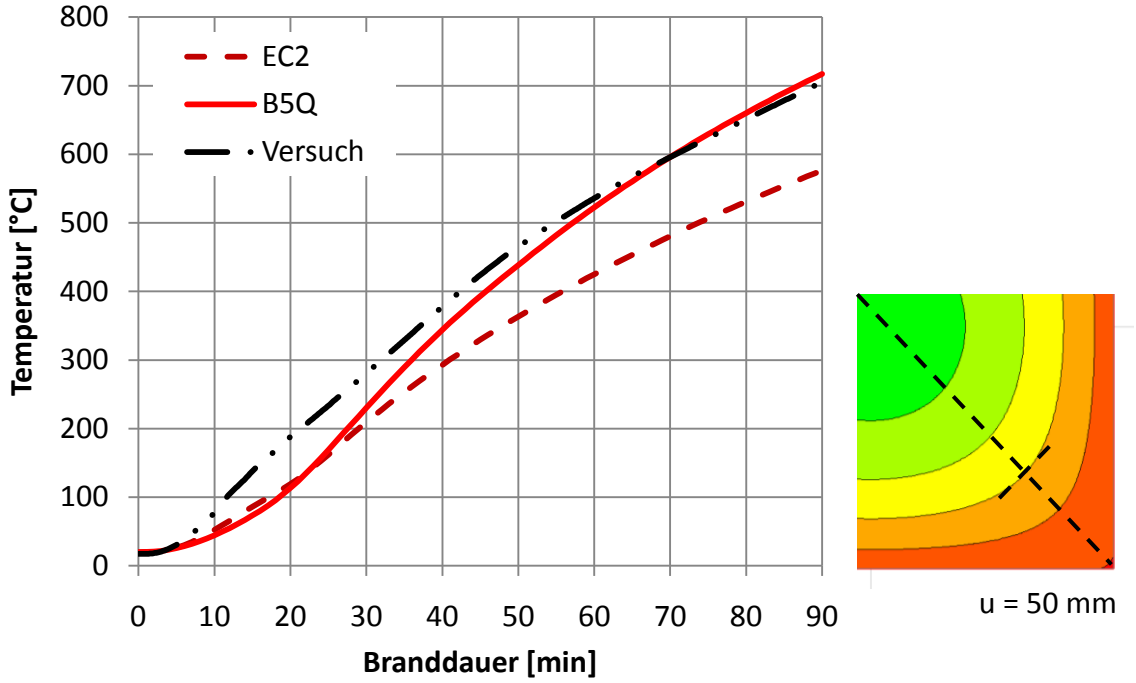


Bild 12 *Thermische Analyse eines UHPC Querschnittes 20/20 [cm²]; Temperaturverläufe an der Ecke entsprechend der Rechenmodelle nach dem Eurocode 2 für Normalbeton und dem Modell für B5Q in Vergleich zu einem Bauteilversuch; Achsabstand u = 50 mm*

MECHANISCHE MATERIALKENNWERTE

Zur Bestimmung der temperarturabhängigen mechanischen Materialkennwerte stehen nach [13] prinzipiell drei verschiedene Versuchsarten zur Verfügung (Bild 13). Bei Versuchsart I, den sogenannten stationären Versuchen, werden die Proben bei konstanter Temperatur und steigender Last bis zum Versagen untersucht und die Dehnung gemessen. Bei Versuchsart II werden die Proben dehnungsbehindert in die Prüfmaschine eingebaut, erwärmt und die Zwängungskräfte gemessen.

Bei der Versuchsart III, den sogenannten instationären Hochtemperatur- oder Warmkriechversuchen, werden die Proben bei einer konstanten Belastung bis zum Versagen erwärmt und die Verformung gemessen. Diese Versuchsart hat für das Brandverhalten von Bauteilen die größte Bedeutung, da sie die tatsächlich vorliegende Belastungssituation am besten widerspiegelt.

Die stationären Versuche dürfen nicht zur Berechnung von Verformungen von Bauteilen im Brandfall genutzt werden, da sie die Anteile des thermischen Kriechens nicht berücksichtigen. Hierzu werden zwingend die instationären Versuche nach Versuchsart III benötigt.

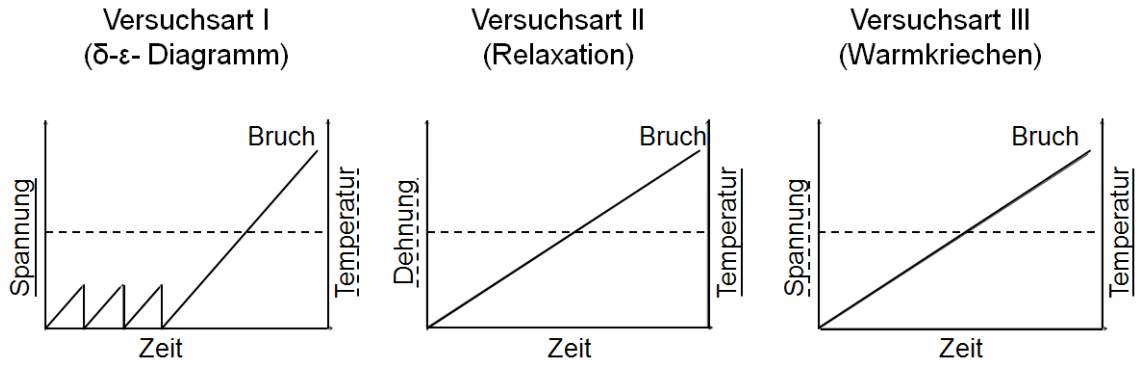


Bild 13 Versuchsarten zur Ermittlung des Materialverhaltens von Beton im Brandfall [13]

Heißdruckprüfmaschine

Zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von UHPC musste eine neue Heißdruckprüfmaschine angeschafft werden, da die vorhandenen Prüfmaschinen nicht die ausreichende Leistungsfähigkeit für einen Beton mit derart hohen Festigkeiten aufwiesen. Die Prüfeinrichtung besteht aus einer Belastungseinheit und drei auswechselbaren unterschiedlichen Öfen für die individuelle thermische Beaufschlagung der Probekörper.

Die maximal aufbringbare Last beträgt 4000 kN. Die Last wird über Belastungsplatten mit einer Fläche von 1000 x 240 mm² eingeleitet. Bei Ausnutzung der Einspannhöhe können so Proben mit den maximalen Abmessungen von 1000 x 1000 x 240 mm³ geprüft werden. Der Hub der Belastungsplatten kann maximal 100 mm betragen. Durch den Einsatz eines Adaptersystems sind auch kleine zylindrische Proben wie im vorliegenden Fall prüfbar. Hierbei können Durchmesser zwischen 80 mm und 150 mm untersucht werden bei Probenlängen zwischen 240 mm und 300 mm. Die hohe Steifigkeit der Belastungseinrichtung ist eine Grundvoraussetzung, damit auch nach Überschreiten der Maximallast die Proben in Wegregelung weiter belastet und Daten sicher erfasst werden können. Angesteuert werden die gewünschten Belastungsparameter durch eine umschaltbare Kraft-Weg-Dehnungsregeleinheit. Die Dehnungswerte werden mittels eines Dilatometersystems aus dem heißen Ofenbereich heraus erfasst. Die ermittelten Messwerte werden elektronisch gespeichert und separat ausgewertet.

Die Temperaturbeaufschlagung der verschieden großen Proben erfolgt durch jeweils an die Probengröße angepasste Öfen. Verwendet werden neuartige Poren-Gasbrenner sowie ein Elektroofen. Bei individuell einstellbaren Aufheizraten sind Maximaltemperaturen bis 1200 °C möglich. Durch eine Mehrzonenregelung der Öfen kann eine nahezu homogene Temperatureinleitung in den jeweiligen Probekörper eingestellt werden.

Mit dieser Versuchseinrichtung ist es nun möglich, die Forschung auch auf neuartige Werkstoffe wie den ultrahochfesten Beton auszudehnen. Erst die

Möglichkeiten der hohen Lasteintragung bis 4000 kN bei gleichzeitiger Hochtemperaturbeaufschlagung bis 1200 °C eröffnen jetzt neue Untersuchungsmöglichkeiten.

Für die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Versuche in der Heiß-Druck-Prüfmaschine werden zylinderförmige Betonproben mit einem Durchmesser von 8 cm und 30 cm Länge betoniert. Anschließend werden die Proben abgesägt und geschliffen, sodass sich eine Probenlänge von 24 cm ergibt.

Versuchsdurchführung

Es wurden zunächst stationäre Versuche (Versuchsart I) durchgeführt, um erste Informationen über die Festigkeitsabnahme bei Temperaturbelastung zu erhalten. Die Betonproben wurden mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 4 K/min auf die Versuchstemperatur von 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700 und 800 °C erwärmt. Nachdem die Versuchstemperatur erreicht war, wurde die Betonprobe zunächst dreimal kraftgesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von ca. 0,5 N/mm^2s^{-1} bis zu einer maximalen Belastung von etwa 30 % der zu erwartenden temperaturabhängigen Festigkeit vorbelastet. Anschließend wurde die Belastung weggesteuert bis zum Versagen gesteigert. Durch die weggesteuerte Belastung war es möglich, den Beginn des Nachbruchverhaltens ebenfalls zu untersuchen.

Während der Belastung wurde die Verformung der Probe kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet. Bild 14 zeigt die Ergebnisse ausgewählter Versuche für die Rezeptur B5Q. Wie bei Normalbeton ist auch bei UHPC bereits aus diesen Versuchen erkennbar, dass mit zunehmender Temperatur die Spannungs-Dehnungslinien „weicher“ werden. Zudem ist deutlich erkennbar, dass insbesondere bei den hohen Temperaturen (≥ 500 °C) die maximale Festigkeit abnimmt. Bis 400 °C muss dieses Verhalten noch genauer untersucht und durch eine größere Anzahl von Messdaten untermauert werden. Die in Bild 14 angegeben Spannungs-Dehnungslinien zeigen, dass die Festigkeit bis ungefähr 100 °C abnimmt, dann bis ca. 300 °C wieder ansteigt und erst bei Temperaturen > 400 °C kontinuierlich abfällt.

Dieses Verhalten ist noch deutlicher in Bild 15 zu erkennen. Das Bild zeigt die bezogene maximale Festigkeit von UHPC im Vergleich zu Messwerten an hochfestem Beton und den Rechenwerten nach EC 2-1-2 für Normalbeton und für hochfesten Beton C90/105. Es ist zu erkennen, dass die Festigkeitsabnahme bis 100 °C bei UHPC deutlich schneller erfolgt als bei Normalbeton, dessen Rechenwerte der Festigkeit in diesem Bereich konstant bleiben. Dieser Festigkeitsverlust zwischen 20 °C und 200 °C findet sich ebenfalls bei hochfestem Beton wieder, sowohl in den genormten Rechenwerten nach EC 2-1-2 als auch bei den Versuchsergebnissen nach [3]. Während bei Normalbeton wie auch beim hochfesten Beton die Festigkeit anschließend kontinuierlich sinkt, bleibt bei dem untersuchten UHPC die Festigkeit bis 400 °C annähernd auf ihren Ausgangswert und fällt erst bei höheren Temperaturen ab.

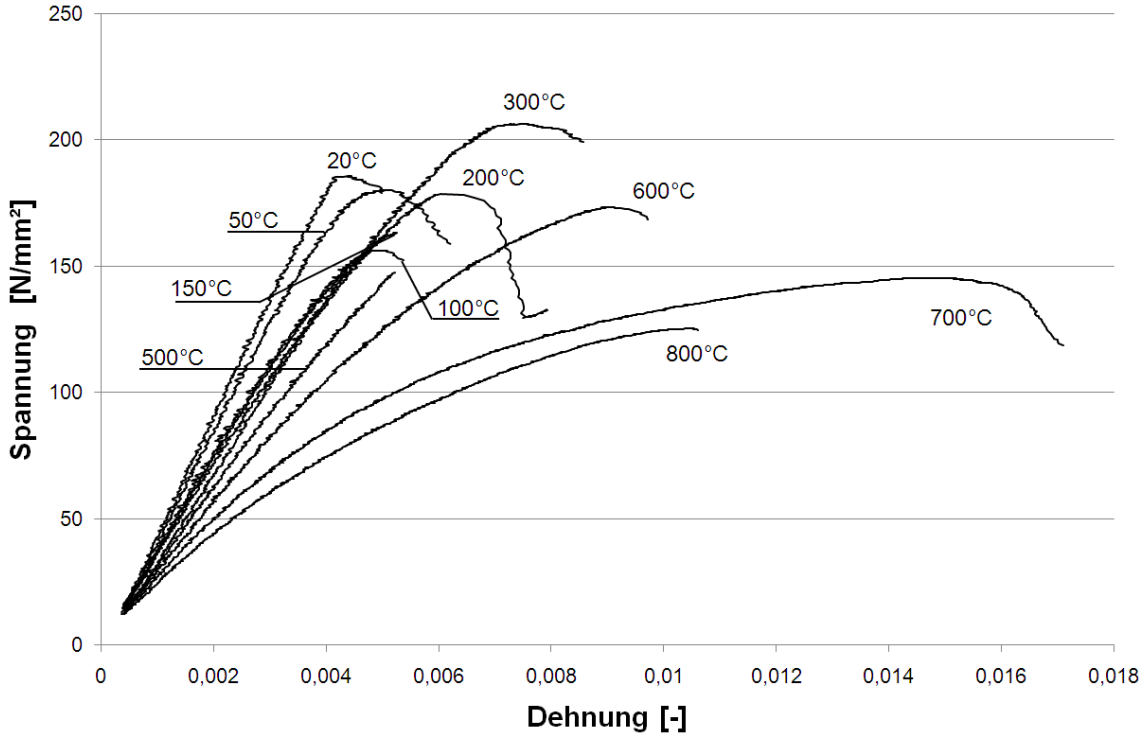


Bild 14 Messwerte der stationären Versuche für die Rezeptur B5Q

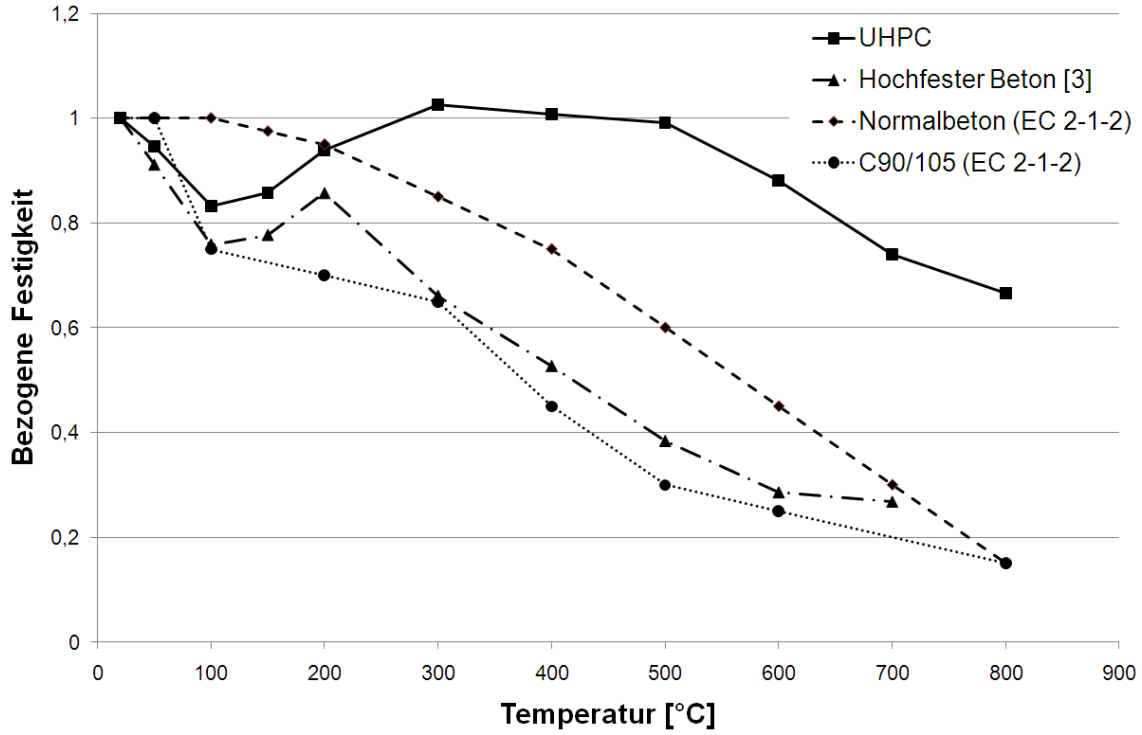


Bild 15 Vergleich der Festigkeitsentwicklung von UHPC, hochfestem Beton und den Rechenwerten nach EC 2-1-2

Bei dieser Betrachtung muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich bei den Festigkeiten nach EC 2-1-2 um Rechenwerte handelt, die nicht unbedingt mit den tatsächlich gemessenen Werten übereinstimmen müssen. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass insbesondere bei höheren Temperaturen > 400 °C der gemessene Festigkeitsabfall bei dem untersuchten UHPC deutlich geringer ausfällt als bei Normalbeton und hochfestem Beton. So beträgt beispielsweise die bezogene Festigkeit des UHPC bei 600 °C noch knapp 90 % der Ausgangsfestigkeit, während sie bei Normalbeton bereits auf weniger als 50 % abgefallen ist [5].

Bezogen auf die durch stationäre Versuche bei 20 °C ermittelte Festigkeit werden die instationären Versuche ohne Belastung (0 %) und bei den Laststufen 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 % und 70 % durchgeführt. Die Probekörper werden in die Prüfmaschine eingebaut. Anschließend wird die Last weggesteuert bis auf das gewünschte Spannungsniveau gesteigert und dann konstant gehalten, während die Temperatur im Ofen mit einer Geschwindigkeit von 4 K/min bis zum Versagen des Probekörpers gesteigert wird. Während des Versuchs wird die Verformung (Dehnung und Stauchung) des Probekörpers kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet.

Die Versuchsergebnisse für die UHPC-Rezeptur B5Q sind in Bild 16 dargestellt.

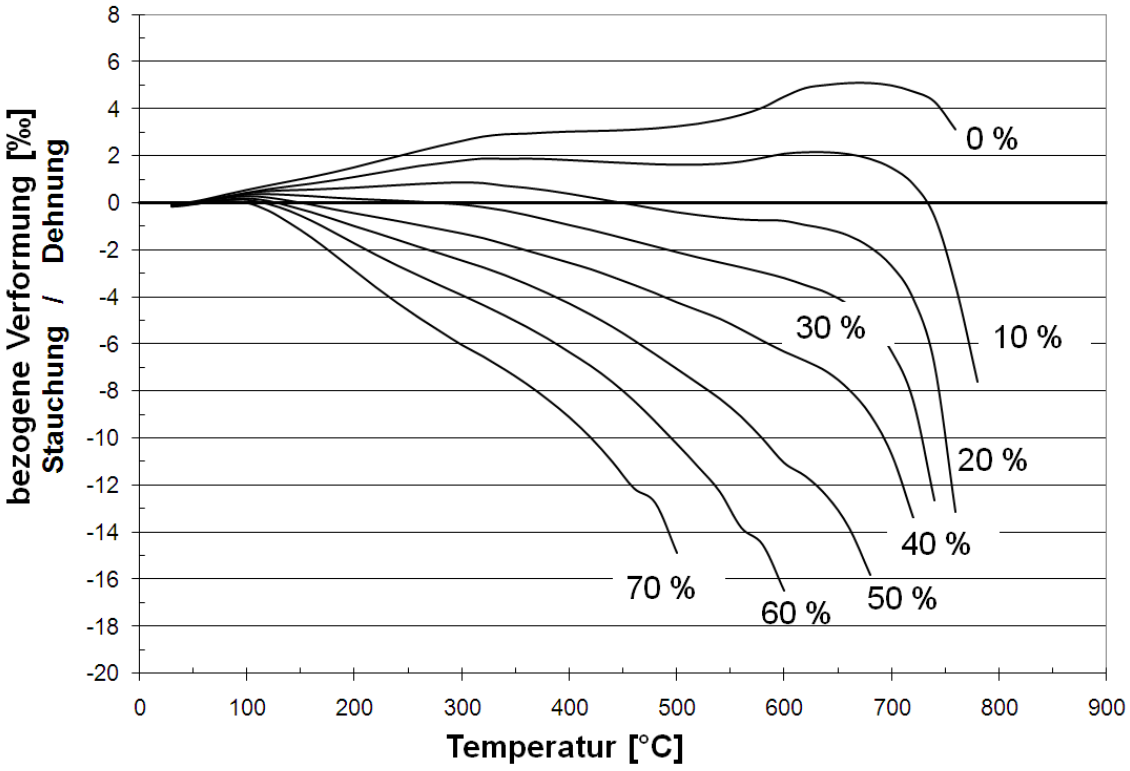


Bild 16 *Bezogene Gesamtverformung der Probekörper in Warmkriechversuchen am Beispiel des B5Q*

Die Temperatur-Dehnungskurve ohne Belastung stellt die ungehinderte thermische Dehnung dar. Bei den übrigen Temperatur-Dehnungskurven in Bild 16 ist erkennbar, dass die thermische Dehnung zum Teil bei den höheren Belastungen vollständig überdrückt und die Probekörper gestaucht werden.

Der Vergleich mit den Rechenwerten für Normalbeton in Bild 17 zeigt, dass die thermische Dehnung bei UHPC deutlich geringer ist. Dies hat zur Folge, dass die Eigenspannungen infolge der unterschiedlichen thermischen Dehnungen am Querschnittsrand und im Querschnittsinneren im Vergleich zu Normalbeton deutlich kleiner ausfallen werden.

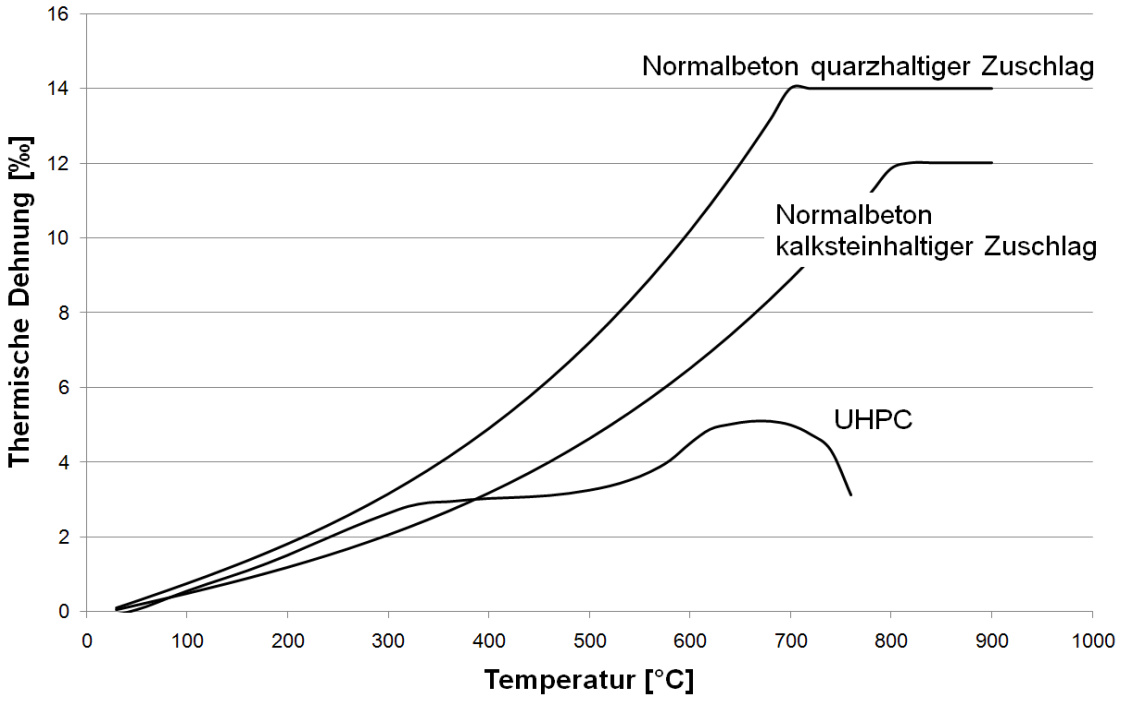


Bild 17 *Gegenüberstellung der gemessenen thermischen Dehnung des B5Q mit den Rechenwerten von Normalbeton nach EC 2-1-2*

Aus Bild 16 werden die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien bestimmt, indem die thermischen Dehnungen herausgerechnet werden. Dies erfolgt, indem für die betrachtete Temperaturstufe von der Gesamtverformung (z. B. bei 500 °C und 60 % Belastung eine Stauchung von -10 ‰) die thermische Dehnung (hier ca. 3 ‰) abgezogen wird. Dies ergibt eine Gesamtverformung inklusive der Hochtemperaturkriechanteile von -13 ‰ [13].

Erste Ergebnisse für die so ermittelten Spannungs-Dehnungslinien für den B5Q bis zu einer maximalen Belastung von 70 % zeigt Bild 18. Es ist beachten, dass es sich hierbei ausschließlich um Messwerte handelt, die erst noch in Rechenwerte überführt werden müssen.

Einen Vergleich der entwickelten Spannungs-Dehnungslinien für UHPC mit den Rechenwerten für Normalbeton nach EC 2-1-2 zeigt Bild 19.

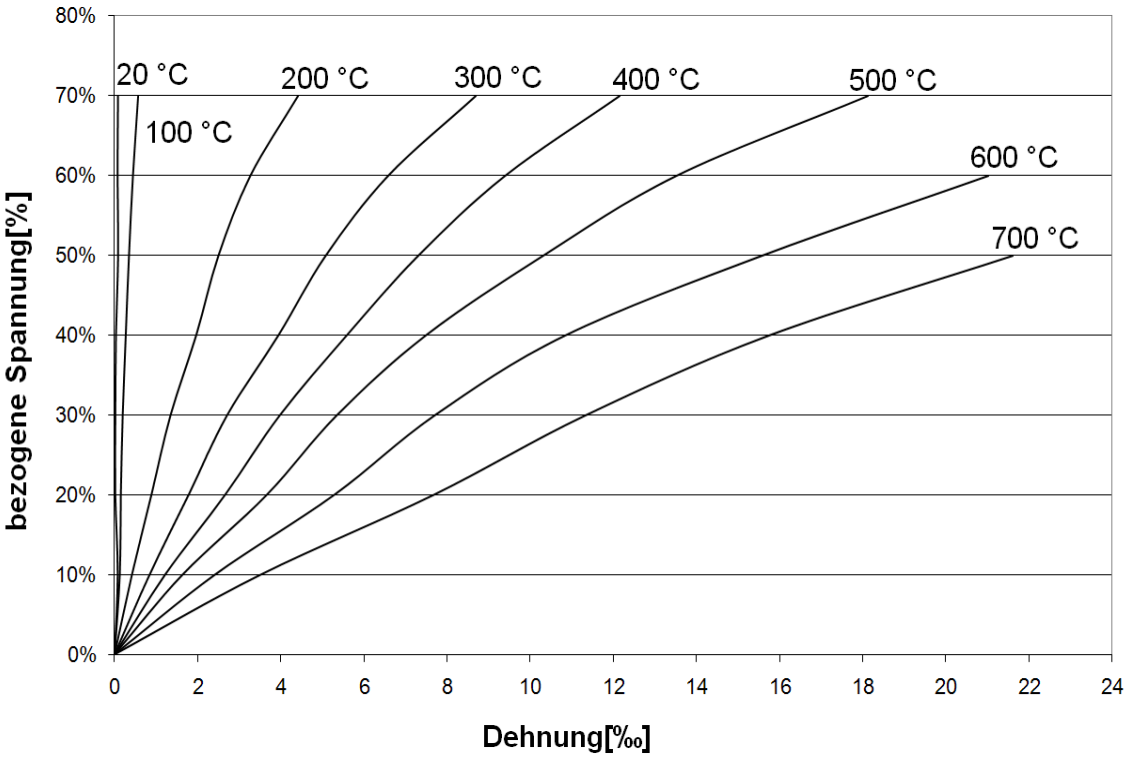


Bild 18 *Temperaturabhängige Spannungs-Dehnungslinien des B%Q bis zu einer maximalen Belastung von 70 %*

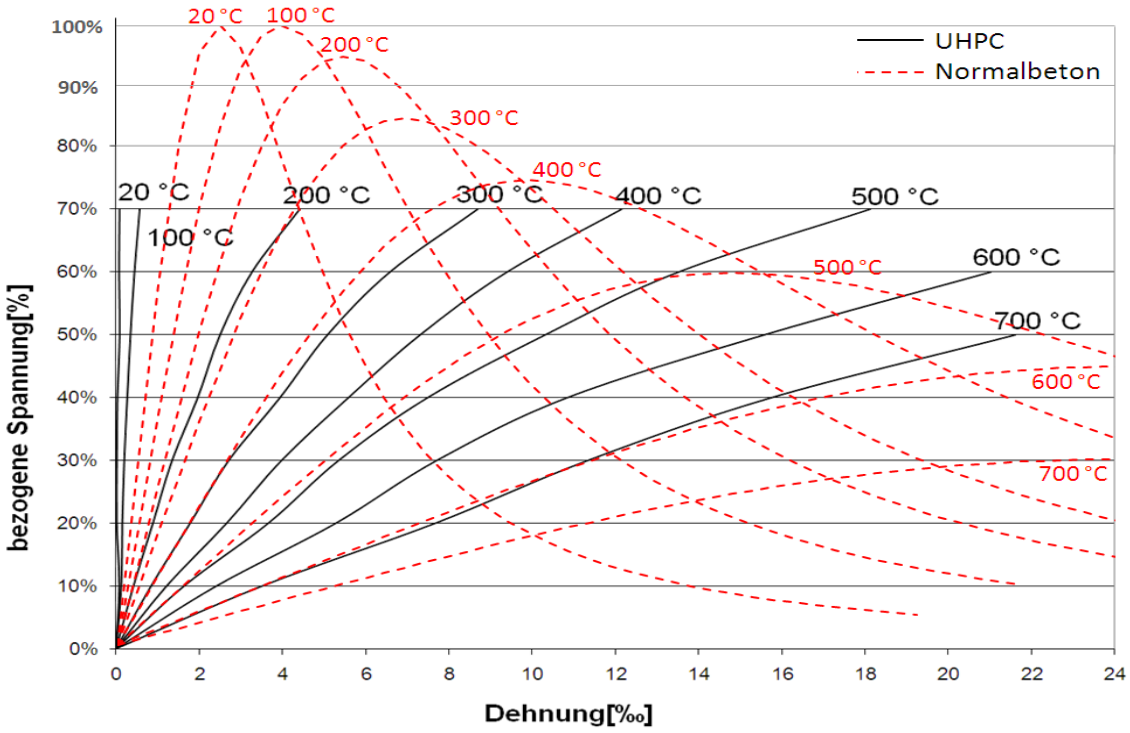


Bild 19 *Vergleich der temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien des B5Q mit den Rechenwerten für Normalbeton nach EC 2-1-2*

Es ist zu erkennen, dass bei den niedrigen Temperaturen bis 100 °C die Spannungs-Dehnungslinien für UHPC deutlich steifer sind als für Normalbeton. Mit zunehmender Temperatur bis etwa 400 °C werden die Spannungs-Dehnungslinien für den UHPC im Vergleich zum Normalbeton immer weicher. Bei 500 °C weisen beide Materialien in etwa die gleiche Steifigkeit auf. Bei weiter steigenden Temperaturen von mehr als 600 °C sind die Linien für UHPC wieder steifer als für Normalbeton. Bei dieser Betrachtung ist natürlich zu berücksichtigen, dass es sich bei der Spannungsausnutzung um auf die charakteristischen Festigkeiten bezogene Werte handelt.

AUSBLICK

Die experimentellen Arbeiten zu den thermischen und mechanischen Materialkennwerten werden bis Ende 2011 abgeschlossen. Darauf aufbauend werden Rechenmodelle für die temperaturabhängigen thermischen Materialkennwerte und vollständige mechanische Arbeitslinien entwickelt. Das thermo-mechanische Materialverhalten von UHPC soll in Anlehnung an Eurocode 2 Teil 1-2 in Form von temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungslinien beschrieben werden, die problemlos in die gebräuchlichen Computer-Programme zur Ermittlung des Last- und Verformungsverhaltens brandbeanspruchter Bauteile integriert werden können. Mit Hilfe eines um die entwickelten Rechenmodelle für das thermische und das thermo-mechanische Materialverhalten von ultra-hochfestem Beton erweiterten Computerprogramms wird dann eine Stütze für die Feuerwiderstandsdauer R90 bemessen und zur integralen Validierung durch Normbrandversuche im Realmaßstab überprüft.

Auf diese Grundlage können dann mit Hilfe des allgemeinen Nachweisverfahrens nach Eurocode 2 Teil 1-2 Bemessungshilfen für vereinfachte Rechenverfahren und Bemessungstabellen zum Nachweis brandbeanspruchter Bauteile aus ultra-hochfestem Beton erstellt werdenen. Diese Arbeiten, die nicht Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens sind, müssen zeitgleich mit den Ansätzen für die Bemessung und Konstruktion bei Raumtemperatur erstellt werden, um die Anwendung des ultra-hochfesten Betons im Hochbau mit Anforderungen an den Brandschutz zu ermöglichen und zu fördern.

DANK

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Forschungsprojektes „Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ermittlung und Optimierung des Brandverhaltens von ultra-hochfestem Beton“ im Schwerpunktprogramm 1182.

LITERATUR

[1] DIN EN 206-1: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Juli 2001

[2] Schuck, W.; Haack, A.; Richter, E.; Städing, A.: Baulicher Brandschutz bei Eisenbahntunneln mit einschaligem Tübbingausbau. Beitrag im Taschenbuch für den Tunnelbau 2011 der Deutsche Gesellschaft für Geotechnik.; VGE Verlag GmbH Essen; 2010

[3] Huismann, S.: Materialverhalten von hochfestem Beton unter thermomechanischer Beanspruchung; Dissertation Technische Universität Wien; 2010

[4] DIN EN ISO 22007-2: Kunststoffe - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit - Teil 2: Transientes Flächenquellenverfahren (Hot-Disk-Verfahren) (ISO 22007-2:2008); Deutsche Fassung FprEN ISO 22007-2:2011.

[5] Log, T.; Gustafsson, S.E.: Transient Plane Source (TPS) Technique for Measuring Thermal Transport Properties of Building Materials. Fire and Materials 19, S. 43-49, 1995.

[6] Jannsson, R.: Measurement of thermal properties at elevated temperatures – Brandforsk project 328-031. SP Fire Technology, SP Report 2004:46.

[7] Cavanaugh K. (Chair): Guide to Thermal Properties of Concrete an Masonry Systems. Report by ACI Committee 122, 2002.

[8] DIN EN 1992-1-2 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Dezember 2010

[9] DIN 51006: Produktabbildung - Thermische Analyse (TA) – Thermogravimetrie (TG) – Grundlagen; 2005-07.

[10] DIN 51007: Thermische Analyse (TA); Differenzthermoanalyse (DTA); Grundlagen; Ausgabedatum: 1994-06.

[11] Diederichs, U.; Jumppanen, U.-M.; Penttala, V.: Behaviour of high strength concrete at high temperatures. Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, Report 92.

[12] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C: Beton Brandschutz-Handbuch; 1. Auflage; Beton-Verlag GmbH; 1981

ERWEITERUNG DES CFD-MODELLS FDS FÜR SPEZIELLE BRANDSZENARIEN UND FRAGESTELLUNGEN

Volker Hohm
Ingenieurteam Trebes GmbH & Co. KG, Kiel
Dietmar Hosser
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

EINFÜHRUNG

Die Anwendung von numerischen Brandsimulationen zum Nachweis und zur Bewertung der Ausbreitung von Feuer und Rauch ist ein wesentlicher Bestandteil bei der Erstellung von Brandschutz- bzw. Sicherheitskonzepten, insbesondere im Bereich des schutzzielorientierten Vorgehens. Vor diesem Hintergrund wurde in den vergangenen Jahren der vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes erarbeitet, der die vorhandenen Möglichkeiten, Vorgehensweisen und Modelle darstellt und Hilfestellung für deren Anwendung gibt. Die verwendeten Programme bzw. Modelle müssen einerseits zuverlässige Ergebnisse liefern und andererseits effizient sein. Es ist daher unbedingt erforderlich, die vorhandenen Möglichkeiten de numerischen Brandsimulation stetig zu verbessern und zu erweitern, um den wachsenden Ansprüchen gerecht zu werden.

Insbesondere auf dem Gebiet des Wärmetransports, sowohl zwischen der Gasphase und der festen Phase als auch innerhalb der festen Phase, besteht in numerischen Brandsimulationen noch erheblicher Verbesserungsbedarf. Bislang lag der Schwerpunkt von Weiterentwicklungen hauptsächlich auf der Beschreibung der Gasphase sowie der Modellierung von Pyrolyse- und Verbrennungsvorgängen. Die physikalischen Prozesse des konvektiven Wärmeübergangs, insbesondere bei speziellen Konfigurationen wie Rohren oder Kanälen (z. B. Lüftungskanälen) sowie der mehrdimensionalen Wärmeleitung in Feststoffen wurden dagegen bisher nicht ausreichend berücksichtigt.

In diesem Beitrag wird über ein Forschungsvorhaben berichtet, in dem ein neues Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation entwickelt wurde. Das Modell ist in der Lage, einerseits den Prozess des konvektiven Wärmeübergangs zwischen Gasphase und fester Phase für horizontale und vertikale ebene Oberflächen sowie speziell für Rohr- und Kanalströmungen und andererseits den Prozess der dreidimensionalen Wärmeleitung in Baustrukturen und Objekten im Raum physikalisch korrekt abzubilden und entsprechende Ergebnisse auf dem Wege einer numerischen Simulation wiederzugeben. Das Modell wurde sowohl physikalisch, durch die Berücksichtigung der speziellen Brandwirkungen und -eigenschaften, als auch numerisch, durch die Auswahl geeigneter numerischer Methoden, für die integrierte Verwendung innerhalb von numerischen Brandsimulationen optimiert und exemplarisch in das international angewandte Brandsimulationsmodell Fire Dynamics Simulator in der gegenwärtig aktuellen Version 5 [1] integriert.

PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Die wesentlichen Probleme auf dem Gebiet der Brandsimulation lassen sich wie folgt zusammenfassen. Gegenwärtig ist die Berücksichtigung des Wärmetransfers auf die feste Phase sowie innerhalb dieser in numerischen Brandsimulationen nur sehr eingeschränkt möglich. Als feste Phase werden beispielsweise Bauteile oder Einbauten, wie etwa Lüftungskanäle, verstanden. Der Schwerpunkt von Weiterentwicklungen an den entsprechenden Programmen lag und liegt auch aktuell hingegen auf der Beschreibung der Gasphase sowie der Modellierung von Pyrolyse- und Verbrennungsvorgängen. Insbesondere für letztere Fragestellung ist jedoch die korrekte Bestimmung der Temperaturen an der Oberfläche und innerhalb der festen Phase eine grundsätzliche Voraussetzung. Die gegenwärtig vorhandenen Möglichkeiten in den Bereichen konvektiver Wärmeübergang und Wärmeleitung sind für viele Aufgabenstellungen nicht ausreichend. Es ist insbesondere eine direkte gegenseitige Kopplung von Gasphase und fester Phase für beide Teilsysteme eine unbedingt erforderliche Grundlage, um ein möglichst zutreffendes Abbild des in der Realität ablaufenden Brandgeschehens in der numerischen Simulation zu gewährleisten.

Hieraus ergaben sich die wesentlichen Ziele dieser Arbeit, welche im Folgenden diskutiert werden sollen. Einerseits war es zwingend erforderlich, eine Verbesserung der Modellierung von konvektivem Wärmeübergang zwischen Fluid-/Gasphase und fester Phase zu erlangen. Ziel dieser Arbeiten war es, u. a. auch besonderer Situationen in einem Brandszenario, wie sie beispielsweise bei Lüftungskanälen auftreten, adäquat berücksichtigen zu können. Andererseits waren Arbeiten zur Ertüchtigung der Modellierung von Wärmeleitung in der festen Phase innerhalb von Brandsimulationsrechnungen vordringlich notwendig. Die mehrdimensionale Betrachtung komplex aufgebauter Objekte war hier ebenso von maßgeblicher Bedeutung wie insbesondere die Interaktion von Gasphase und fester Phase in beiden Richtungen, d. h. einschließlich der Rückkopplung der zuvor genannten thermischen Prozesse auf das Brandgeschehen. Diese wichtige Kopplung zwischen Gasphase und (detaillierter) fester Phase ist eine wesentliche Weiterentwicklung auf dem Gebiet der numerischen Brandsimulation.

In der Gesamtheit ergibt sich hieraus das entwickelte und in [2] veröffentlichte Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation bestehend aus einem Modell für konvektiven Wärmeübergang und einem Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung. Als wesentliche Merkmale des Modells lassen sich Folgende festhalten. Es ist sowohl physikalisch als auch numerisch für die integrierte Verwendung innerhalb von numerischen Brandsimulationen optimiert. Physikalisch bedeutet insbesondere die Berücksichtigung der speziellen Brandwirkungen und -eigenschaften, beispielsweise temperaturabhängige Materialeigenschaften oder das vorhandene Brandraumfluid; numerisch bedeutet insbesondere die Auswahl geeigneter numerischer Methoden. Die Entwicklung wurde durchgeführt mit dem Blick auf die Parallelisierbarkeit des Modells. Überdies bildet das entwickelte Wärmetransportmodell die Grundlage für die spätere Erweiterung um geeignete Pyrolysemodelle und wurde exemplarisch in

den Code „Fire Dynamics Simulator“ (FDS) in der gegenwärtig aktuellen Version 5 ein dem aktuellen Stand der Technik entsprechendes Brandsimulationsprogramm integriert. Die Einzelheiten des Modells werden zu einem späteren Zeitpunkt noch detaillierter dargestellt. Im Folgenden soll zunächst ein kurzer Überblick über den gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse im Bereich Brandsimulation gegeben werden.

STAND DER ERKENNTNISSE

Generell unterscheidet man, abgesehen von Handformeln, zwischen Zonenmodellen und Feld- bzw. CFD-Modellen. Wie Bild 1 zeigt, erlauben Zonenmodelle (z. B. HARVARD VI, CFAST) eine vergleichsweise schnelle Berechnung von einfachen Szenarien, während CFD-Modelle (z. B. FDS, ISIS, Fluent, CFX) insbesondere für komplexe Szenarien eingesetzt werden. Mit fortschreitender Entwicklung in allen Bereichen ist davon auszugehen, dass der bislang größte Nachteil von CFD-Modellen, nämlich die vergleichsweise längere Rechenzeit, zukünftig deutlich verringert werden kann.

Insbesondere erforderlich sind die speziellen, für die numerische Simulation von Brandereignissen eminent wichtigen Submodelle, wie beispielsweise ein Pyrolysemodell. Allgemeine CFD-Codes wie CFX oder FLUENT besitzen diese jedoch im Gegensatz zu speziell auf die Simulation von Brandgeschehen ausgerichteten CFD-Modellen wie FDS nicht bzw. nur in deutlich eingeschränkterem Umfang. Daher sind in der Regel die Vorgabe und die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Wärmefreisetzung erforderlich. Dies ist zukünftig aufzugeben und durch entsprechende Verbrennungs-/Pyrolysemodelle zu ersetzen. Das bedeutet, der zeitliche Verlauf der Wärmefreisetzung ergibt sich direkt durch das Brandszenario, womit eine echte Prognose eines Brandes bzw. eine realitätsgerechte Modellierung erst möglich wird. Das erarbeitete Wärmetransportmodell stellt wie bereits erwähnt konsequenterweise die Grundlage für die spätere Erweiterung um geeignete solcher Pyrolysemodelle bereit.

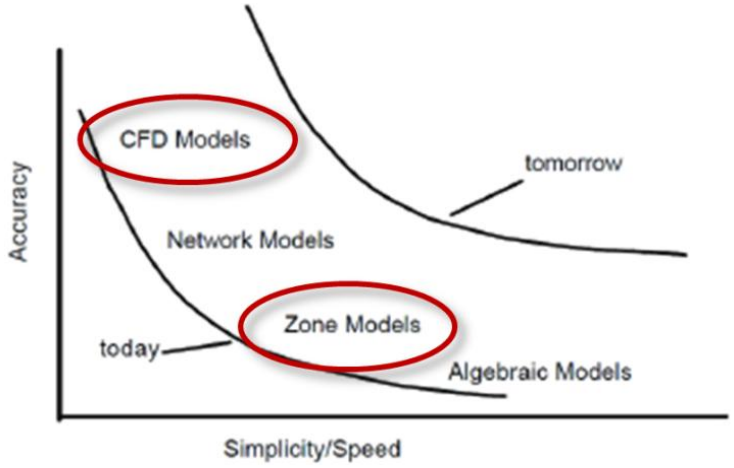


Bild 1: Hierarchie von Brandsimulationsmodellen [3]

Ein ebenfalls bedeutsamer physikalischer Vorgang bei der numerischen Brandsimulation ist der konvektive Wärmeübergang zwischen Gasphase und fester Phase. Zonenmodelle haben in diesem Bereich per Definition Schwierigkeiten, da sie unter anderem keine Geschwindigkeitsfelder lösen. Für CFD-Modelle besteht diese Einschränkung nicht, sodass der konvektive Wärmeübergang dort abhängig ist von der Art, wie gasphasenbezogene Größen bestimmt werden. Zukünftig ist verstärkt der Einsatz des Large Eddy Simulation (LES)-Verfahrens zu erwarten. Aktuell findet dieses bereits eine sehr breite Anwendung. Allerdings werden bei dieser Art der Gasphasenmodellierung Vereinfachungen gemacht, die es nicht mehr erlauben, den konvektiven Wärmeübergang direkt aus den in der Gasphase berechneten Größen zu bestimmen, wie dies bei der DNS der Fall ist. Es sind hier Submodelle erforderlich, die sich beispielsweise aus empirischen Korrelationen (z. B. Nusselt-Beziehungen) entwickeln lassen. Die derzeitige Modellierung des konvektiven Wärmeübergangs in Brandsimulationen ist unzureichend bzw. in einigen Bereichen sogar fehlerhaft. Es ist daher ein Modell bzw. eine Vorgehensweise erforderlich, um einerseits ebene Oberflächen korrekt und andererseits besondere Elemente bzw. Konfigurationen adäquat abbilden zu können.

Ein weiterer bedeutsamer physikalischer Vorgang bei der numerischen Brandsimulation ist die Wärmeleitung oder auch Konduktion innerhalb der festen Phase. Bislang wurde beispielsweise den Umfassungsbauteilen wenig Aufmerksamkeit gewidmet, da sie lediglich in ihrer Funktion als Randbedingung für die Gasphase betrachtet wurden. Demzufolge wurden bislang lediglich globale Energiebetrachtungen oder eine eindimensionale Wärmeleitungsberechnung durch die homogene oder in Dickenrichtung geschichtete („multi-layer“) feste Phase durchgeführt. Problematisch werden diese Betrachtungsweisen jedoch insbesondere dann, wenn mehrdimensionale Effekte zugrunde liegen, wie dies beispielsweise bei Rahmenecken oder mehrseitig brandbeanspruchten Bauteilen (z. B. Stützen) der Fall ist. Es ist demzufolge ein Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung („multi-cuboid“) erforderlich. Der gegenwärtig propagierte Weg sieht in diesem Bereich die Bestimmung von Übergabegrößen für eine nachgelagerte thermische Analyse mit separaten Programmen vor, welcher jedoch eine Vielzahl an Nachteilen mit sich bringt. So entsteht damit ein erhöhter Modellierungsaufwand und es fehlt die bereits genannte Rückkopplung, die jedoch beispielsweise bei Pyrolyse- oder Wärmedurchgangsprozessen zwingend notwendig ist. Es ist demnach unbedingt ein in den Brandsimulationscode integriertes Modell erforderlich.

EIN NEUES MODELL FÜR GEKOPPELTE WÄRMETRANSPORTPROZESSE BEI BRÄNDEN

Modell für konvektiven Wärmeübergang zwischen fester Phase und Gasphase

Den ersten Teil des Wärmetransportmodells bildet das Modell für konvektiven Wärmeübergang zwischen fester Phase und Gasphase. Dieser Baustein bildet das Fundament des Wärmetransportmodells für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation, da es die wichtige Kopplung zwischen Gasphase und (detaillierter) fester Phase herstellt. Wie bereits angedeutet, sind beispielsweise für die LES (Large Eddy Simulation), welcher zumindest kurz- und mittelfristig die Zukunft im Bereich der numerischen Simulation von Bränden mit großen Volumina gehören wird, hierbei eine alternative Vorgehensweise, wie sie im Rahmen der Arbeit verwendet und weiterentwickelt wurde, und der Einsatz von Submodellen erforderlich. Die physikalische Grundlage bildet die Grundgleichung zur Bestimmung der konvektiven Wärmestromdichte (1).

$$\dot{q}_{konv} = \alpha \cdot \left(\vartheta_{Fluid} - \vartheta_{Oberfläche} \right) \tag{1}$$

Da die beiden Temperaturen ϑ_{fluid} aus dem CFD-Code und $\vartheta_{Oberfläche}$ aus dem später dargestellten Wärmeleitungsmodell entnommen werden können, lässt sich das Problem auf eine Bestimmung des sogenannten Wärmeübergangskoeffizienten α reduzieren. Dieser Koeffizient ist dabei insbesondere abhängig von der Art der Konvektion, der Art der Strömung, sowie der Geometrie bzw. Konfiguration und zusätzlich eine Funktion von beispielsweise Temperatur(-differenz), Geschwindigkeit, Ort und Fluid. Die Bestimmung von α kann, wie bereits erwähnt, durch empirische Ansätze, z. B. nach Nusselt und McAdams, erfolgen. Da diese bereits vielfach erfolgreich überprüft sind, wurde ein hierauf aufbauendes Modell erarbeitet. Darüber hinaus ist auf diese Art ein analoges Vorgehen für andere Konfigurationen in gleicher Weise möglich.

Als wichtige Eigenschaften des Modells lassen sich festhalten, dass für die vorliegende Aufgabenstellung das Fluid im Brandraum äquivalent zu „normaler“ Luft angenommen werden kann. Dies wurde in der Arbeit erfolgreich nachgewiesen, sodass im Rahmen des Modells „normale“ Luft als betrachtetes Fluid bzw. die entsprechenden, temperaturabhängigen Stoffwerte verwendet werden können. Ferner sind wie in den meisten technischen Anwendungen auch hier turbulente Strömungsverhältnisse maßgebend. Einen zentralen Baustein bildet das erarbeitete „Konzept der Relokalisierung“. Dieses wurde auf Grundlage geeigneter Kriterien entwickelt, da die beiden bestehenden Vorgehensweisen – lokal und gemittelt – für die vorliegende Aufgabenstellung nicht geeignet sind. Bild 2 zeigt den Grundgedanken dieses Konzeptes. Durch Verwendung lokaler Größen, wie etwa den Stoffwerten des Fluids, ist eine teilweise Rückführung des für technische Fragestellungen gemittelten Verlaufs hin zur lokalen Kurve, die dem real vorhandenen Kurvenverlauf angelehnt ist, möglich. Dies gilt gleichermaßen für den Wärmeübergangskoeffizienten wie auch die konvektive Wärmestromdichte.

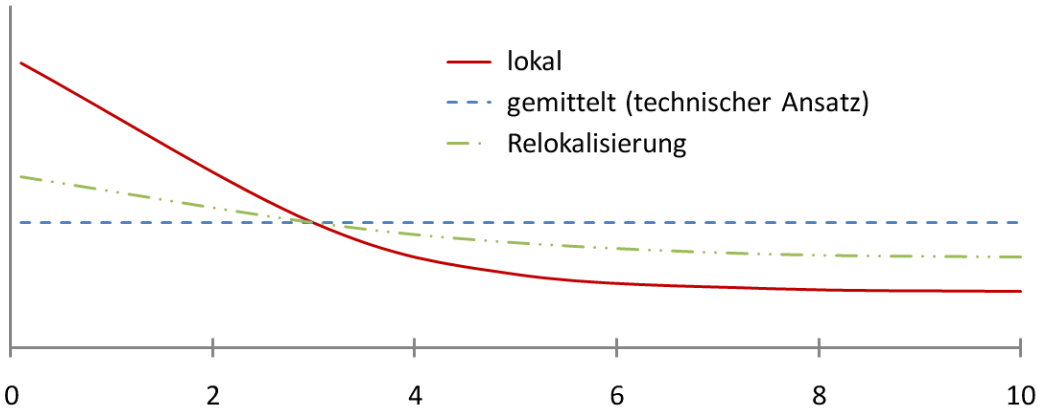


Bild 2: „Konzept der Relokalisierung“ – Grundgedanke

Im Modell werden einerseits horizontale und vertikale ebene Oberflächen und andererseits als Sonderform Rohr- bzw. Kanalströmungen behandelt. Bei den ebenen Oberflächen ist zu berücksichtigen der freie konvektive Wärmeübergang, im Modell nach den Korrelationen von McAdams, sowie der erzwungene konvektive Wärmeübergang nach Petukhov/Popov und Nusselt. Das gleichzeitige Auftreten von freiem und erzwungenem konvektivem Wärmeübergang wird als Mischkonvektion bezeichnet und im Modell entsprechend abgebildet. Bei den Rohr- bzw. Kanalströmungen, d. h. insbesondere Lüftungskanälen, kann man üblicherweise von Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 6 und 12 m/s ausgehen, sodass einerseits keine reine freie Konvektion auftritt bzw. andererseits keine Vernachlässigbarkeit der erzwungenen Konvektion aufgrund der Luftströmung erlaubt ist. Der erzwungene konvektive Wärmeübergang wird hier nach Gnielinski berücksichtigt. Eine Mischkonvektion in horizontalen Kanälen ist allgemein vernachlässigbar [4]. Die Vernachlässigbarkeit in vertikalen Kanälen wurde mittels geeigneter Abgrenzungskriterien nach Jackson/Hall in [2] belegt. Zusätzlich zu den Bedingungen bei den maßgebenden turbulenten Strömungsverhältnissen wurden Ansätze für laminare Strömungen sowie den dazwischenliegenden Übergangsbereich entwickelt.

Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung

Die physikalische Grundlage für das mehrdimensionale Wärmeleitungsmodell bildet die Wärmeleitungsgleichung, wie sie in (2) – aufgrund der Betrachtung der festen Phase bereits ohne konvektive Anteile – in allgemeiner Form angegeben ist. Es handelt sich dabei um eine partielle Differenzialgleichung, parabolisch in der Zeit und elliptisch im Raum, die ein Anfangs-Randwertproblem beschreibt.

$$\rho c \frac{\partial \vartheta}{\partial t} - \nabla \cdot \lambda \nabla \vartheta = \dot{s} \tag{2}$$

Es sind aufgrund der parabolischen Art in der Zeit eine Anfangsbedingung zum Zeitpunkt t = 0 und aufgrund der elliptisch Art im Raum zwei Randbedingungen

je Koordinatenrichtung, d. h. hier im kartesischen System sechs, Randbedingungen zu formulieren. Letztere werden gebildet durch Randbedingungen an Begrenzungsflächen des Gebiets der festen Phase – dort wird u. a. der konvektive Wärmeübergang zwischen Gasphase und fester Phase berücksichtigt – und Übergangsbedingungen an Berührungsflächen von verschiedenen Objekten der festen Phase.

Für die numerische Berechnung ist eine Approximation dieser analytischen Gleichungen erforderlich und zwar einerseits zeitlich und andererseits räumlich. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt dabei mittels eines expliziten Euler-Verfahrens. Im Rahmen der Arbeit wurde erfolgreich gezeigt, dass der Zeitschritt in einer CFD-Brandsimulation Δt_{CFD} i. d. R. bereits so klein ist, dass das Stabilitätskriterium keine bedeutsame Rolle mehr spielt und die Effizienz des gewählten Verfahrens überwiegt. Auf Grundlage dessen wurde diesem Verfahren der Vorzug gegenüber den anderen untersuchten Verfahren gegeben. Die räumliche Diskretisierung erfolgt im entwickelten Modell mittels Finite-Volumen-Methode (FVM). Der besondere Vorteil der FVM ist die (Fluss-)Konservativität des Verfahrens, weshalb es den Vorzug gegenüber den anderen untersuchten numerischen Verfahren erhielt. Das zu berechnende Gebiet wird dabei in eine Vielzahl an Kontrollvolumina zerlegt und effizient gelöst. Die zu lösende Modellgleichung für die Temperatur im Punkt oder auch Knoten P bzw. dem durch diesen Punkt repräsentierten Kontrollvolumen ergibt sich dann gemäß (3) [5]. Hierbei enthält der Term „b“ den Quellterm, d. h. Wärmequellen/-senken.

$$\vartheta_P = \frac{1}{a_P^0}\left(b + \sum_{NB} a_{NB} \vartheta_{NB}^0 \right) \tag{3}$$

Die Lösung des gesamten Problems erfolgt schlussendlich durch ein sukzessives Abarbeiten universeller Einheiten sogenannten *Cells* („*Cell-by-Cell*-Konzept“). In FDS entspricht diese *Cell* beispielsweise einer einzelligen Obstruction.

Für den Einsatz in Brandsimulationen ist es ferner erforderlich, die Stoffwerte oder Materialeigenschaften einerseits ortsabhängig, andererseits aber auch als Funktion der Temperatur zu beschreiben, da viele Materialien in den im Brandschutzingenieurwesen auftretenden Temperaturbereichen signifikante Veränderungen in ihren thermischen Eigenschaften aufweisen. Im Modell erfolgt dies an Materialgrenzen vorteilhaft und realitätsgerecht durch eine harmonische Mittelung der Wärmeleitfähigkeiten. Neben den Formulierungen für das Gebiet sind auch die Ränder durch entsprechende Randbedingungen im numerischen Modell abzubilden. Hierzu wurden drei Arten von Randbedingungen vorgesehen. Diese sind konstante Oberflächentemperatur und konstante Wärmestromdichte, die im Wesentlichen für die Modellbildung (z. B. an Rändern des CFD-Modells) und Diagnosezwecke gedacht sind. Die dritte Randbedingung ist die physikalisch in der Realität auftretende Wärmestromdichte aus Konvektion und Strahlung infolge eines Brandes nach (4).

$$\dot{q}_{net}(t) = \dot{q}_{rad}(t) + \dot{q}_{konv}(t) \tag{4}$$

In Ergänzung wurde das entwickelte Modell mit den entsprechenden Algorithmen zur Berücksichtigung von Wärmequellen/-senken versehen. Wie bereits erwähnt, dient dies der späteren Integration von Pyrolysemodellen. Ferner ist das Modell in der Lage, thermische Kontaktwiderstände zwischen einzelnen Körpern oder Materialien zu berücksichtigen.

ÜBERPRÜFUNG DES MODELLS

Im Weiteren soll nun auf die Überprüfung des Modells eingegangen werden. Das Modell bzw. seine Bestandteile und Funktionen wurden einer schrittweisen Prüfung vom Simplen hin zum Komplexen unterzogen. Durch Parametervariationen wurde ferner das Grenzverhalten des Modells untersucht. Im Folgenden sollen vier bedeutsame Beispiele und die dabei erzielten Ergebnisse kurz vorgestellt werden.

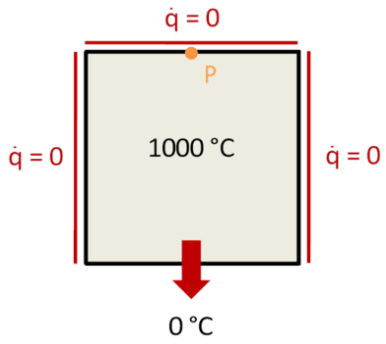


Bild 3: Modellaufbau für das Überprüfungsbeispiel aus dem NA zum EC 1-1-2 [6]

Das erste Beispiel behandelt den Wärmetransport mit Berücksichtigung des konvektiven Wärmeübergangs und ist dem Nationalen Anhang zum Eurocode 1-1-2 [6] entnommen. Wie die Darstellung zeigt, handelt es sich um einen dreiseitig- (bzw. fünfseitig-) adiabatisch-gelagerten Körper mit einer Anfangstemperatur von 1000 °C, der sich über die verbleibende Oberfläche durch konvektiven Wärmeübergang an der Luft (0 °C) abkühlt. Die Eigenschaften des Materials (λ = 1,0 W/mK; ρ = 1000 kg/m³; c = 1,0 J/kgK) sowie der Wärmeübergangskoeffizient (α = 1,0 W/m²K) sind durch fiktive Werte angegeben. Berechnet werden soll die Temperatur am Punkt P (vgl. Bild 3).

Das Resultat ist in Tabelle 1 für verschiedene Zeitpunkte der analytischen Lösung gegenübergestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der jeweiligen Werte innerhalb der im Nationalen Anhang angegebenen Grenzen, sodass das Modell für Anwendbarkeit im Rahmen der Eurocodes (thermische Analyse) geeignet ist.

Tabelle 1 Ergebnisse der Vergleichsrechnung mit dem NA-Beispiel

Zeit [s]	$\vartheta_{P,analytisch}$ [°C]	$\vartheta_{P,numerisch}$ [°C]	Abweichung [‰]
60	999,3	999,3	0,0
300	891,8	891,7	0,1
600	717,7	717,5	0,3
900	574,9	574,8	0,1
1200	460,4	460,3	0,3
1500	368,7	368,6	0,2
1800	295,3	295,2	0,2

Das zweite Beispiel behandelt den instationären, mehrdimensionalen Wärmetransport mit konvektivem und radiativem Wärmeübergang. Unterstellt wird das Naturbrandszenario eines Zimmerbrandes und betrachtet wird ein Würfel aus Stahl (sehr gute Wärmeleitungseigenschaften) und Beton (schlechte Wärmeleitungs- aber gute Wärmespeicherungseigenschaften).

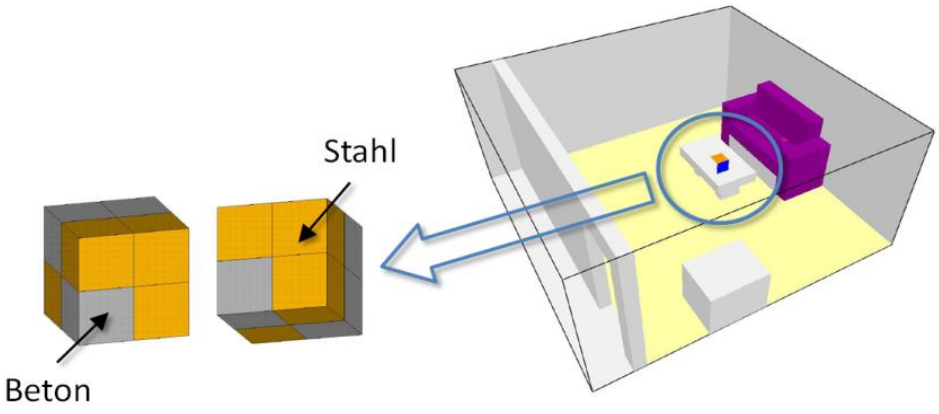


Bild 4: Realitätsnahes Brandszenario eines Zimmerbrandes in FDS5

Bild 4 zeigt das Szenario und die Konfiguration. Die Materialeigenschaften wurden den entsprechenden Teilen der Eurocodes 2 [7] bzw. 3 [8] entnommen. Als Randbedingung dient die real auftretende Wärmestromdichte infolge Konvektion und Strahlung. Die Ergebnisse werden mit den Ergebnissen einer ANSYS [9]-Rechnung verglichen. Die Ergebnisse beider Berechnungen sind entlang zweier Achsen durch den Körper für verschiedene Zeitpunkte in Bild 5 dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der jeweiligen Werte. Darüber hinaus werden sowohl die Randbereiche (linke Bildhälfte) als auch Materialwechsel (rechte Bildhälfte) vom Modell korrekt wiedergegeben.

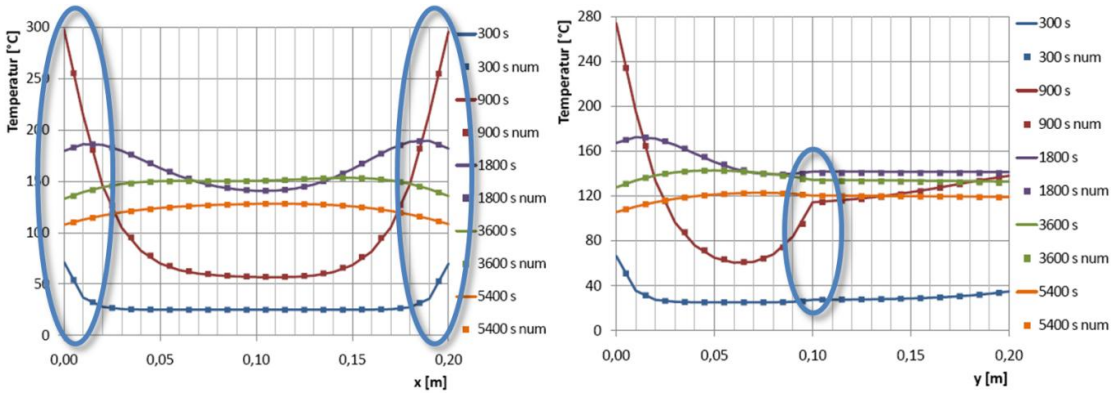


Bild 5: Ergebnisse mit konvektivem und radiativem Wärmeübergang

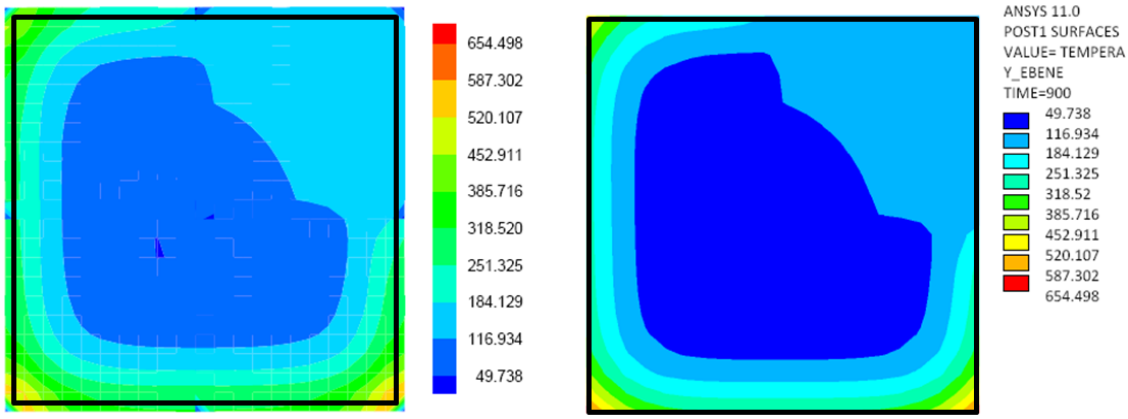


Bild 6: Ergebnisse des Modells und der Kontrollrechnung (15 min)

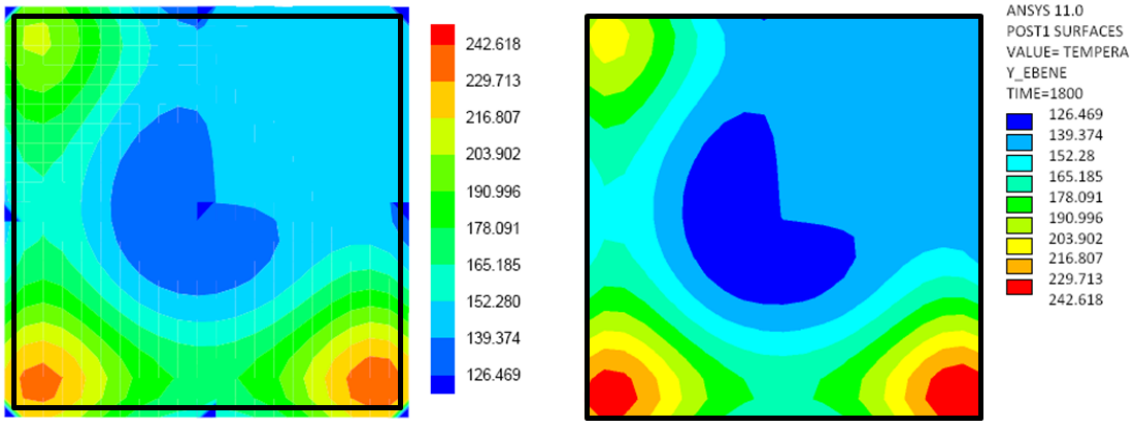


Bild 7: Ergebnisse des Modells und der Kontrollrechnung (30 min)

Bild 6 und 7 zeigen einen Schnitt durch den Körper nach 15 bzw. 30 Minuten. Jeweils links die Ergebnisse des entwickelten Modells und rechts die Ergebnisse der Vergleichsrechnung, die schwarze Linie kennzeichnet dabei den geometrischen Rand des Körpers. Es zeigt sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung.

Im dritten Beispiel wird die Richtigkeit des Modells bei Vorhandensein einer Wärmequelle bzw. -senke überprüft. Wie Bild 8 zeigt, wird hierzu eine Wärmequelle im Zentrum eines adiabatisch gelagerten Betonwürfels – temperaturabhängige Materialeigenschaften nach Eurocode 2 [7] – platziert. Die Entwicklung der temperaturabhängigen Leistungsdichte der Wärmequelle folgt dabei einem Arrhenius-Ansatz. Dieser Ansatz wird in der Praxis häufig für die Beschreibung von Pyrolysemodellen verwendet. Die Ergebnisse werden wie zuvor mit denen einer ANSYS [9]-Berechnung verglichen.

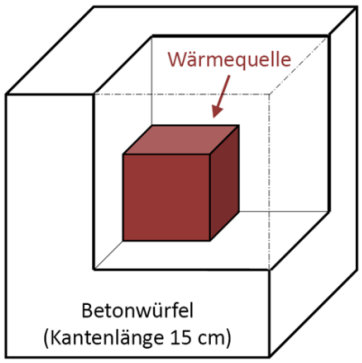


Bild 8: Struktur für das Überprüfungsbeispiel mit Wärmequelle

Die Ergebnisse beider Berechnungen sind – aufgrund der Symmetrie – bis zum Mittelpunkt des Körpers für verschiedene Zeitpunkte in Bild 9 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der jeweiligen Werte mit weniger als 3 % Abweichung. Damit ist die korrekte Berücksichtigung einer Wärmequelle/-senke insbesondere mit Arrhenius-Ansatz innerhalb des Modells bestätigt und folgerichtig eignet sich das entwickelte Modell auch zur Modellierung von Pyrolysemodellen.

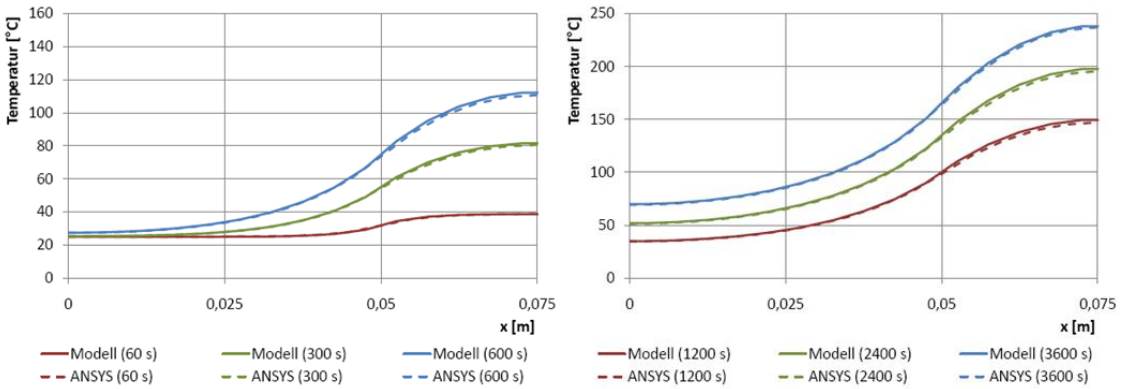


Bild 9: Ergebnisse bei einer Wärmequelle in Anlehnung an ein Pyrolysemodell

Im letzten Beispiel wird der konvektive Wärmeübergang bei einer Rohr-/Kanalströmung untersucht. Das Szenario besteht aus einem Lüftungskanal (l x b x h 10 m x 50 cm x 50 cm), der turbulent durchströmt wird (v_{Luft} = 6 m/s). Die Temperatur der zuströmenden Luft beträgt ϑ_{gas} = 150 °C und die (konstante) Ober-

flächentemperatur $\vartheta_{gas} \pm 50$ °C. Auf diese Weise können beide Fälle „Heizung des Fluids“ und „Kühlung des Fluids“ untersucht werden. Die erzielten Ergebnisse werden mit den beiden existierenden, validierten empirischen Ansätzen verglichen. Diese sind die lokale Vorgehensweise und die gemittelte Vorgehensweise. Letztere wird, wie bereits erwähnt, in der Praxis häufig verwendet (technischer Ansatz). Die Ergebnisse sind entlang der Kanalachse in Bild 10 (Heizung) und 11 (Kühlung) dargestellt. Es zeigt sich sowohl für den Wärmeübergangskoeffizienten als auch die konvektive Wärmestromdichte, dass das Konzept der Relokalisierung einwandfrei funktioniert. Darüber hinaus führen auch die Bilanzierung der übertragenen Wärmeströme und deren Vergleich zu einer guten Übereinstimmung [2].

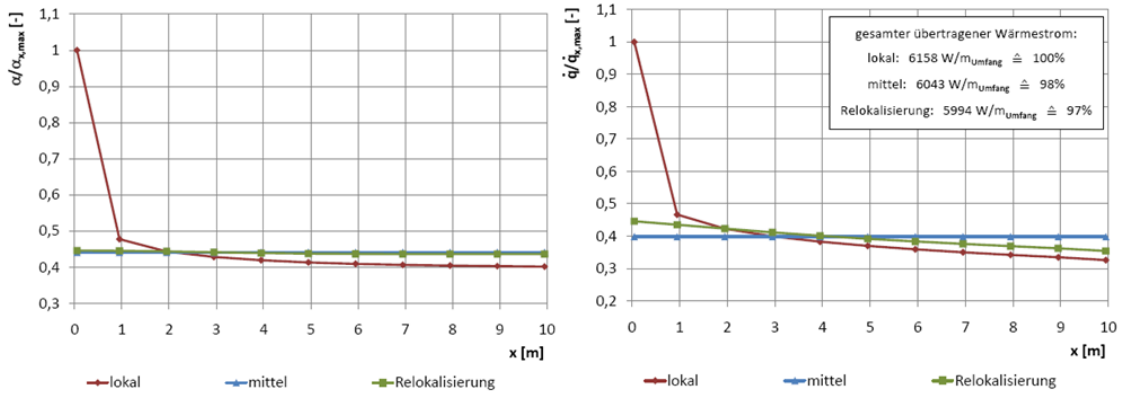


Bild 10: Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten und der der konvektiven Wärmestromdichte entlang des Kanals (normiert) – „Heizung des Fluids“

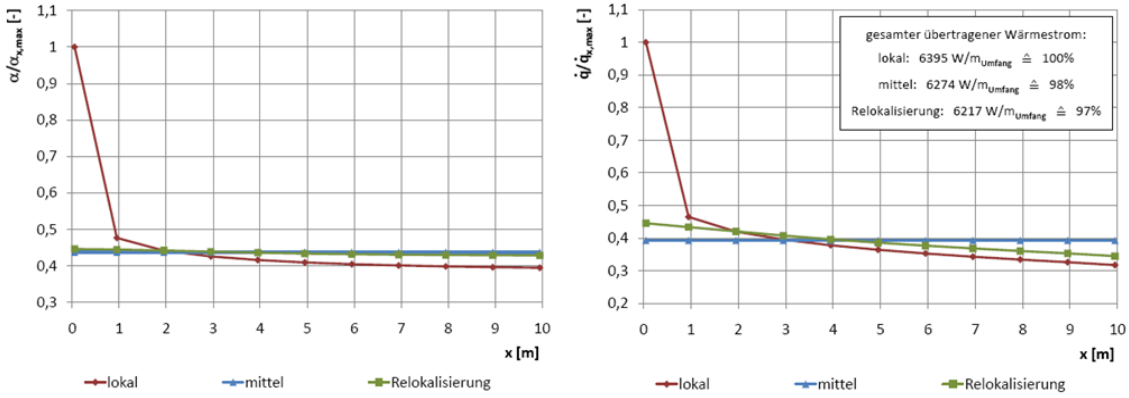


Bild 11: Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten und der der konvektiven Wärmestromdichte entlang des Kanals (normiert) – „Kühlung des Fluids“

Das Modell für konvektiven Wärmeübergang zwischen Gasphase und fester Phase bzw. der erarbeitete Ansatz ist damit als geeignet und richtig zu bezeichnen. Analoges gilt nach der erfolgreich durchgeführten Überprüfung auch für das Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung und abschließend auch folgerichtig für das gesamte entwickelte Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation.

ANWENDUNG DES MODELLS

Im Folgenden wurde das entwickelte und überprüfte Modell auf ein praxisnahes Brandszenario angewendet. Untersucht werden sollte dabei ein Brand in einem Lagerraum für Isolationsplatten aus PS-Hartschaum. Der in Bild 12 dargestellte Bemessungsbrand konnte mit Hilfe von [10] ermittelt werden und hat bei einer angenommenen Brandfläche von 2,0 m x 0,7 m = 1,4 m² und einer Stapelhöhe von 4,0 m eine maximale Wärmefreisetzungsrate von 4,22 MW bei einer Gesamtbranddauer von 1200 s [2].

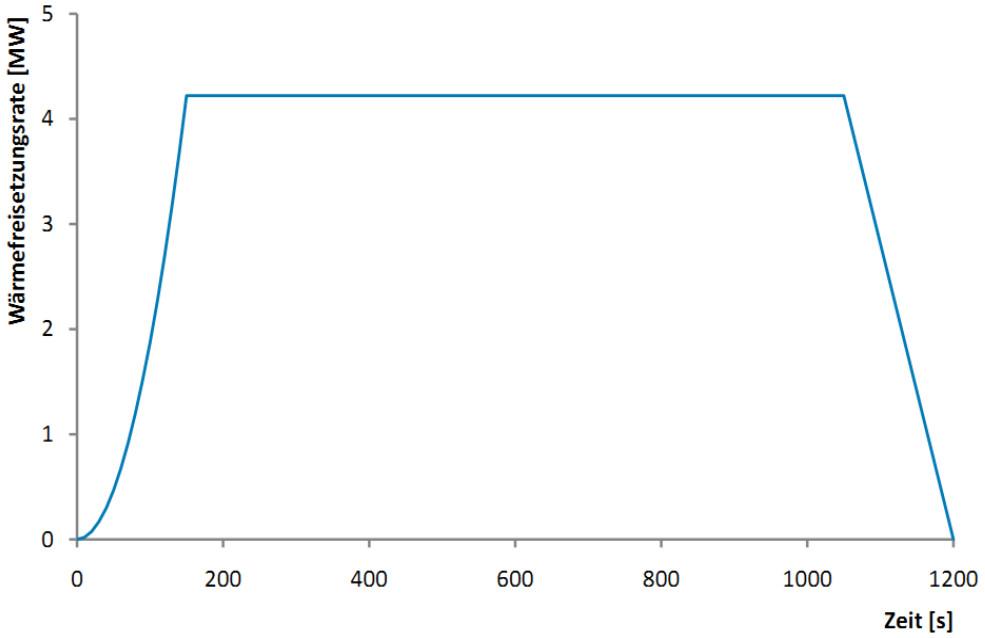


Bild 12: Zeitlicher Verlauf des natürlichen Bemessungsbrandes

Dabei wird ein als Lüftungskanal umgenutzter Stahlbetonkanal (quadratischer Innenquerschnitt 40 cm x 40 cm; Wandstärke 100 mm) betrachtet, der einen Brandabschnitt in horizontaler Richtung überbrückt und einen weiteren, sich anschließenden Brandabschnitt belüftet. Bild 13 zeigt einige Ansichten des verwendeten Modells. Zusätzlich befindet sich im Brandraum ein komplexes Stabobjekt mit unsymmetrischem Aufbau und thermisch stark unterschiedlichen Materialien (u. a. PVC), welches beispielsweise ein elektrisches Kabel repräsentieren könnte.

Unter anderem aufgrund der Naturbrandbeanspruchung sowie der Konstruktionen von Kanal und Wand (Dicke 10 cm) ist hier ein schutzzielorientiertes Vorgehen unter der Verwendung von Ingenieurmethoden (numerischen Methoden) erforderlich. Die Fragestellung des schutzzielorientierten Vorgehens ist bzw. könnte sein:

Ist die Wandungsstärke des Kanals ausreichend, um die thermische Belastung im Nachbarraum/-brandabschnitt innerhalb erforderlicher Grenzwerte zu gewährleisten?

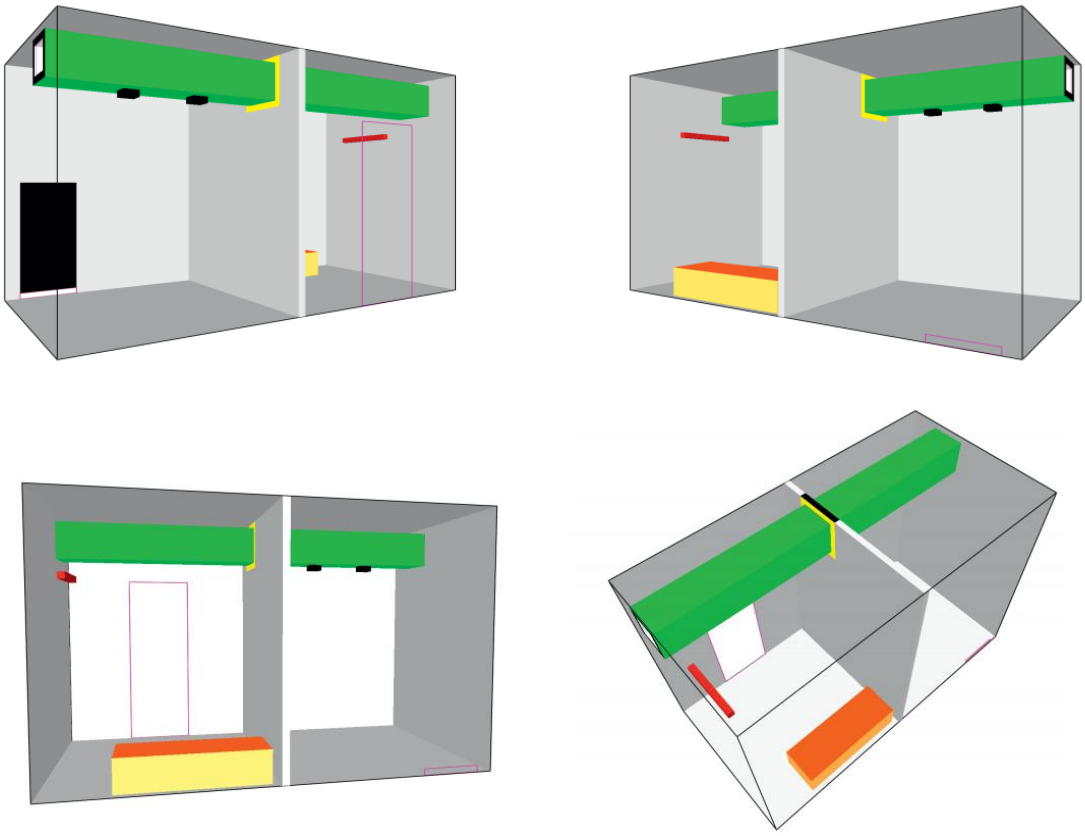


Bild 13: Ansichten des Modells für die numerischen Simulationen

Die Frage lässt sich aufgrund der numerischen Simulation eindeutig bejahen. Zudem bestünde die Möglichkeit zu einer Reduktion der Wandungsstärke. Ferner lassen die Ergebnisse erkennen, dass die übergeordneten Mechanismen korrekt erfasst werden. Die Temperaturverteilung und -entwicklung im Stabobjekt werden vom Modell einwandfrei wiedergegeben. Es wird deutlich, dass lediglich ein dreidimensionales Wärmetransportmodell in der Lage ist, die auftretenden Effekte korrekt wiederzugeben (vgl. Bild 14 und 15).

Weitere Ergebnisse, insbesondere auch zum Modell für konvektiven Wärmeübergang, sind in [2] enthalten und wurden dort analysiert.

Über dieses praxisnahe Brandszenario hinaus wurde das entwickelte und überprüfte Modell sehr erfolgreich auf reale Brandversuche im Bereich kerntechnischer Anlagen angewendet, die im Rahmen des internationalen OECD/PRISME Projektes durchgeführt wurden. Einzelheiten zu dem Projekt bzw. den Versuchen können den Berichten des OECD/PRISME Projektes entnommen werden. Aufgrund der Veröffentlichungsbestimmungen innerhalb des internationalen Projektes ist eine Darstellung der Versuchsdaten sowie der Ergebnisse, die mit dem entwickelten Modell erzielt wurden, gegenwärtig nicht möglich. Eine Verteilung kann ggf. bei entsprechender Anfrage an die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bereich Projektträger (Reaktorsicherheitsforschung)) erfolgen; die entsprechenden Informationen sind in [11] enthalten.

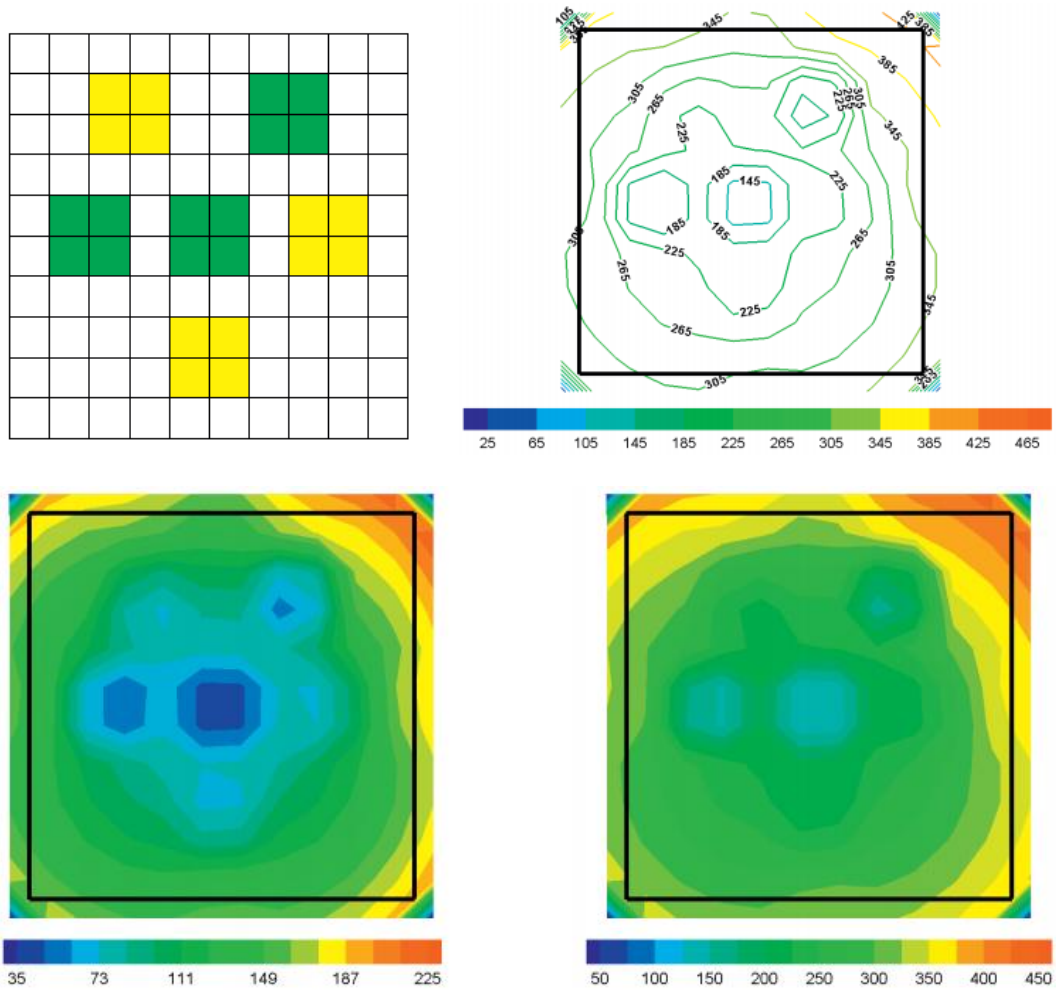


Bild 14: Temperaturen im Querschnitt zu verschiedenen Zeitpunkten (Isothermen nach 540 s; Temperaturverteilungen nach 300 s bzw. 540 s)

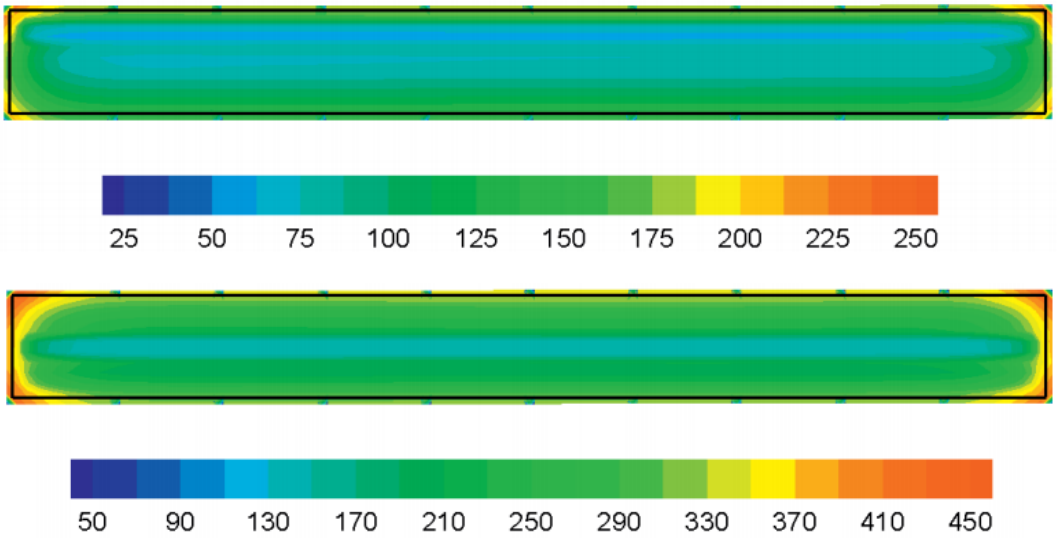


Bild 15: Temperaturen im Längsschnitt (300 s bzw. 540 s)

ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Innerhalb der Zusammenfassung soll zunächst eine Analyse von Mehrwert gegenüber Mehraufwand durchgeführt werden. Allgemein lässt sich für ingenieurgemäße Verfahren und Methoden festhalten, dass ein Mehraufwand dann gerechtfertigt ist, wenn damit auch ein Mehrwert verbunden ist. In Bezug auf das Modell für konvektiven Wärmeübergang zwischen Gasphase und fester Phase lassen sich die wesentlichen Mehrwerte wie folgt zusammenfassen. Es können nunmehr ebene Oberflächen unabhängig von ihrer Orientierung korrekt berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist erstmals eine realitätsgerechte und physikalisch einwandfreie Berücksichtigung von Sonderformen des konvektiven Wärmeübergangs, d. h. hier Rohr-/Kanalströmungen, möglich. Die entwickelte Vorgehensweise eignet sich ferner uneingeschränkt für die weiteren Sonderformen des konvektiven Wärmeübergangs. Ein besonderer Vorteil dieses Modellbestandteils ist es, dass damit kein (nennenswerter) Mehraufwand verbunden ist. In Bezug auf das Modell für mehrdimensionale Wärmeleitung lassen sich die wesentlichen Mehrwerte wie folgt zusammenfassen.

Es können nunmehr mehrdimensionale Temperaturfelder in der festen Phase ohne eine zusätzliche thermische Analyse bestimmt werden, und erstmals sind auch komplexe, heterogene Objekte in Brandsimulationen möglich. Die Rückkopplung der Effekte der (mehrdimensionalen) Temperaturfeldberechnung in der festen Phase sowie an deren Oberfläche auf das Brandszenario ist mit dem entwickelten Modell nun erstmalig vorhanden. Das Modell bildet die Grundlage für eine Erweiterung um die mechanische Analyse sowie für Pyrolysemodelle. Für beide Erweiterungen ist eine Rückkopplung der vorgenannten Effekte auf das Brandszenario essenziell. Für Pyrolysemodelle ist ferner die korrekte Bestimmung der Temperaturen in der festen Phase, d. h. eine mehrdimensionale Berechnung, eine zwingende Grundlage bzw. Voraussetzung. Ferner besteht ein Mehrwert darin, dass eine effizientere Lösung von brandschutztechnischen Fragestellungen die feste Phase betreffend möglich ist, da lediglich ein Modellaufbau erforderlich wird. Betrachtet man den Mehraufwand, so ist dieser durch die mehrdimensionale Berechnung gewisslich vorhanden, allerdings ist durch eine Parallelisierung – das Modell wurde daher entsprechend erarbeitet bzw. hierauf abgestimmt – der Mehrzeitbedarf wiederum deutlich reduzierbar, d. h. der Mehrzeitbedarf steigt unterproportional zum Mehraufwand. Der Mehraufwand für Modellaufbau (und Berechnung) der thermischen Analyse in separaten Programmen ist hingegen nicht reduzierbar.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation entwickelt. Dabei wurde die Modellierung von konvektivem Wärmeübergang zwischen Gasphase und fester Phase für horizontale und vertikale ebene Oberflächen sowie Rohr-/Kanalströmungen (insbesondere Lüftungskanäle) verbessert und die Modellierung von Wärmeleitung in der festen Phase ertüchtigt. Ferner kann es als Grundlage für Pyrolysemodelle dienen. Das Modell wurde exemplarisch und erfolgreich in ein CFD-Brandsimulationsmodell nach aktuellem Stand der Technik integriert und umfangreich überprüft. Abschließend wurde die Anwendung unter anderem auf reale Brandversuche

im Bereich kerntechnischer Anlagen erfolgreich durchgeführt. Das entwickelte Wärmetransportmodell kann als erster Schritt hin zu einer vollständig gekoppelten numerischen Brandsimulation verstanden werden [2]. Am Beispiel der Heissbemessung von Konstruktionen bei natürlichen Bränden sind die unterschiedlichen Vorgehensweisen in Bild 16 dargestellt. Links die gegenwärtige Vorgehensweise und rechts die (mögliche) Zukunft. In der Mitte das neue und konsistente Vorgehen mit dem entwickelten Wärmetransportmodell. Faktisch bedeutet dies in diesem Zusammenhang eine Verschmelzung von Brandsimulation und thermischer Analyse mit Einflussnahme in beiden Richtungen und der wichtigen Kopplung zwischen Gasphase und (detaillierter) fester Phase, was eine wesentliche Weiterentwicklung auf dem Gebiet der numerischen Brandsimulation ist.

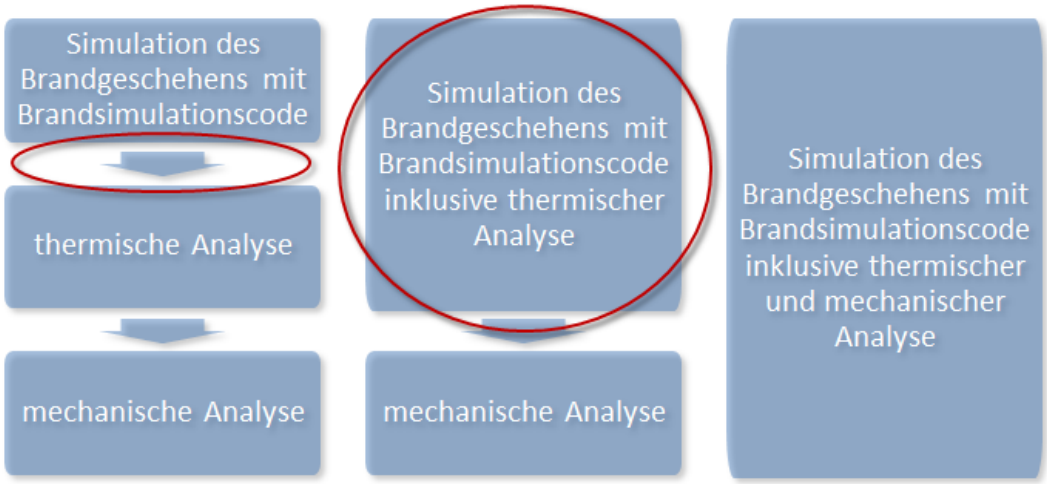


Bild 16: Vorgehensweisen für die Heißbemessung bei natürlichen Bränden

DANK

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) und bei der Forschungsbetreuung der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH für die Förderung und Betreuung des Forschungsvorhabens (Reaktorsicherheitsforschung-Vorhaben-Nr.: 1501318). Weiterer Dank gilt der internationalen Finanzierung des OECD/PRISME Projektes sowie der erfolgreichen Zusammenarbeit mit allen nationalen und internationalen Partnern innerhalb des Projekts.

LITERATUR

[1] McGrattan, Kevin; Hostikka, Simo; Floyd, Jason; Baum, Howard; Rehm, Ronald, National Institute of Standards and Technology (Hrsg.): Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1018-5. Gaithersburg, Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, 2007.

[2] Hohm, V., Wärmetransportmodell für gekoppelte Prozesse in der Brandsimulation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Heft 211, Braunschweig, 2010. ISBN 978-3-89288-195-7

[3] Wren, Carl D.; Ezekoye, Ofodike A.: FDS/Smokeview Models. Struggles and Triumphs in Public Safety Applications. AHJ and Scientific Perspectives. Austin Fire Department, Engineering Services Section and University of Texas, Mechanical Engineering Department, USA, 2006.

[4] Kakaç, Sadlik (Hrsg.): Handbook of single-phase convective heat transfer. New York, USA : Wiley, 1987. (A Wiley-Interscience publication)

[5] Patankar, Suhas V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York, N. Y., USA : Hemisphere Publishing Corporation, 1980. (Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences)

[6] DIN EN 1991-1-2 - Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Dezember 2010.

[7] DIN EN 1992-1-2 - Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln, Tragwerksbemessung für den Brandfall. Dezember 2010.

[8] DIN EN 1993-1-2 - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln, Tragwerksbemessung für den Brandfall. Berlin : Beuth Verlag, 2003.

[9] Swanson Analysis Systems, Inc. (Hrsg.): Ansys Rev. 11. Houston, USA: Swanson Analysis Systems, Inc., 2007.

[10] Hosser, Dietmar (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), 2009.

[11] Hosser, D.; Hohm, V.: Validierung der entwickelten Submodelle anhand der Versuche PRS_LK_1 und PRS_LK_4 des internationalen OECD/PRISME Projekts. Fachbericht Nr. 2010-03, Reaktorsicherheitsforschung - Vorhaben-Nr. 1501318, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig, November 2010.

GRUNDLAGEN UND SICHERHEITSKONZEPT FÜR DEN NACHWEIS DER ENTFLUCHTUNG IM BRANDFALL

Cornelius Albrecht
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

EINLEITUNG

Der Nachweis der sicheren Entfluchtung im Brandfall ist eine der Kernaufgaben des Brandschutzingenieurwesens und in Deutschland implizit schon in der Musterbauordnung [1] in §§ 3 und 14 gefordert. Momentan wird die Personensicherheit durch sogenannte präskriptive Anforderungen nachgewiesen, die im Rahmen der Planung umzusetzen sind. Dies können je nach Gebäudetyp und Rahmenbedingungen Anforderungen an die Rettungsweggestaltung (Länge, Anzahl) oder an den anlagentechnischen Brandschutz sein. Im Englischen spricht man hier vom „deemed-to-satisfy“-Ansatz, also von einer „als sicher erachteten Lösung“. Die in diesen Anforderungen implizierte Sicherheit ist aber nicht quantitativ fassbar und kann von Gebäudetyp zu Gebäudetyp variieren.

Leistungsorientierte Ansätze im Bereich des Nachweises der sicheren Entfluchtung spielen momentan in Deutschland eine eher untergeordnete Rolle. Dies liegt einerseits daran, dass die präskriptiven Anforderungen grundsätzlich akzeptiert werden und es sich nur bei einem geringen Anteil der Gebäude überhaupt rentiert, auf die wesentlich aufwendigeren leistungsorientierten Nachweise zurückzugreifen. Erschwerend kommt hinzu, dass es für derartige Nachweise derzeit weder einen rechtlichen Anspruch auf Anerkennung, noch eine standardisierte oder genormte Vorgehensweise wie für die Brandschutznachweise von Bauteilen [2] gibt. Letzteres führt dazu, dass in der Praxis Einzelfalllösungen zwischen den Beteiligten ausgehandelt werden, die mitunter schwer nachvollziehbar sind und nicht auf andere Objekte übertragen werden können.

Es ist daher dringend erforderlich, abgesicherte Grundlagen für den Nachweis der Personensicherheit im Brandfall zu schaffen. Diese müssten den aktuellen Stand Technik in der Brand- und Entfluchtungssimulation berücksichtigen und zu risikogerechten Lösungen führen, die ein definiertes, quantitativ darstellbares Sicherheitsniveau gewährleisten – analog zu den brandschutztechnischen Nachweisen für Bauteile und Tragwerke nach den Eurocodes [3].

Im vorliegenden Beitrag sollen zunächst die verfügbaren leistungsorientierten Nachweismöglichkeiten für die Personensicherheit dargestellt werden. Im nächsten Schritt wird ein probabilistischer Ansatz für die Quantifizierung der mit den Nachweisen erreichten Zuverlässigkeit beschrieben, mit dem dann die Grundlagen und Anforderungen für eine risikogerechte, strukturierte Nachweisführung zur Entfluchtung und Personensicherheit entwickelt werden können.

GRUNDLAGEN FÜR LEISTUNGSORIENTIERTE NACHWEISE

Derzeitiger internationaler Stand der Technik bei den Personensicherheitsnachweisen im Brandfall ist es, die verfügbare Fluchtzeit (ASET – Available Safe Egress Time) mit der für die Flucht benötigten Zeit (RSET – Required Safe Egress Time) zu vergleichen. Der Nachweis ist erbracht, wenn ASET größer wird als RSET [4], oder wenn

$$RSET / ASET \geq 1 \quad (1)$$

Zumeist wird zusätzlich noch ein empirischer Sicherheitsfaktor gewählt, um vorhandene Unsicherheiten der Nachweisgrößen zu kompensieren. Mit einem globalen Sicherheitsfaktor κ lautet Gl. (1) wie folgt:

$$RSET / ASET \geq \kappa \quad (2)$$

Die Nachweisgrößen ASET und RSET werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Leistungskriterien (z. B. Sichtweite, FED, siehe unten) aus Brand- bzw. Evakuierungssimulationen verschiedener Komplexität und Genauigkeit gewonnen. Diese bilden vorgegebene Szenarien ab, die mehr oder weniger gut abgeschätzt werden können. Somit verbirgt sich hinter der auf den ersten Blick sehr einfachen Gleichung (2) ein sehr komplexes Problem, welches sich unter Umständen jeglicher Vergleichbarkeit entzieht und viel Interpretationsspielraum für alle Beteiligten lässt. Aus diesem Grund sollen im Folgenden Vorschläge für einen strukturierten Ansatz gegeben werden, der vor allem die Vergleichbarkeit der erzielten Ergebnisse gewährleisten soll.

BRAND- UND EVAKUIERUNGSSIMULATION

Im Brandschutzingenieurwesen existieren diverse Modelle, mit denen die Verläufe und Wirkungen von Bränden simuliert werden können. Darunter fallen sowohl sehr einfache als auch komplexe Modelle:

- Massenverlustmodell: Dieses einfache, in [5] beschriebene Modell berücksichtigt lediglich das Volumen des Brandraumes und die freigesetzte Masse pro Zeiteinheit, um daraus eine Konzentration giftiger bzw. erstickender Brandgase zu ermitteln. Zur Vereinfachung sind Massenverlustraten und Freisetzungsraten brandlastabhängig vorgegeben. Eine Lösung durch Handrechnung ist möglich.
- Zonenmodelle: Bei den Zonenmodellen wird der Brandraum im Allgemeinen in die zwei Zonen Heißgasschicht und Kaltgasschicht eingeteilt, in denen jeweils homogene Verhältnisse angenommen werden. Das brennende Objekt wirkt als „Pumpe“ für den Massen- und Enthalpietransfer zwischen den Schichten, der unter Ansatz von empirischen Plumeformeln berechnet wird. Außerdem können Ventilationsbedingungen berücksichtigt werden. Die Rechnungen dauern in der Regel nur wenige Sekunden mit handelsüblichen Desktoprechnern.

- Mit Feldmodellen können Konzentrationen von Giftstoffen, Sichtweiten, Temperaturen usw. orts- und zeitabhängig gelöst werden. Somit können komplexe Geometrien (im Rahmen der Diskretisierung) betrachtet und Rauchgasströmungen untersucht werden. Diese Rechnungen erfordern eine größere Rechnerkapazität (Rechnungen können Stunden bis Tage dauern) und stellen auch erhöhte Anforderungen an die Bediener. Diese müssen die mathematisch-physikalischen Zusammenhänge soweit verstehen, um die Ergebnisse bewerten zu können.

Mit allen vorgenannten Modellen ist der Planer zwar in der Lage, die verfügbare Fluchtzeit ASET zu berechnen, jedoch können die Ergebnisse extrem voneinander abweichen, sodass die Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Auch die Anzahl der zu berücksichtigenden Parameter steigt mit wachsender Komplexität der Modelle signifikant an.

Für die Simulation der Entfluchtung stehen ebenfalls Modelle unterschiedlicher Genauigkeit und Komplexität zur Verfügung:

- Mehl [8] schlägt pauschale Zeiten vor, bis ein Raum bzw. ein Brandabschnitt geräumt sein muss. Dieser Ansatz hat den großen Vorteil der Vergleichbarkeit und des geringen Aufwandes, wobei aber einzelfallspezifische Eigenschaften des Gebäudes nicht erfasst werden. Das angesetzte Leistungskriterium darf über die vorgegebene Zeit nicht erreicht werden.
- Kapazitätsmodelle, wie in [7], [9] beschrieben, nehmen für Ausgänge in Abhängigkeit ihrer Breite eine Durchflussrate an, mit der die Personen den Abschnitt verlassen. Dazu werden noch Laufzeiten bis zu den betreffenden Ausgänzen addiert. Kapazitätsmodelle gehören den sogenannten hydraulischen Modellen an, die die Personenströme als homogene „Flüssigkeit“ darstellen. Hier sind vereinfachte Handrechnungen möglich.
- Fortgeschrittene hydraulische Modelle wie das Modell von Predtechenskii & Milinskii [10] können Raumgeometrien und spezifische Elemente des Fluchtweges wie Treppen oder Engstellen abbilden. Handrechnungen sind hier ebenfalls möglich, wenn auch eine Umsetzung am Computer zur Vereinfachung beiträgt.
- Individualmodelle bilden das Verhalten einzelner sog. „Agenten“ ab, die meist mit Parametern aus stochastischen Verteilungen belegt werden. Diese weisen durch Submodelle ein individuelles Verhalten auf. Die Modellierung der Bewegung kann z. B. durch das Lösen von Bewegungsgleichungen [11] erfolgen, wobei zwischen den Agenten sogenannte „soziale Kräfte“ wirken und die Bewegung zum Ausgang beeinflussen. Die Rechnungen hier sind mitunter recht aufwendig und können i.d.R. nur am Computer erfolgen.

Auch bei den Entfluchtungsmodellen gilt: je komplexer das Modell, desto höhere Anforderungen sind an den Bediener zu stellen, da aufgrund der hohen Anzahl der zu wählenden Parameter Fehler lange unentdeckt bleiben können.

Neben der Zeitdauer der reinen Fluchtbewegung, die mit den o. g. Modellen berechnet werden kann, sind noch weitere Zeitspannen für die Warnung und die Vorbereitung der Flucht, die sog. Premovementzeit, zu berücksichtigen (Bild 1). Die Ansätze für die Premovementzeit sind dabei meist approximativ und basieren auf Auswertungen von Entfluchtungsübungen. Bekannt ist vor allem das Modell nach Purser [6], welches auch Eingang in [7] gefunden hat.

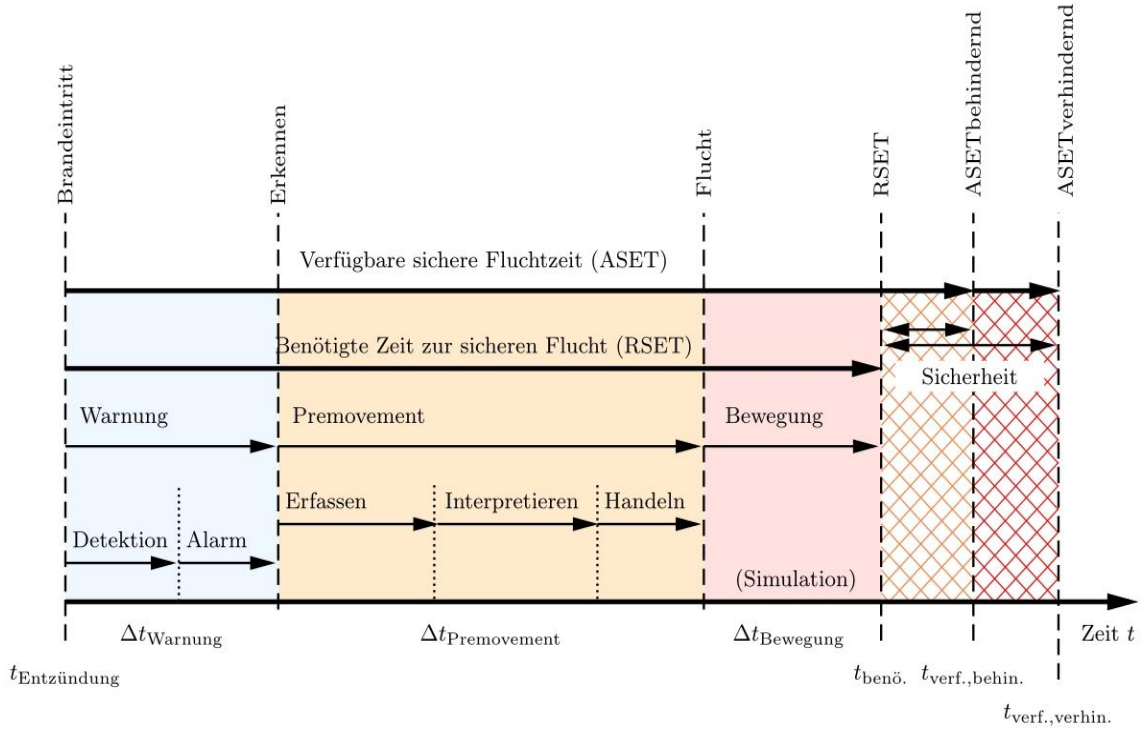


Bild 1 Schematische Darstellung der verschiedenen Zeitspannen bei der Entfluchtung im Brandfall

Validierung von Brand- und Evakuierungsmodellen

Da diverse numerische Modelle für die Brand- und Evakuierungssimulation existieren, können sich hier unter Umständen Probleme mit der Anwendbarkeit und der Anerkennung der Ergebnisse ergeben. In einer normativen Umsetzung der Personensicherheit sollten dennoch keine Modelle festgeschrieben werden, weil den erreichten Stand der Technik einfrieren und keinen Raum lassen würde, neuere Erkenntnisse der Forschung einzubeziehen. Vielmehr sollte analog zu [12] ein Katalog mit Validierungsbeispielen vorgeben werden, um die Eignung der Programme für den jeweiligen Einsatzbereich überprüfen zu können. Entsprechende Vorschläge werden z. B. in [13] oder [14] gemacht.

LEISTUNGSKRITERIEN

Nach Auswahl der Modelle für die Brand- und Evakuierungssimulation müssen die zugehörigen Leistungskriterien festgelegt werden, nach denen die Zeiten für ASET und RSET aus den Simulationsergebnissen abgleitet werden können. Für die Evakuierungssimulation ist dies meist recht einfach: RSET ist die Zeitspanne, bis der Fluchtvorgang beendet ist, d. h. bis der letzte Agent einen sicheren Bereich erreicht hat.

Etwas komplexer ist das Verfahren für die Festlegung von ASET, da die o. g. Simulationsmodelle unterschiedliche Sicherheiten enthalten. Zur Vereinfachung seien diese in zwei Kategorien zusammengefasst:

- *Behinderung der Flucht*. Die Flucht kann behindert werden, indem Personen aufgrund zu geringer Sichtweite langsamer werden oder aufgrund zu großer der Rauchdichte die Fluchtrichtung ändern. Als Leistungskriterien werden z. B. die Höhe der raucharmen Schicht, die Sichtweite oder die optische Rauchdichte mit entsprechenden Grenzwerten angesetzt. Eine Übersicht hierzu findet sich in [7].
- *Verhinderung der Flucht*: Die hier gewählten Kriterien implizieren eine größere Gefahr für die Personen, die bei Erreichen der Grenzwerte fluchtunfähig und nicht mehr in der Lage ist, sich selbst zu retten. Hierzu sind in der Literatur [6] entweder momentane Grenzwerte oder Dosis-Zeit-Modelle (FED, Fractional Effective Dose) zu finden. Auch hierzu findet sich eine Übersicht in [7].

Je nachdem, welche Kriterien gewählt werden, ergeben sich selbst bei gleichem Szenario und Bemessungsbrand mit den gleichen Modellen unter Umständen verschiedene Zeiten für ASET, sodass der Nachweis nach Gl. (2) mit Kriterium „A“ nicht erfüllt werden kann und man daher Kriterium „B“ wählt, um den Nachweis letztlich führen zu können.

Neben dieser Unwägbarkeit spielt gerade bei den ortsabhängigen Feldmodellen auch noch der Ort der Datenaufnahme eine große Rolle. Lokale Rauchgaskonzentrationen können z. B. das Leistungskriterium optische Dichte oder FED früher oder später anschlagen lassen, während sich in der Realität die Personen durch den Raum bewegen. Um hier eine Vergleichbarkeit und Überprüfbarkeit zu schaffen, müssen Kriterien und auch Anforderungen an die Datenaufnahme festgelegt werden.

HIERARCHIEMODELL FÜR PERSONENSICHERHEITSNACHWEISE

Der Vergleich der Modelle und Leistungskriterien zeigt schon, dass der Ansatz eines globalen Sicherheitsfaktors zu ganz unterschiedlichen Sicherheitsniveaus führen kann und somit nicht ohne weitere Überlegungen verwendet werden sollte. Für eine normative Regelung wird ein Hierarchiemodell (Tabelle 1) empfohlen, welches die fachliche Kompetenz des Anwenders berücksichtigt.

Tabelle 1 Hierarchiemodell für Nachweise der Personensicherheit

Ebene	Beschreibung	Gefordertes Fachwissen	Kom-plexität	Genauig-keit
Ia	Präskriptiv	Basiswissen Brandschutz	o-	--
Ib	Kompensation	Basiswissen, Wirkungsweisen von Brandschutzmaßnahmen	o	--
IIa	Einhaltung von Kriterien	Kenntnisse über Zonenmodelle, selten CFD, keine Evakuierungsmodelle	+	o
IIb	Nachweis mit einfachen Modellen	Kenntnisse über Zonenmodelle, selten CFD, einfache Evakuierungsmodelle	++	+
III	Nachweis mit komplexen Modellen	vertiefte Kenntnisse über CFD und Evakuierungsmodelle	+++	++

Dieser Vorschlag orientiert sich an den Nachweisstufen, die in den Eurocodes verwendet wurden (Tabellennachweise, vereinfachte Rechenverfahren, allgemeine Rechenverfahren) und daher den Brandschutzingenieuren geläufig sind. Für jede der vorgeschlagenen Ebenen können dann semi-probabilistische Sicherheitsbeiwerte hergeleitet und kalibriert werden.

SZENARIEN UND BEMESSUNGSBRÄNDE

Neben den Festlegungen für Modelle und Leistungskriterien sollten zusätzlich auch Bemessungsbrandszenarien zumindest qualitativ vorgegeben werden. Auch hier können sich erhebliche Unterschiede ergeben, je nachdem, welches Szenario und welcher Bemessungsbrand festgelegt werden. Einen guten Ansatz für Bemessungsbrandszenarien bietet die US-amerikanische Richtlinie „NFPA 101: Life Safety Code“ [15], die neben präskriptiven Anforderungen auch einen leistungsorientierten Nachweis vorsieht. Hierfür werden acht verschiedene Szenarien vorgegeben, die in Tabelle 2 zusammengestellt sind.

Sollte eines der Szenarien nicht relevant bzw. nicht möglich sein, so muss dies begründet werden. Desweiteren können bzw. müssen noch zusätzliche Szenarien nachgewiesen werden, wenn diese im Einzelfall relevant werden. Durch diese Vorgehensweise kann sichergestellt werden, dass die häufigsten Fälle abgedeckt sind. Den einzelnen Szenarien weist Fleischmann [16] noch Kriterien in Abhängigkeit ihres Risikobeitrages zu. So muss für das Worst Case Scenario 8 nur das FED-Kriterium erfüllt werden, während für den Standardfall z. B. die Sichtweite zum Tragen kommt.

Tabelle 2 Bemessungsbrandszenarien nach NFPA 101: Life Safety Code [15]

Szenario	Beschreibung
1	Typisches Nutzungsabhängiges Szenario (Standardfall)
2	Sich sehr schnell entwickelndes Feuer im Hauptrettungsweg (Reduktion der Anzahl der Rettungswege)
3	Entzündung in einem ungenutzten Raum neben dem Raum mit hoher Personenanzahl (unentdeckte Brandentstehung)
4	Entzündung in einem ungenutzten Raum ohne Detektion oder Sprinkler neben dem Raum mit hoher Personenanzahl (Ausfall der Brandschutzbarrieren)
5	Langsam entwickelndes von den Brandschutzbarrieren abgeschirmtes Feuer in der Nähe von hochfrequentierten Räumen (Niederenergetischer Brand)
6	Feuer mit größtmögliche Brandlast einer bestimmungsgemäßen Benutzung (Großes Feuer bei normaler Nutzung)
7	Brandeintritt von außen, dass sich in den betreffenden Abschnitt hinein entwickelt. (Brandweiterleitung)
8	Standardbrand unter Berücksichtigung des Ausfalls von aktiven und passiven Brandschutzsystem (Worst Case Scenario)

Für die Bemessungsbrände, die in der Regel als Zeitverlauf der Wärmefreisetzungsrate (HRR(t)) in den Simulationsmodellen vorgegeben werden, stellt der Life Saftey Code keine konkreten Forderungen. Es wird aber darauf hingewiesen, dass der sogenannte t^2-Brand in der Brandentwicklungsphase nicht angesetzt werden muss [15]. Auch bezüglich der maximalen Wärmefreisetzungsrate, der Brandlast und weiterer Parameter werden keine Angaben gemacht. In einem ganzheitlichen Sicherheitskonzept müssen die Brandszenarien jedoch in Abhängigkeit der Nutzungsart, Größe und/oder weiterer Parameter vollständig definiert werden, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Fleischmann [15] stellt dazu in einer aktuellen Veröffentlichung verschiedene Szenarien auf Basis des t^2-Brandes dar und definiert die zugehörigen Parameter wie Heizwerte, Brandentwicklungsgeschwindigkeiten, Schadgasentstehungsraten u.v.m..

PROBABILISTISCHER ANSATZ

Die vorgenannten Festlegungen zu den Simulationsmodellen sind nur der erste Schritt in die Richtung eines ganzheitlichen Ansatzes für die Personensicherheit. Durch die definierten Elemente im Personensicherheitsnachweis ist nun zwar die Vergleichbarkeit gewährleistet. Es sind aber noch keine quantitativen Analysen erfolgt, die zeigen, dass durch die leistungsorientierten Nachweise das erforderliche Sicherheitsniveau erreicht wird.

Zielversagenswahrscheinlichkeiten

Problematisch ist, dass im Gegensatz zu den Nachweisen für Bauteile und Tragwerke keine Zielversagenswahrscheinlichkeiten für Nachweise der Personensicherheit geregelt sind. Man kann hier jedoch analog zur GruSiBau [17] Zielersagenswahrscheinlichkeiten ableiten, indem man repräsentative Gebäude, die dem geltenden Bauordnungsrecht genügen, hinsichtlich ihrer Versagenswahrscheinlichkeiten untersucht. Eine Einordnung in Risikoklassen kann z. B. analog zu [12] nach Gebäudeklasse und Nutzung erfolgen. Aus einer hinreichend großen Anzahl an Vergleichsrechnungen können dann repräsentative Zielversagenswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden.

Da die berechneten Versagenswahrscheinlichkeiten stark modellabhängig [18] sind und im Gegensatz zu den Bauteilnachweisen die Modellunsicherheiten nicht ohne weiteres quantifizierbar sind, sollte hier zusätzlich nach den in Tabelle 1 dargestellten Ebenen unterschieden werden, um modellklassenabhängige Werte zu erreichen.

Zuverlässigkeitstheoretische Grundlagen

Generell kann Gl. (1) auch als probabilistischer Grenzzustand betrachtet werden, wobei sowohl ASET als auch RSET Streuungen und Unsicherheiten unterliegen. Der Versagensbereich Ω_f der Grenzzustandsfunktion ist definiert als

$$\Omega_f \equiv g(x) = ASET - RSET \leq 0 \tag{3}$$

Es ist die Gesamtheit der Wertekombinationen, mit denen Gl. (3) kleiner gleich Null ergibt. **x** ist hierbei ein Vektor von Parametern, z. B. der Premovementzeit und der Brandausbreitungsgeschwindigkeit. Sind ASET und RSET mit ihren Parametern bekannt und normalverteilt, so kann die Faltung[1] und daraus die Wahrscheinlichkeit einer nicht erfolgreichen Entfluchtung mit Gl. (4) berechnet werden:

$$p_f = \Phi\left[\frac{-(\mu_{ASET} - \mu_{RSET}}{\sqrt{\sigma_{ASET}^2 + \sigma_{RSET}^2}}\right] = \Phi(-\beta) \tag{4}$$

Dabei sind μ der Mittelwert und σ die Standardabweichung der zufallsverteilten Variablen. Φ() ist die Funktion Standardnormalverteilung und β ist der sog. Zuverlässigkeitsindex. Gl. (4) ist grafisch in Bild 2 dargestellt.

[1] Eine Faltung (Konvolution) ist ein mathematischer Operator, der für zwei Funktionen eine weitere Funktion liefert. Aus den zwei Verteilungsfunktionen ASET und RSET in Gl. (3) wird also eine resultierende Verteilungsfunktion Z.

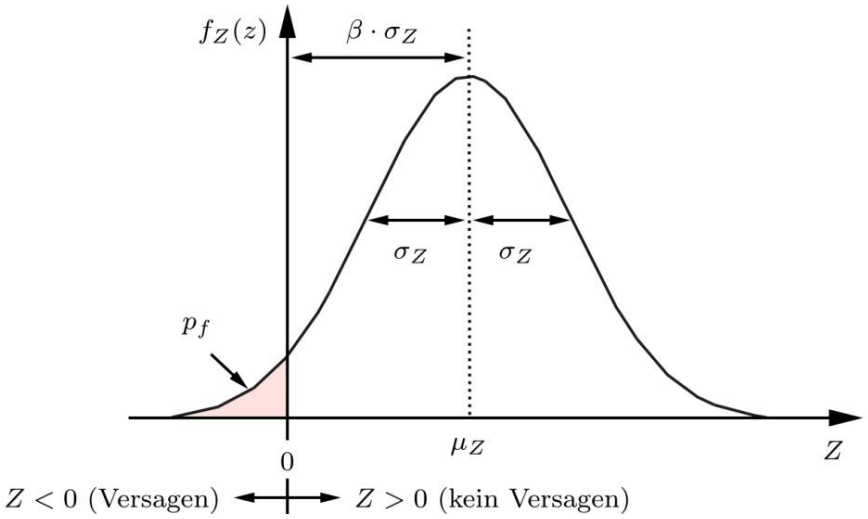


Bild 2 *Der Zuverlässigkeitsindex β beschreibt die Anzahl der Standardabweichungen σ_z vom Mittelwert μ_z bis zum Nullpunkt der aus der Grenzzustandsfunktion (ASET-RSET) resultierenden Verteilungsfunktion Z.*

In der Regel sind jedoch weder die Verteilungsparameter von ASET und RSET a priori bekannt, noch folgen sie unbedingt einer Normalverteilung. In diesem Fall muss mit wesentlich aufwendigeren Verfahren wie der First Order Reliability Method (FORM) für analytische Grenzzustände oder der (optimierten) Monte Carlo Methode für simulationsbasierte Ansätze gearbeitet werden.

BEISPIEL FÜR NACHWEISE DER EBENE IIB (EINFACHE MODELLE)

Zunächst soll beispielhaft für das Standardszenario die Wahrscheinlichkeit einer nicht erfolgreichen Entfluchtung mittels einfachen Modellen für eine 200 m² große und 4 m hohe Versammlungsstätte berechnet werden. Die verwendeten Modelle – das Zonenmodell [19] und das Evakuierungsmodell [10] – entsprechen dem typischen Nachweisfall mit einfachen Ingenieurmodellen. Im Rahmen einer Diplomarbeit [20] wurden zunächst die notwendigen Parameter identifiziert und mit stochastischen Modellen auf Basis von Literaturangaben beschrieben (Tabelle 3).

Tabelle 3 Stochastische Parameter für den Nachweis mit einfachen Modellen.

Parameter	Mittelwert	Standard-abweichung
Max. Wärmefreisetzung	2000 kW	500 kW
Brandentwicklungsdauer bis 1 MW	300 s	80 s
Personendichte pro m² am Anfang	2,0 P/m²	0,5 P/m²
Benutzte Fläche pro Person im Strom	0,1 m²	0,0125 m²
Premovementzeit	60 s	15 s

Aufgrund limitierter Quellen wurden auf der sicheren Seite liegend alle Parameter als normalverteilt mit konservativen Mittelwerten und Standardabweichungen angenommen, sodass auch das Ergebnis auf der sicheren Seite vermutet werden kann.

Als Leistungskriterium zur Bestimmung von ASET wurde das erste Unterschreiten einer raucharmen Schichthöhe von 2,5 m angesetzt. Beide Modelle (Zonenmodell CFast und Evakuierungsmodell) wurden numerisch aufbereitet, sodass die Eingabedateien generiert und die Berechnungen vollautomatisch durchgeführt werden können. Als Zuverlässigkeitslöser wurde das varianzmindernde Monte Carlo Verfahren Adaptive Importance Sampling (AIS) benutzt, welches in [21] beschrieben wird. Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wurden rund 1200 Simulationen benötigt, die allerdings aufgrund der hohen Berechnungsgeschwindigkeit beider Programme in weniger als einer Stunde auf einem Heimrechner durchgeführt werden konnten. Die Analysen ergaben eine Versagenswahrscheinlichkeit unter der Bedingung, dass ein gefährlicher Brand eingetreten ist, von $p_{f|Brand}$ = 6,28 %, was einem Zuverlässigkeitsindex β_{Brand} = 1,5 entspricht.

Sensitivitätsanalysen zeigten, dass die Brandentwicklungsdauer mit 77 % und die Premovementzeit mit 22 % den größten Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit haben und zusammen 99 % zur resultierenden Varianz beitragen (Bild 3). Sollten sich das in weiteren Berechnungen bestätigen, so könnte man für diese beiden Parameter Teilsicherheitsbeiwerte ableiten.

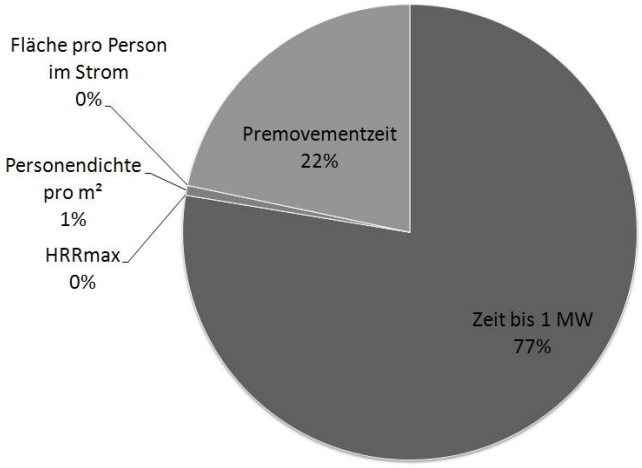


Bild 3 *Sensitivitäten für die Zuverlässigkeitsberechnung mit einer Rauchschichthöhe von 2,5 m als Leistungskriterium (die Brandentwicklungsdauer bis zum Erreichen von 1 MW ist der klar dominierende Parameter)*

Systematische Betrachtung

Da die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit unter der Bedingung eines eingetretenen Brandes gilt, muss auch die Brandeintretenswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden. Analog zum Sicherheitskonzept für Bauteile [12] wird

dabei ein Bezugszeitraum von einem Jahr zu Grunde gelegt. Für das seltene Auftreten von Brandereignissen kann allgemein eine Poissonverteilung unterstellt werden, sodass die Zeit zwischen den Bränden exponentialverteilt ist. Hierfür existieren in der Literatur diverse Modelle, die auch Eingang in das Sicherheitskonzept für die Bauteilnachweise [12] gefunden haben. Für das untersuchte Beispiel wird eine pauschale jährliche Brandeintretenswahrscheinlichkeit $p_1 = 0{,}02$ gewählt.

Desweiteren können Maßnahmen zur Verhinderung einer Brandausbreitung berücksichtigt werden, z. B. die manuelle Brandbekämpfung, die analog zum Nationalen Anhang [12] mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit $p_2 = 0{,}5$ bewertet wird. Unter der Annahme, dass der Brandeintritt, die manuelle Bekämpfung und das Unterschreiten der Rauchschichthöhe voneinander unabhängig sind, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einem Brand kommt und die raucharme Schicht den Grenzwert von 2,5 m unterschreitet, bevor die letzte Person den Raum verlassen hat, zu

$$p_f = p_1 \cdot p_2 \cdot p_{\{f|Brand\}} = 0{,}02 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}0628 = 6{,}28 \cdot 10^{-4}\ 1/a \tag{5}$$

Der zugehörige Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3{,}22$ liegt in der Größenordnung der nach [2] für Nachweise der Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken empfohlenen Werte. Aus Sicht des Autors ist das Zuverlässigkeitsniveau der Gebrauchstauglichkeit im vorliegenden Beispiel ausreichend, da einerseits mit konservativen Modellannahmen gearbeitet wurde und andererseits die Unterschreitung der raucharmen Schichthöhe von 2,5 m nur eine Fluchtbehinderung darstellt, aber noch keine Personenschäden verursacht.

Vergleich mit einer raucharmen Schichthöhe von 1,8 m

Um den großen Einfluss des gewählten Leistungskriteriums zu verdeutlichen, wurde die Zuverlässigkeitsbewertung nochmals mit identischen Modellen und Eingangswerten wiederholt, allerdings wurde diesmal als Leistungskriterium eine raucharme Schichthöhe von 1,8 m gewählt. Damit ergibt sich eine etwa 25-mal geringere Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall von $p_{f|Brand} = 0{,}26$ %, bzw. eine jährliche Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Brand die raucharme schichthöhe von 1,8 m unterschritten wird, wenn noch nicht alle Personen den Raum verlassen haben, von

$$p_f = p_1 \cdot p_2 \cdot p_{\{f|Brand\}} = 0{,}02 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}0026 = 2{,}6 \cdot 10^{-5}\ 1/a\,, \tag{6}$$

was einem Zuverlässigkeitsindex $\beta = 4{,}0$ entspricht. Dieser Wert ist sogar schon fast im Bereich der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit für die Standsicherheit nach [2]. Dieser Vergleich soll allerdings mehr die Größenordnung aufzeigen, denn aus den oben genannten Gründen als Nachweiskriterium gelten. Dazu darf auch nicht vergessen werden, dass es sich hier um die Betrachtung eines Einzelbeispiels und nicht um eine Generalisierung handelt.

Einfluss von Brandschutzsystemen am Beispiel einer BMA

Um den Einfluss von Brandschutzsystemen quantifizieren zu können, müssen diese in die Systembewertung mit einbezogen werden. Hinzu darf nicht vergessen werden, dass solche Systeme auch mit Ausfallwahrscheinlichkeiten behaftet sind, die aber ebenfalls in einem Systemansatz mit erfasst werden können. Um den Einfluss von Systemen am oben genannten Beispiel zu zeigen, soll beispielhaft eine Brandmeldeanalage (BMA) betrachtet werden. Diese wirkt sich zwar nicht direkt auf den Brandverlauf aus, wie zum Beispiel eine Sprinkleranlage, kann aber durch die frühe Detektion des Brandes und anschließende Alarmierung zu einer signifikanten Verkürzung der Premovementzeit beitragen, wie dies bereits in Ansätzen in Pursers Modell für die Premovementzeit [6] vorhanden ist.

Um die Vergleichbarkeit zu erhalten, wird das vorige Beispiel unverändert übernommen, allerdings wird für die Premovementzeit bei funktionierender BMA nun eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 45 s bei gleichbleibender Standardabweichung (15 s) angesetzt. Dies kann als konservative Betrachtung angesehen werden. Eine Berechnung ergibt eine Versagenswahrscheinlichkeit unter Ansatz der BMA und des Leistungskriteriums Rauchschichthöhe von 2,5 m im Falle eine Brandes zu $p_{f|Brand,BMA}$ = 1,96%.

Des Weiteren wird nach [22] konservativ eine Versagenswahrscheinlichkeit der BMA von $p_{f,BMA}$ = 10% angenommen. Versagt die BMA, so kommt es zum bereits oben berechnten Szenario mit einer Versagenswahrscheinlichkeit von $p_{f|Brand}$ = 6,28%. Die Versagenswahrscheinlichkeit des System, das in Bild 4 dargestellt ist, ergibt sich mathematisch vereinfacht zu

$$p_f = p_1 \cdot p_2 \cdot \left[p_{\{f,BMA\}} \cdot p_{\{f|Brand\}} + (1 - p_{\{f,BMA\}}) \cdot p_{\{f|Brand,BMA\}} \right] \tag{7}$$

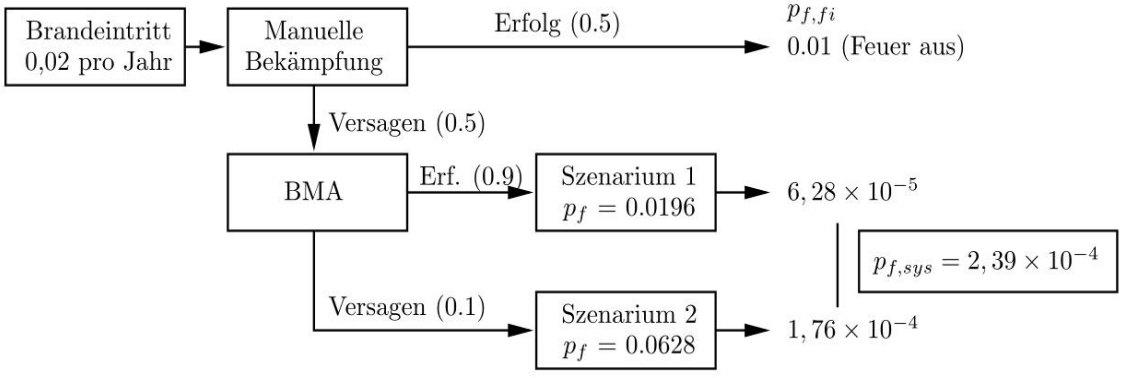


Bild 4 Darstellung des Systems Brandschutz mit Berücksichtigung einer BMA (Näherungslösung durch Multiplizieren und Addieren der Komponenten)

Hieraus ergibt sich die jährliche Wahrscheinlichkeit, dass die raucharme Schicht eine Höhe von 2,5 m unterschreitet, bevor alle Personen den Raum verlassen haben, unter Berücksichtigung einer BMA mit der Ausfallwahrscheinlichkeit von

10 % zu $p_f = 2{,}39 \times 10^{-4}$, was $\beta \approx 3{,}5$ entspricht. Eine BMA reduziert also die Versagenswahrscheinlichkeit in diesem Fall um den Faktor 2,6.

Ein Vergleich mit anderen Systemen unter Berücksichtigung deren Kosten könnte somit eine Kosten-Nutzen optimierte Lösung ohne Einbußen im (erforderlichen) Sicherheitsniveau bringen, wie es bereits für die Bauteilbemessung in [3] dargestellt wurde. Der hier dargestellt Fall ist eine beispielhafte Anwendung und die Ergebnisse sind nicht auf andere Gebäude übertragbar. Erst durch diverse Anwendungen auf zahlreiche Gebäude könnten allgemeingültige Aussagen abgeleitet werden, wie dies bei der Herleitung des Sicherheitskonzeptes für die Bauteile nach Eurocodes erfolgt ist [23].

BEISPIEL FÜR NACHWEISE DER EBENE III (KOMPLEXE MODELLE)

Wesentlich schwieriger wird die probabilistische Berechnung unter Zuhilfenahme von komplexen Rechenmodellen, die meist signifikant längere Rechenzeiten benötigen. Zwar kann man mit varianzmindernden Monte Carlo Verfahren die benötigten Rechnungen von mehren tausend auf mehrere hundert reduzieren, aber auch dies ist für Simulationsprogramme mit teils mehreren Tagen benötigter Rechenzeit nahezu unmöglich. Aus diesem Grunde wurde am iBMB ein Antwortflächenverfahren entwickelt [24], mit welchen solche probabilistischen Analysen unter bestimmten Randbedingungen mit wenigen Rechenläufen möglich sind.

Für die Analysen wurde das oben gezeigte Beispiel übernommen und als Leistungskriterium wurden FED-Werte von 0,3 gewählt, die in der Nähe der Ausgänge aus CFD-Simulationen mit der Software FDS [25] abgegriffen wurden, da die meisten Brandtoten bei Fluchtversuchen in Türnähe gefunden werden [26]. Hier können sich Staus bilden, sodass dieser Bereich den Bemessungsfall darstellt. Ist an einem der Ausgänge ein FED-Wert von 0,3 erreicht, so gilt dieser Zeitpunkt als ASET. Für die Entfluchtung wurde vereinfachend ein Kapazitätsmodell gewählt. Als Bemessungsszenarium wurde auch hier der sich quadratisch entwickelnde Brand im Bereich der Bar angenommen. Eine Verlangsamung der Personen durch Rauch wird vernachlässigt, da der Stau vor den Türen ohnehin eine Verlangsamung impliziert. Des Weiteren sind die stochastischen Modelle als konservativ zu bewerten. Die Parameter sind vereinfachend als normalverteilt angenommen und in Tabelle 3 dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich an einer der Türen ein FED-Wert von 0,3 oder größer einstellt, bevor alle Personen den Raum verlassen haben, berechnet sich nun zu $p_{f|Brand} = 9{,}22 \times 10^{-7}$, wobei allerdings in die Berechnung des FED-Wertes der hochgradig gefährliche Cyanwasserstoff (HCN) nicht einbezogen wurde. Allerdings zeigt der Wert eindrucksvoll die Größenordnung gegenüber der Betrachtung der raucharmen Schichthöhe. Wiederum bezogen auf einen Referenzzeitraum von einem Jahr analog zum oben gezeigten Beispiel ergibt sich $p_f = 9{,}22 \times 10^{-9}$, was einem Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 5{,}6$ entspricht.

Tabelle 3 Stochastische Parameter für den Nachweis mit komplexen Modellen.

Parameter	Mittelwert	Standard-abweichung
Max. Wärmefreisetzung	2500 kW	250 kW
Brandentwicklungsdauer bis 1 MW	300 s	50 s
Kohlenmonoxid Yield	0,1g/g	0,02 g/g
Premovementzeit	60 s	12 s
Gehgeschwindigkeit	1,2 m/s	0,12 m/s
Anzahl Personen im Raum bei t=0	300 Pers.	30
Kapazität der Türen	1,39 Pers./m/s	0,139 Pers./

Eine Analyse der Sensitivitäten, wie in Bild 5 dargestellt, zeigt, dass die wesentlichen Einflussgrößen hier ebenfalls die Brandentwicklungsdauer (67 %) sowie die Anzahl der Personen (16 %), die Türkapazität (8 %) und die CO-Konzentration (5 %) sind. Die Premovementzeit hat in diesem Fall wenig Einfluss (4 %). Etwaige Sicherheitsbeiwerte sollten also auch hier auf die Brandentwicklungsdauer geschlagen werden, wie bereits in [27] empfohlen.

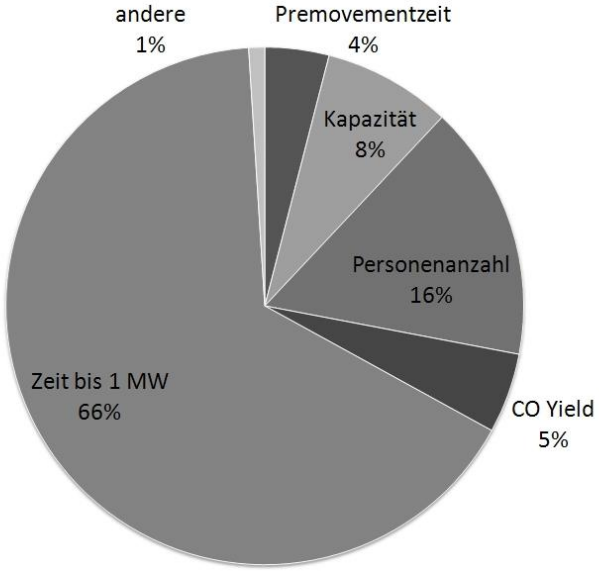


Bild 5 Sensitivitäten für die Berechnung der Zuverlässigkeit mit dem FED-Wert als Leistungskriterium. Es wird ersichtlich, dass auch hier vor allem die Brandentwicklungsgeschwindigkeit die maßgebliche Variable ist.

Auch in diesem Ansatz können verschiedenste Brandschutzsysteme mit ihrer jeweiligen Ausfallwahrscheinlichkeit in die Analysen mit einbezogen und somit hinsichtlich ihrer Effektivität ansatzweise quantifiziert werden. Auf eine Analyse wird hier angesichts der hohen Rechenkapazitäten verzichtet. Ein Beispiel findet sich in [24].

PROBABILISTISCHES LEISTUNGSKRITERIUM

Abhängig von der Ebene müssen vergleichbare Nachweiskriterien geschaffen werden, die folgende Angaben beinhalten:

- das Leistungskriterium selbst,
- der zulässige Grenzwert,
- der Ort bzw. das Verfahren, wie der Wert aufgenommen wird,
- der Zeitraum der Betrachtung und
- die zulässige Wahrscheinlichkeit.

Ein ausformuliertes probabilistisches Leistungskriterium könnte also lauten: „Eine Sichtweite von 10 m, aufgenommen in 2,0 m Höhe in der Mitte des Flures (ASET) darf während der benötigten Fluchtzeit, also der Zeit bis die letzte Person den Flur verlassen hat (RSET), nur mit einer maximal zulässigen Wahrscheinlichkeit von $2{,}0 \times 10^{-4}$ (β=3,5) unterschritten werden“. Die konkreten Festlegungen zu den Elementen müssen im Rahmen von weiteren Forschungsvorhaben erarbeitet werden. Die zulässigen Versagenswahrscheinlichkeiten können dann mit den oben beschriebenen Methoden anhand von Gebäuden nach den geltenden präskriptiven Vorschriften und Normen kalibriert werden.

BEIBEHALTENE PRÄSKRIPTIVE ELEMENTE

Auch in leistungsorientierten Konzepten müssen einige Elemente präskriptiv festgelegt werden. Beispiele hierfür sind, wie oben beschrieben, die Szenarien und Leistungskriterien, um die Vergleichbarkeit und Prüfbarkeit zu gewährleisten. Auch für den Ansatz von Brandschutzsystemen müssen Festlegungen getroffen werden. Beispielsweise kann nur eine nach Norm entworfene, zugelassene und gewartete Sprinkleranlage die hohe Verfügbarkeit und Wirkung entfalten, die im Sicherheitskonzept vorausgesetzt wurden.

Daneben gibt es auch elementare Anforderungen, die nicht durch leistungsorientierte Ansätze ersetzt werden können, z. B. die Forderung nach zwei unabhängigen Rettungswegen ab einer bestimmten Raumgröße oder Personenzahl. Diese Elemente sind zu identifizieren, abzustimmen und festzulegen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zunächst wurden die grundsätzlichen Anforderungen an ein Sicherheitskonzept für den Nachweis der Entfluchung im Brandfall definiert und die Grundlagen für leistungsorientierte Nachweise der Personensicherheit dargestellt. Bei der Beschreibung der zumeist numerischen Nachweismethoden wurde vor allem auf die Unterschiede bezüglich Komplexität und Genauigkeit eingegangen. Eine Einordnung in Hierarchieebenen kann hier Klarheit bezüglich der Komplexität und der benötigten Fachkompetenzen des Anwenders dieser Modelle schaffen.

Die mit den Modellen nachzuweisenden Leistungskriterien und Grenzwerte wurden aufgezeigt und in flucht-behindernd oder flucht-verhindernd eingeteilt um klarzustellen, welche Kriterien für welche Nachweise zu benutzen sind. Neben dem klassischen Bemessungsbrandszenario wurden auch die alternativen Ansätze aus dem US-amerikanischen Life Safety Code [15] aufgezeigt, die alle separat nachgewiesen werden müssen. Hier können die Modelle und Leistungskriterien abhängig von der Wahrscheinlichkeit der einzelnen Szenarien gewählt werden, z. B. die Sichtweite bei mittlerer Brandausbreitung oder der FED-Wert bei einem sich sehr schnell entwickelnden Feuer.

In probabilistischen Berechnungen mit einfachen und komplexen Modellen wurde beispielhaft gezeigt, wie Zielversagenswahrscheinlichkeiten durch Kalibrierung anhand der geltenden Vorschriften abgeleitet werden können. Um diese Zielversagenswahrscheinlichkeiten in ein semi-probabilistisches Sicherheitskonzept zu überführen, wurden mittels Sensitivitätsanalysen die Parameter mit dem größten Einfluss identifiziert. Unabhängig vom Modell spielt die Brandentwicklungsgeschwindigkeit eine dominierende Rolle, wenn eine quadratische Brandausbreitung (t^2-Ansatz) zu Grunde gelegt wird.

Schließlich besteht ein ganzheitliches Sicherheitskonzept nicht nur aus Teilsicherheitsbewerten, sondern umfasst zahlreiche Komponenten, Annahmen und Festlegungen, die in Bild 6 grafisch dargestellt sind.

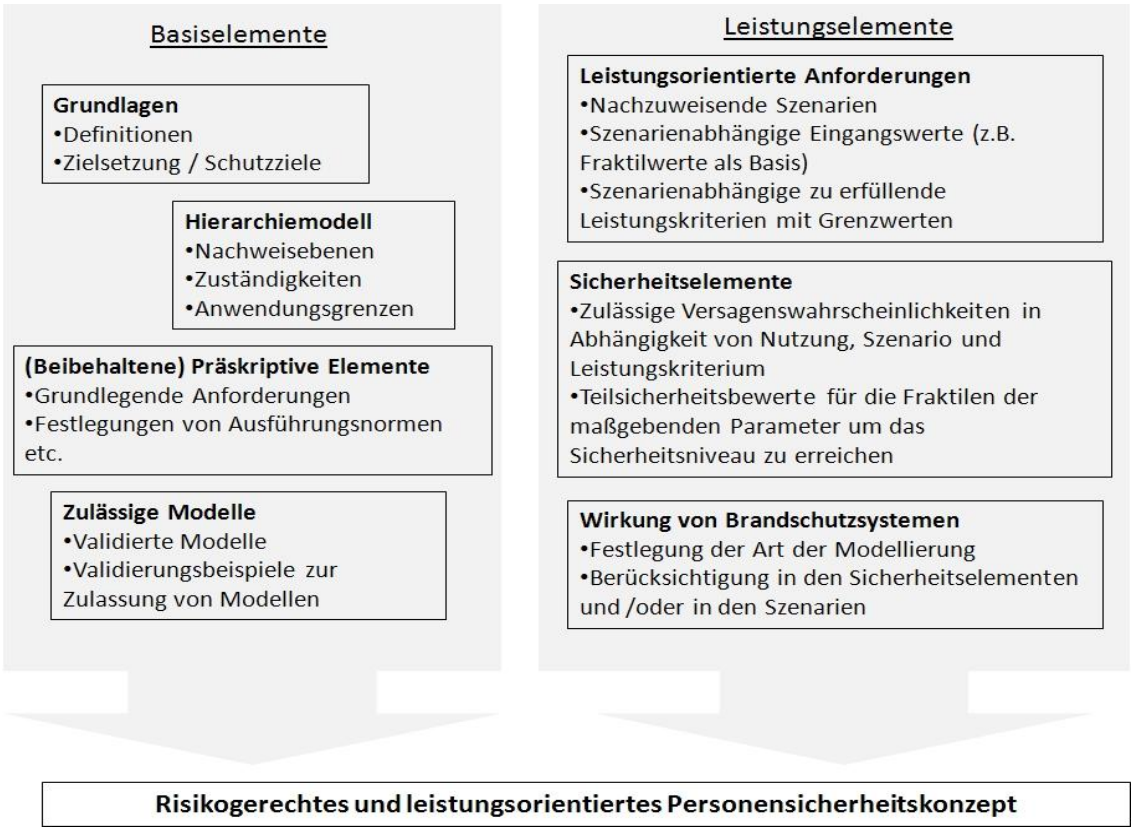


Bild 6 *Elemente für ein risikogerechtes, leistungsorientiertes Personensicherheitskonzept im Rahmen einer Anwendungsnorm*

LITERATURNACHWEISE

[1] MBO Musterbauordnung, IS-Argebau, 2002

[2] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Dezember 2010

[3] Weilert, A.; Albrecht, C.: Übergreifendes Sicherheitskonzept für Brandschutznachweise mit Ingenieurmethoden, Braunschweiger Brandschutz-Tage '09, Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 208, 2009, S. 89-110

[4] Tubbs, J. S. & Meacham, B. J.: Egress Design Solutions -- A guide to Evacuation and Crowd Management Planning, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2007

[5] ISO 13571: Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire date International Standardization Organization (ISO), 2007

[6] Purser, D. A.: Toxicity Assessment of Combustion Products, In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section Two, Chapter 6 National Fire Protection Association (NFPA), 2002, 1, S. 2-83-2-171

[7] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04/01, 2. Auflage Mai 2009, Herausgeber: vfdb TWB, Referat 4, Prof. Dr. Dietmar Hosser, Braunschweig, Altenberge

[8] Mehl, F.: Richtlinien für die Erstellung und Prüfung von Brandschutzkonzepten, Praxisseminar Brandschutz bei Sonderbauten, 2004, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 178, 2004, S. 109-134

[9] MVStättVO Versammlungsstättenverordnung, IS-Argebau, 2005

[10] Predtechenskii, V. M. & Milinskii, A. I.: Planning for Foot Traffic Flow in Buildings, Amerind-Verlag, New Dehli, 1978

[11] Helbing, D. & Molnar: P. Social force model for pedestrian dynamics Physical Review, 1995

[12] DIN EN 1991-1-2 Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2/NA: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Dezember 2010

[13] RiMEA Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen, Version: 2.2.1, 2009

[14] Deutsche FDS Usergroup: Anfangs- und Randbedingungen der CFD-Berechnung mit FDS, Version 1.0, 2011

[15] NFPA 101: Life Safety Code National Fire Protection Association (NFPA), 2008

[16] Fleischmann, C.: Is Prescription the Future of Performance-based Design? Proceedings of the 10th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS), 2011

[17] GruSiBau: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen, Beuth Verlag, Berlin, 1981

[18] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen - Grundwissen für Ingenieure, Verlag der Fachvereine (vdf), Zürich, 1994

[19] CFAST 6.1 - Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 6), Technical Reference Guide, 2009

[20] Siemon, M.: Zuverlässigkeitsorientierte Bewertung der sicheren Entfluchtung im Brandfall mit Hilfe von Ingenieurmethoden, Diplomarbeit, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 2011

[21] Bucher, C.: Adaptive sampling-an iterative fast Monte Carlo procedure, Structural Safety, 1988, 5(2), 119-126

[22] BS7974 Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Code of practice. British Standards Institution (BSI), 2001

[23] Hosser, D.; Weilert, A.; Klinzmann, C.; Schnetgöke, R., Albrecht, C.: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2“. Abschlussbericht zum DIBT-Forschungsvorhaben ZP 52-5-4.168-1239/07. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Juni 2008

[24] Albrecht, C.; Hosser, D.: A Response Surface Methodology for Probabilistic Life Safety Analysis using Advanced Fire Engineering Tools, Proceedings of the 10th International Symposium on Fire Safety Science (IAFSS10), 2011

[25] Fire Dynamics Simulator (Version 5) - Technical Reference Guide – Volume 1: Mathematical Model, 2009

[26] Bryner, N. P.; Madrzykowski, D. & Grosshandler, W. L.: Reconstructing the Station Nightclub Fire: Computer Modeling of the Fire Growth and Spread, Proccedings of the 11th International Interflam Conference (INTERFLAM 2007), interScience Communications, 2007

[27] Forell, B. Niveau der Personensicherheit von Versammlungsstätten - Nachweis nach vfdb-Leitfaden. Tagungsband 56. Jahresfachtagung der vfdb, Leipzig, 20.-23. Mai 2007

SITZUNG 2

NORMEN, RICHTLINIEN, VERORDNUNGEN

Sitzungsleitung: G. Hoppe, Berlin

Muster-Industriebaurichtlinie – Ziel und Stand der Novellierung

Jost Rübel
Ministerium für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr NRW, Düsseldorf

EINLEITUNG

In 2006 wurden in der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU erste Überlegungen zur Einrichtung einer Projektgruppe zur Überarbeitung der Muster-Industriebaurichtline (MIndBauRL) [1] angestellt. Hintergrund waren die Bestrebungen zur Neufassung der DIN 18230-1 und die Erkenntnis aus den vorliegenden Arbeitsergebnissen, dass die geltende Fassung der MIndBauRL nicht mehr mit der neuen DIN 18230-1 abgestimmt sein würde.

Die zuständigen Gremien der ARGEBAU haben deshalb in 2007 eine Projektgruppe „Überarbeitung der Muster-Industriebaurichtlinie“ mit folgendem Arbeitsauftrag eingerichtet:

- Anpassung der MIndBauRL (Fassung März 2000) an die MBO 2002
- Abstimmung der Regelungen des Abschnitts 7 der MIndBauRL, die eine Anwendung des Rechenverfahrens nach DIN 18230-1 ermöglichen, auf die derzeit laufende Überarbeitung der DIN 18230-1
- Überprüfung ggf. aus bauordnungsrechtlicher Sicht notwendiger Änderungen oder Ergänzungen der MIndBauRL durch die Übernahme der DIN 18230-1
- Einflussnahme auf die Neufassung der DIN 18230, soweit erforderlich.

Die Zusammensetzung der Projektgruppe wurde entsprechend dem Arbeitsauftrag der Projektgruppe aus Vertretern oberster Bauaufsichtsbehörden, der Feuerwehren und Werkfeuerwehren sowie Vertretern aus dem Normenausschuss DIN 18230-1 gebildet.

Die konstituierende Sitzung der Projektgruppe fand schließlich am 30. Mai 2007 statt. Der Arbeitsauftrag der Projektgruppe wurde Ende 2007 um das Thema „Rauchableitung“ erweitert, da die Fachkommission Bauaufsicht zwischenzeitlich beschlossen hatte, alle Mustervorschriften in Hinblick auf die Anforderungen an die Rauchableitung zu überprüfen. Insofern wurde der Projektgruppe MIndBauRL der Auftrag erteilt, auch die Vorschriften über die Rauchableitung zu überarbeiten und das Ergebnis mit der Projektgruppe Brandschutz abzustimmen. Das Thema Rauchableitung wird im Rahmen dieses Vortrages nicht weiter ausgeführt, weil die Abstimmungen mit der Projektgruppe Brandschutz noch nicht abgeschlossen sind.

Die Sitzungsergebnisse der Projektgruppe flossen auch bei den zunächst parallel weiter stattfindenden Beratungen zur DIN 18230-1 ein, sodass eine enge Abstimmung zwischen der Projektgruppe MIndBauRL und dem Normungsgremium DIN 18230-1 sichergestellt wurde.

ANPASSUNG AN DIE MUSTERBAUORDNUNG – MBO 2002

Nach Verabschiedung der MBO 2002 wurde es erforderlich, alle Muster-Vorschriften der ARGEBAU daraufhin zu untersuchen, ob sich ein Anpassungsbedarf an die MBO 2002 ergibt. Bei der Überprüfung der MIndBauRL hat sich gezeigt, dass auch hier Änderungen im Hinblick auf die MBO 2002 erforderlich werden. Dabei entsprechen vor allem die in der MIndBauRL aufgeführten Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer der tragenden und aussteifenden Bauteile (F 30, F 60, F 90) nicht der MBO 2002, die nur die Begriffe feuerhemmend, hochfeuerhemmend und feuerbeständig kennt. Dies galt zwar in der MBO 1997 entsprechend, mittlerweile können Bauprodukte aber auch nach europäischen Klassifizierungsnormen geprüft und verwendet werden. Derzeit regelt die Bauregelliste, dass den bauaufsichtlichen Anforderungen feuerhemmend, hochfeuerhemmend und feuerbeständig sowohl durch klassifizierte Bauteile nach DIN 4102 Teil 2 als auch nach DIN EN 13501 entsprochen werden kann (vgl. Bauregelliste A, Teil 1, Anlage 0.1). Die Klassifizierungen sind für den Nachweis der geforderten Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils somit alternativ anwendbar. Eine Vergleichstabelle zwischen klassifizierten Bauteilen nach DIN 4102 und DIN EN 13501 stellt die Bauregelliste aber nicht her. Insofern ist es erforderlich, in der MIndBauRL zukünftig die Begriffe der MBO 2002 zu verwenden. Dies wird die Lesbarkeit einiger Tabellen der neuen MIndBauRL nicht erleichtern.

ÜBERARBEITUNG DER VERFAHRENSVORSCHRIFTEN DER MINDBAURL

In den Verfahrensvorschriften werden als grundlegende Änderungen

- die bisherigen „Emporen und Galerien“ durch „Einbauten“ ersetzt,
- der Begriff „Ebenen“ eingeführt und
- das F-Faktor-Verfahren durch den „neuen Flächenansatz“ abgelöst.

Ausgangspunkt der Überlegungen für die Anforderungen an die Errichtung von „Ebenen“ und „Einbauten“ waren die Einsatzbedingungen der Feuerwehr, insbesondere die Frage, ob die Einsatzkräfte die jeweiligen Grundfläche für eine wirksame Brandbekämpfung betreten müssen oder nicht. Infolgedessen unterliegen Einbauten, die nicht auf ihre Standsicherheit bemessen werden, Einschränkungen im Hinblick auf ihre Größe bzw. werden besondere Anforderungen an die Rettungswegführung gestellt.

Vereinfachtes Verfahren nach Abschnitt 6

Zunächst sei angemerkt, dass die Projektgruppe den Auftrag hatte, das „vereinfachte Verfahren“ nach Abschnitt 6 möglichst unverändert zu erhalten. Dieses Verfahren, das bei der letzten Überarbeitung der MIndBauRL in 2000 neu aufgenommen wurde, wird nach Aussagen der Mitglieder der Projektgruppe in ca. 90 % der Fälle in Genehmigungsverfahren zu Grunde gelegt. Es hat sich in der Praxis bewährt und wird sowohl von (Fach-)Planern als auch von den Bauaufsichtsbehörden akzeptiert.

Allerdings stellte sich in den Beratungen der Projektgruppe heraus, dass das Verfahren nach Abschnitt 6 z.T. fehlerhaft angewendet wurde bzw. die Regelung über Emporen und Galerien in einer Form ausgenutzt wurde, wie sich das die Mitglieder der ehemaligen Projektgruppe nicht vorgestellt hatten. Auf der Grundlage der geltenden MIndBauRL wurden Industriebauten genehmigt, bei denen in jedem Geschoss Galerien und Emporen mit einer Größe von nahezu 50 % der der Fläche des Geschosses vorgesehen waren. Dies zum Teil auch in Fällen, in denen in der Geschossdecke betriebsbedingt Öffnungen ohne entsprechend qualifizierte Verschlüsse vorhanden waren.

Aus diesem Grund wird zunächst in den Begriffen der MIndBauRL in Anlehnung an § 31 Musterbauordnung (MBO) klargestellt, dass Geschosse durch Geschossdecken getrennt werden, die raumabschließend und standsicher sind. Daraus folgt, dass Decken mit Öffnungen, oder Decken mit Öffnungsverschlüssen, die nicht in der gleichen Feuerwiderstandsfähigkeit der Decken verschlossen werden, keine Geschosse trennen können. Die Flächen unter- und oberhalb solcher „offenen Decken“ sind somit Bestandteil desselben Geschosses.

Die Begriffe Emporen und Galerien werden durch den Begriff Einbauten abgelöst. Der Begriff wird wie folgt definiert: „

Einbauten umfassen einzelne auf gleicher Höhe liegenden Räume oder Raumteile. Einbauten sind brandschutztechnisch nicht bemessen.

Bei den Einbauten haben sich insbesondere die Vertreter der Feuerwehren dafür eingesetzt, die Größe von nicht bemessenen Flächen zur Erhöhung der Sicherheit für Feuerwehr-Einsatzkräfte zu begrenzen. Folgende Anforderungen werden im Entwurf der MIndBauRL an Einbauten gestellt:

„Tabelle 1: max. Grundfläche von Einbauten je Geschoss

Sicherheits-kategorie	*K 1*	*K 2*	*K 3.1*	*K 3.2*	*K 3.3*	*K 3.4*	*K 4*
max. Fläche m²	*400*	*600*	*720*	*800*	*920*	*1000*	*1400*

Bei der Ermittlung der Grundfläche von Einbauten werden Öffnungen innerhalb des Einbaus nicht abgezogen.

Diese Flächen dürfen mehrfach angeordnet werden, wenn die Einzelflächen durch brandlastfreie Zonen von mindestens 5 m Breite (Freistreifen) oder durch geschlossene, brandschutztechnisch qualifizierte Abschottungen getrennt sind. In Summe dürfen diese Flächen jedoch nicht mehr als 25 % der Grundfläche des jeweiligen Geschosses bzw. der jeweiligen Ebene betragen. Dies gilt für Teilabschnitte nach 3.7 entsprechend.

Bei Regalen, die durch Laufbühnen in mehreren Höhenniveaus zugänglich sind, sind für die Ermittlung der Flächen nur die Verkehrswege anzurechnen.

Falls in den Einbauten keine selbsttätigen Löschanlagen angeordnet werden, sind diese Flächen so anzuordnen, dass die Feuerwehr geeignete Löschmaßnahmen von einem sicheren Standort aus vortragen kann."

Bei Regalen sind nur die begehbaren Flächen (Verkehrsflächen) zur Ermittlung der Größe von Einbauten bzw. Ebenen zu Grunde zu legen. Diese Bewertung kann im Vergleich zu Einbauten mit beliebiger Lagerkonfiguration begründet werden, da bei Regallägern eine wesentlich übersichtlichere Verteilung von Lagergut und Verkehrsflächen und damit eine günstigere Situation auch für den Einsatz der Feuerwehr gewährleistet ist.

Neben diesen Änderungen wird Abschnitt 6 weitgehend unverändert bleiben, wie aus der nachfolgend abgedruckten, lediglich redaktionell überarbeiteten Tabelle 2 zu entnehmen ist:

„Tabelle 2 Zulässige Größe der Brandabschnittsflächen in m²

Sicherheitskategorie	Anzahl der oberirdischen Geschosse des Gebäudes								
	erdgeschossig		2geschossig		3geschossig			4geschossig	5geschossig
	Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden und aussteifenden Bauteile								
	aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerhemmend	Feuerhemmend	Hochfeuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Hochfeuerhemmend und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen	Feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen
K 1	1 800 [1)]	3 000	800 [2) 3)]	1 600 [2)]	2 400	1 200 [2) 3)]	1 800	1 500	1 200
K 2	2 700 [1)]	4 500	1 200 [2) 3)]	2 400 [2)]	3 600	1 800 [2)]	2 700	2 300	1 800
K 3.1	3 200 [1)]	5 400	1 400 [2) 3)]	2 900 [2)]	4 300	2 100 [2)]	3 200	2 700	2 200
K 3.2	3 600 [1)]	6 000	1 600 [2)]	3 200 [2)]	4 800	2 400 [2)]	3 600	3 000	2 400
K 3.3	4 200 [1)]	7 000	1 800 [2)]	3 600 [2)]	5 500	2 800 [2)]	4 100	3 500	2 800
K 3.4	4 500 [1)]	7 500	2 000 [2)]	4 000 [2)]	6 000	3 000 [2)]	4 500	3 800	3 000
K 4	10 000	10 000	8 500	8 500	8 500	6 500	6 500	5 000	4 000

[1)] *Breite des Industriebaus ≤ 40 m und Wärmeabzugsfläche ≥ 5 % (siehe Anhang 2)*

[2)] *Wärmeabzugsfläche ≥ 5 % (siehe Anhang 2)*

[3)] *Für Gebäude der Gebäudeklassen 3 und 4 ergibt sich nach § 27 Abs. 1 Satz 2 Nr. 2 und 3 i. V. m. § 30 Abs. 2 Nr. 2 MBO eine zulässige Größe von 1 600 m²“*

Verfahren mit Brandlastermittlung nach Abschnitt 7

In der geltenden MIndBauRL 2000 werden in Abschnitt 7 Öffnungen in Geschossdecken gestattet, welche jedoch in Abhängigkeit der Anzahl der miteinander verbundenen Geschosse (Faktor F4) bzw. der Charakteristik der Öffnungen (Faktor F5) zu einer deutlichen Reduzierung der zulässigen Brandbekämpfungsabschnittsfläche des jeweils einzelnen Geschosses führt.

Schon die bisherige Systematik ermöglicht prinzipiell die Berücksichtigung von Deckenöffnungen, unterstellt aber dabei grundsätzlich, dass Geschosse gleicher Größe gleichsam identisch „übereinander gesetzt“ werden („Schuhschachtelsystem“). Eine Bewertung der für den Industriebau typischen Geometrien mit flexibler Grundflächengestaltung lässt dieses System nur in bedingtem Maße zu.

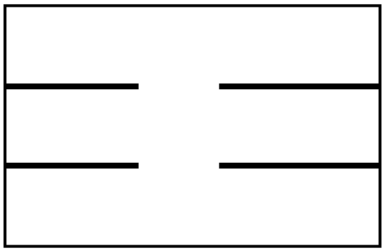


Bild 1 Schuhschachtelsystem

Die Überarbeitung des Abschnitts 7 der MIndBauRL wird erforderlich, um die notwendige Harmonisierung mit der Neufassung der DIN 18230-1 zu erreichen. Bei der Überarbeitung stellte sich vor allem das Problem heraus, die neu eingeführte Differenzierung zwischen Geschossen und Ebenen in die bestehenden Strukturen der MIndBauRL einzuordnen. Wie sollen beispielsweise Ebenen dem Faktor F 4 „Anzahl der Geschosse des Brandbekämpfungsabschnittes“ zugeordnet werden? Ebenso ergab sich die Notwendigkeit, Korrekturen beim Faktor F 5 vorzunehmen sowie Lösungen für übliche Elemente wie Kopfbauten, Galerien, Bühnen, begehbare Regale, etc., die derzeit nicht in der MIndBauRL behandelt sind, anzubieten.

Aus diesen Gründen hat sich die Projektgruppe dazu entschlossen, Abschnitt 7 grundlegend zu überarbeiten.

Nach DIN 18230-1:2010-09 umfassen Ebenen auf gleicher Höhe liegende, sowie in der Höhe versetzte Räume oder Raumteile mit Decken, die auf die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F standsicher bemessen sind und freie bzw. mit nichtbrennbaren Baustoffen verschlossene Öffnungen beliebiger Größe aufweisen können. Eine Ebene ist nach DIN 18230-1 keine Fläche, sondern ein Raum, der vergleichbar mit einem Geschoss ist. Eine Ebene erstreckt sich wie ein Geschoss zwischen den Umfassungsbauteilen eines Brandbekämpfungsabschnittes. Sie unterscheidet sich von Geschossen nur derart, als die Decke der Ebene zwar standsicher bemessen werden muss, sie aber im Gegensatz zur Geschossdecke nicht raumabschließend ist. Aus diesem Grund ist die Errichtung von Ebenen im Anwendungsbereich von Abschnitt 6 unzulässig, weil zwischen Geschossen zwingend Geschossdecken zu errichten sind.

Die Änderung bei der Flächenermittlung in Abschnitt 7 der MIndBauRL besteht im Grundsatz darin, dass generell nicht mehr die Fläche des einzelnen Geschosses/Ebene, sondern nunmehr die neu definierte Brandbekämpfungs-ab-

schnittsfläche, also die aufaddierten Grundflächen der Geschosse und Ebenen, als Bewertungsgrundlage dienen. In Fortschreibung der bisherigen Systematik wird für die Bewertung der einzelnen Geschosse bzw. Ebenen, die oberhalb einer Bezugsebene (definiert als von der Feuerwehr erreichbares Zugangsniveau) liegen, herangezogen:

- die tatsächliche Höhenlage über dem Bezugsniveau (nicht nur die Höhe innerhalb des jeweiligen BBA) als Kriterium für die Erreichbarkeit für Einsatzkräfte der Feuerwehr (F_H), sowie
- die Risiken einer vertikalen Brandausbreitung in Abhängigkeit von Öffnungen (F_A).

Für die Bestimmung der Faktor F_H und F_A wurden Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen von Frau Dr. Kersken-Bradley [2] über die Brandausbreitung in einem Brandbekämpfungsabschnitt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen horizontalen bzw. vertikalen Brandausbreitungsgeschwindigkeit zu Grunde gelegt.

In einer Tabelle wird zunächst ein Grenzwert für die Größe eines Brandbekämpfungsabschnittes in Abhängigkeit der Sicherheitskategorie und der äquivalenten Branddauer vorgegeben. Dieser Grenzwert ist kalibriert an den nach der geltenden Richtlinie möglichen Flächen, da das Sicherheitsniveaus der geltenden MIndBauRL im Grunde erhalten bleiben soll.

Tabelle 4 Zulässige Summe der bewerteten Grundflächen der Geschosse und Ebenen eines Brandbekämpfungsabschnittes zul A_{bew} in m²

Sicherheits-kategorie	*äquivalente Branddauer $t_ä$ in Minuten*				
	≤ 5	*15*	*30*	*60*	*≥ 90*
K1	*30.000*	*20.000*	*12.000*	*6.000*	*4.000*
K2	*50.000*	*30.000*	*18.000*	*9.000*	*6.000*
K3.1	*60.000*	*36.000*	*21.600*	*10.800*	*7.200*
K3.2	*67.000*	*40.000*	*24.000*	*12.000*	*8.000*
K3.3	*77.000*	*46.000*	*27.600*	*13.800*	*9.200*
K3.4	*85.000*	*50.000*	*30.000*	*15.000*	*10.000*
K4	*120.000*	*70.000*	*42.000*	*21.000*	*14.000*

Bei den in der Tabelle aufgeführten Flächen handelt es sich nicht um die Flächen, die tatsächlich gebaut werden dürfen, sondern um so genannte „bewertete Flächen“. Der geplante Industriebau wird mit den Bewertungsfaktoren F_H und F_A gewichtet und schließlich mit den bewerteten Flächen (Grenzwert) verglichen:

„Die Summe der bewerteten Grundflächen der einzelnen Geschosse und Ebenen A_i darf den Wert zul A_{bew} gemäß Tabelle 4 nicht überschreiten.

$$zul\ A_{bew} > A_G \times F_{H1} \times F_{A1} + \sum_{i=2}^{n} A_{Ei} \times F_{Hi} \times F_{Ai}$$

mit A_G = Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes

A_{Ei} = Grundfläche des Geschosses i oder der Ebene i

i = Laufindex für weitere Geschosse und Ebenen über der Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes

n = Anzahl der über der Grundfläche gelegenen Geschosse und Ebenen

Zwischenwerte in den Tabellen dürfen linear interpoliert werden.“

Es findet also ein Vergleich des tatsächlich zu bauenden Gebäudes mit dem in der MIndBauRL festgelegten Grenzwert statt, wobei die tatsächliche Fläche jedes einzelnen Geschosses oder Ebene 75 % des Grenzwertes nicht überschreiten darf. Die Gewichtung hat zur Folge, dass bei einer steigenden Gefahr einer Brandausbreitung über Öffnungen bzw. aufgrund der Höhenlage von Ebenen der „Flächenverbrauch“ steigt. In der Folge wird bei Vorhandensein von Ebenen die Grundfläche eines Brandbekämpfungsabschnittes kleiner werden müssen als bei einem vergleichbaren Brandbekämpfungsabschnitt ohne Ebenen. Flächen, die durch Geschossdecken abgetrennt sind, können dagegen – anders als bisher – vergleichsweise größer werden.

Zur Überprüfung der bewerteten Flächen liegen Vergleichsrechnungen (Parameterstudien) vor. Es wurden verschiedene Gebäudekonfigurationen, zum Teil mit einer oder mehreren Ebenen, betrachtet. Die Flächenauslastung nach geltender MIndBauRL (reale Flächen) wurde mit dem neuen Flächenansatz (bewertete Flächen) verglichen. Es hat sich gezeigt, dass es nur 3 Beispiele gab, die nach dem neuen Flächenansatz abweichend zur geltenden MIndBauRL zulässig wären. Dabei handelt es sich in 2 Fällen um 2-geschossige Gebäude und in einem Fall um ein Gebäude mit 4 Ebenen und versetzt angeordneten Öffnungen. Bei der Bewertung des Ergebnisses ist zu berücksichtigen, dass in der Neufassung der DIN 18230-1 Öffnungen nunmehr auch versetzt angeordnet werden dürfen, wenn sie gleichmäßig verteilt sind. Würde man dieses Prinzip gedanklich in die geltende Fassung der MIndBauRL übertragen, müsste statt dem Wert 0,2 in F5 (wenn Öffnungen nicht übereinander liegen) der Wert 0,4 gewählt werden. Damit gäbe es eine weitere Angleichung bei den Vergleichsrechnungen. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass die Projektgruppe bei 2-geschossigen Industriebauten einen Mangel in der geltenden MIndBauRL sieht, der in der Neufassung behoben werden soll, so dass es bei diesen Gebäudetypen „planmäßig“ zu einer Vergrößerung der Flächen kommen soll.

Letztendlich kann es in einigen Fällen zu größeren Flächen von Industriebauten kommen. Allerdings ist zu bedenken, dass ohnehin der überwiegende Anteil von Industriebauten (ca. 90 %) nach Abschnitt 6 beurteilt wird, so dass sich

eine mögliche Flächenerhöhung auf höchstens 2 - 5 % der Industriebauten auswirken könnte. Dafür ermöglicht der neue Flächenansatz, dass jede individuelle Grundrissgestaltung mit den Bewertungsfaktoren erfasst werden kann. Durch diese neue Flexibilität kann die von der Projektgruppe als kritisch bewertete Regelung über Emporen und Galerien (50 %-Regelung) aufgegeben werden. Ohnehin gab es hier bislang eine Diskrepanz, weil Emporen und Galerien nach der DIN 18230-1 berechnet und damit berücksichtigt werden mussten, nach der geltenden Muster-Industriebaurichtlinie aber nicht. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Anzahl der Ebenen/Geschosse nicht ermittelt werden muss.

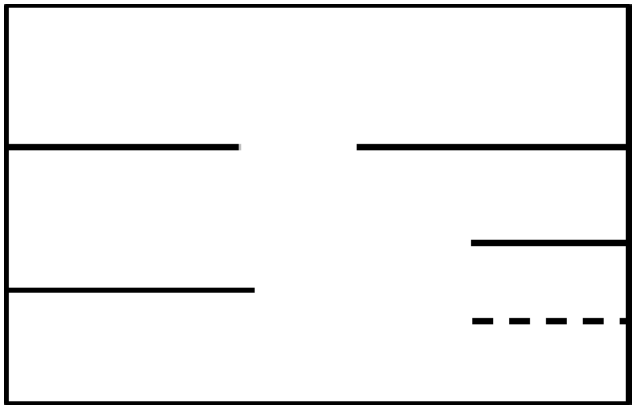


Bild 2 Wie viele Geschosse hätte dieses Gebäude?

Zusätzlich werden die für Abschnitt 6 vorgestellten Regelungen für Einbauten greifen. Einbauten können damit auch auf Ebenen errichtet werden. Zur Erinnerung: Im Gegensatz zu Geschossen und Ebenen besitzen Einbauten keine Anforderung an die Feuerwiderstandsdauer ihrer horizontalen und tragenden Bauteile.

ANFORDERUNGEN AN RETTUNGSWEGE

Der neue Flächenansatz und die Regelungen über Einbauten erfordern die Anpassung der geltenden Anforderungen an Rettungswege.

Im Grundsatz sollen für Einbauten und Ebenen die gleichen Anforderungen an die Rettungswege gestellt werden wie für Geschosse. Deshalb sind die bisher für Geschosse geltenden Rettungsweganforderungen auch auf Einbauten und Ebenen mit einer Grundfläche von > 200 m² anzuwenden (Anzahl der RW, RW-Längen etc.).

Ebenen sollen grundsätzlich mindestens einen auf gleicher Höhe liegenden Ausgang in einen anderen sicheren Bereich oder in einen notwendigen Treppenraum haben. Der zweite Rettungsweg darf über eine notwendige Treppe ohne notwendigen Treppenraum auf die unmittelbar darunter liegende Ebene oder Geschossdecke führen.

Einbauten werden vor allem für den Produktionsprozess bzw. -ablauf genutzt und befinden sich häufig an zentralen Stellen des Industriebaus. Eine direkte Anbindung an einen notwendigen Treppenraum oder anderen Brandabschnitt ist nur selten möglich. Deshalb dürfen alle Rettungswege über notwendige Treppen ohne notwendigen Treppenraum geführt werden, wenn sie auf die unmittelbar darunterliegende Ebene oder Geschossdecke führen und dort ein Ausgang in einen sicheren Bereich erreicht wird.

„Die Entfernung auf dem Einbau bis zu einer Treppe darf in diesen Fällen höchstens

- *bei Brandbelastung in Brandbekämpfungsabschnitten <15 kWh/m² 50 m,*
- *bei Vorhandensein einer Alarmierungseinrichtung für die Nutzer, deren Auslösung über eine automatischen Brandmeldeanlage oder eine selbsttätige Feuerlöschanlage und einer Handauslösung an den Ausgängen erfolgt, 35 m*
- *im Übrigen 25 m*

betragen.“

Weiterhin sind die vorgeschriebenen Rettungsweglängen zu beachten, d. h. von jeder Stelle eines Einbaus muss ein Ausgang in einen „sicheren Bereich“ in 35 m bzw. 50 m erreichbar sein. Allerdings ist dabei das Doppelte der Höhendifferenz der Einbauten zum Ausgangsniveau (das Niveau, auf dem sich der Ausgang ins Freie, in einen notwendigen Treppenraum, in einen anderen Brandbekämpfungsabschnitt befindet), von der zulässigen Rettungsweglänge abzuziehen.

Die Rettungswegregelung für Einbauten kann auch auf Ebenen übertragen werden, wenn die Größe der Ebene die maximal zulässige Fläche für Einbauten nicht überschreitet. In diesen Fällen darf von dem Grundsatz, dass ein Rettungsweg auf gleicher Höhe in einen sicheren Bereich führen muss, abgewichen werden.

Aus Sicht der Feuerwehr muss bei Industriebauten mit mehreren Einbauten und Ebenen sichergestellt werden, dass der Löschangriff immer mindestens auf 2 Höhenniveaus erfolgen kann, sonst können wirksame Löscharbeiten der Feuerwehr nicht ermöglicht werden. Werden Rettungswege von Einbauten ausschließlich auf die darunter liegende Ebene bzw. Geschossdecke geführt (gleicher Luftraum), muss sichergestellt werden, dass die Feuerwehr auch ohne Betreten der Einbauten löschen kann. Deshalb darf die Rettungsweglänge auf Ebenen in diesen Fällen nur max. 25 m (Wurfweite Strahlrohr) bzw. mit BMA und Alarmierungseinrichtung 35 m betragen.

Eine Erleichterung wird für Kontroll- und Wartungsgänge, die nur gelegentlich begangen werden und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, eingeräumt. Diese dürfen über Steigleitern erschlossen werden, die in einer Entfernung von max. 100 m erreicht werden können müssen.

SONSTIGE ÄNDERUNGEN

Anwendungsbereich

Regallager mit Lagerguthöhen von mehr als 9,0 m (Oberkante Lagergut) sind in den Anwendungsbereich der MIndBauRL aufgenommen worden. Bisher sind Hochregallager mit mehr als 9,0 m Höhe vom Anwendungsbereich der IndBauRL ausgeschlossen. Nach Abschnitt 6 IndBauRL müssen in Lagergebäuden und Gebäuden mit Lagerbereichen bei Lagerguthöhen von mehr als 7,5 m (bis maximal 9,0 m) selbsttätige Feuerlöschanlagen angeordnet werden. Auch bei einer Brandlastermittlung nach Abschnitt 7 ist bei brennbaren Materialien in der Regel davon auszugehen, dass eine selbsttätige Feuerlöschanlage ab 7,5 m erforderlich wird. Die Anwendung der DIN 18230-1 für Regallager mit Lagerguthöhen von mehr als 9 m (Oberkante Lagergut über Oberkante Fußboden) ist dagegen nicht vorgesehen, sodass solche Hochregallager, sollten sie in den Anwendungsbereich der MIndBauRL aufgenommen werden, nur nach Abschnitt 6 behandelt werden könnten.

Bei Lagerguthöhen über 9,0 m Höhe können über die selbsttätigen Feuerlöschanlagen hinaus weitere Maßnahmen erforderlich werden, z. B. solche, die in der VDI-Richtlinie 3564 – Empfehlungen für Brandschutz in Hochregalanlagen – aufgeführt sind. Deshalb wird die MIndBauRL für weitergehende Anforderungen in Hinblick auf Hochregallager mit brennbarem Lagergut geöffnet. Bei Hochregallagern mit nichtbrennbarem Lagergut (z. B. Stahllager) dürften dagegen keine weitergehenden Anforderungen erforderlich sein.

Nebenräume, Kopfbauten

Der Umgang mit so genannten Kopfbauten (Büro- und Verwaltungsnutzung) und die quasi bei jedem Industriebau vorkommenden Nutzungen in Räumen, die nicht dem Anwendungsbereich der MIndBauRL unterfallen (nicht Produktion oder Lagerung), werden in der Praxis häufig kontrovers diskutiert. Darum wird 3.1 Begriffe MIndBauRL um folgenden Satz ergänzt:

„Hierzu zählen auch anders genutzte Räume (z.B. dem Betrieb zugeordnete Büro- und Verwaltungsräume, Meisterbüros, Sozialräume, Laborräume, Prüfstandsbereiche, Entwicklungsflächen), in der Summe von max. 25 % der Summe der Geschossflächen eines Brandabschnittes oder der Brandbekämpfungsabschnittsfläche.“

Damit können zukünftig alle für einen Industriebetrieb notwendigen Nutzzungen mit der MIndBauRL abschließend behandelt werden. Soll ein Nutzungsbereich brandschutztechnisch vom Industriebau getrennt werden, muss dies künftig zwingend durch eine Brandwand erfolgen.

LITERATUR

[1] Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau (MIndBauRL), Fassung März 2000

[2] Kersken-Bradley, M.: Brandabschnittsflächen im Industriebau, vfdb-Zeitschrift, Heft 2 /2010

NEUE DIN 18230-1 – VEREINFACHTER NACHWEIS DES BAULICHEN BRANDSCHUTZES IM INDUSTRIEBAU

Helge Jürgen Dargel
Bayer Technology Services GmbH, Leverkusen

VORBEMERKUNG

Vor dem Hintergrund von fast 10 Jahren Anwendungserfahrung wurde von 2005 bis 2009 die DIN 18230-1 überarbeitet.

Schwerpunkte der Bearbeitung waren:

- Präzisierung des Anwendungsbereichs und der Begriffe
- Redaktionelle Neustruktur
- Anpassung und klare Abgrenzung zur Industriebaurichtlinie
- genauere Berücksichtigung von Rauch- und Wärmeabzügen
- genauere Berücksichtigung mehrgeschossiger Gebäude mit Öffnungen in den Decken (mehrebenige Gebäude)
- Berücksichtigung von gekapselten/abgeschotteten Bereichen
- Abtrennung von Teilabschnitten bei erdgeschossigen Brandbekämpfungsabschnitten

Die Norm ist inzwischen mit Datum September 2010 veröffentlicht. Der Autor war Mitarbeiter des zuständigen Normenausschusses und stellt in diesem Beitrag die wesentlichen Neuerungen vor.

GRUNDLAGEN DER NORM

Die Ermittlung der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer von maßgeblichen Bauteilen des zu betrachtenden Brandbekämpfungsabschnittes (BBA) erfolgt vereinfacht auf der Annahme, dass der BBA durch die vorhandene oder anrechenbare Brandlast im Vollbrand steht und die anrechenbaren Wärmeabzugsöffnungen offen sind.

Dabei wird mittels einer Wärmebilanzbetrachtung ermittelt, wie viel Wärme aus der im BBA vorhandenen Brandlast rechnerisch freigesetzt wird und wie viel Wärme über die Außenbauteile und die Wärmeabzugsflächen in die Umgebung abgegeben wird und damit auf die zu bemessenden Bauteile thermisch nicht einwirkt.

Das Rechenverfahren berücksichtigt zudem semi-probabilistisch (beruhend auf mittleren Wahrscheinlichkeitsdaten) die verfügbare Brandschutzinfrastruktur (BMA, Werkfeuerwehr, flächendeckende Feuerlöschanlagen) in Form des

Zusatzbeiwertes α_L. Das Sicherheitskonzept der Norm wurde für die neue Fassung unverändert übernommen.

Ebenen und Einbauten

Als erster und vielleicht auffälligster oder ungewöhnlichster Begriff sei der Begriff der Ebene genannt. Er stellt das Pendant zum Geschossbegriff nach Bauordnung dar. Da der Geschossbegriff im Baurecht eindeutig definiert ist und auch in der Industriebaurichtlinie in Tabelle 1 des Abschnitts 6 für mehrgeschossige Brandabschnitte benötigt wird, war für die „mehrebenigen“ Brandbekämpfungsabschnitte ein neuer Begriff erforderlich.

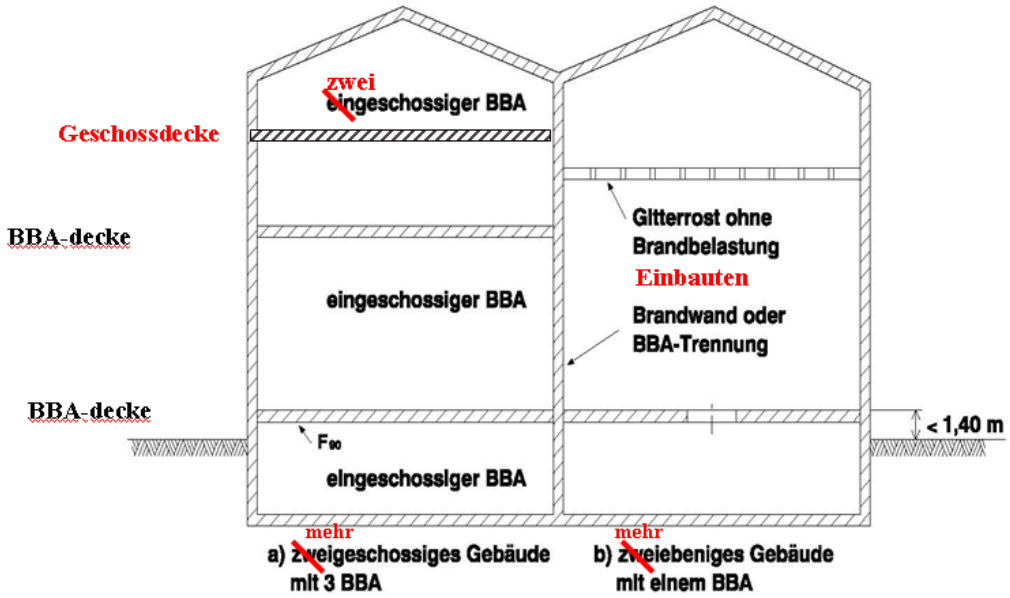


Bild1 Definition von Ebenen/Geschossen/Einbauten

Ein Geschoss wird durch Boden und Geschossdecke mit einer bestimmten Feuerwiderstandsklasse - zwischen zwei Außenwänden bzw. Brandwänden - abgeschlossen. Öffnungen ohne Abschottungen sind unzulässig. Im Gegensatz dazu kann der Boden einer Ebene bzw. die Decke über einer Ebene innerhalb eines Brandbekämpfungsabschnittes Öffnungen aufweisen oder/und aus Teilstücken (Emporen, Balkonen) zusammengesetzt sein. Mehrere kleinere Teilflächen gleicher Qualität und Höhe, die für die erforderliche Feuerwiderstandsdauer bemessen sind, können zu einer Ebene zusammengefasst werden. Nicht bemessene Flächen werden Einbauten genannt.

Brandbekämpfungsabschnittsfläche

Die Brandbekämpfungsabschnittsfläche setzt sich aus der Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes zwischen den Außenwänden und den Brandbekämpfungsabschnittswänden und aus der Summe der anrechenbaren Flächen darüberliegender Ebenen zusammen. Öffnungen und Gitterrostflächen zählen

wie bisher nicht zur Brandbekämpfungsabschnittsfläche. Mit der Neuregelung zählen aber auch Abdeckungen und Blechbühnen nicht zur anrechenbaren Fläche der Ebene, wenn sie nicht die erforderliche Feuerwiderstandsdauer des Brandbekämpfungsabschnittes haben. Die auf diesen Einbauten befindliche Brandlast ist der nächsten darunterliegenden anrechenbaren Fläche zuzuschlagen. Während die alte DIN sich mit der Abschirmwirkung solcher geschlossener Flächen begnügte, hat der Normenausschuss hier die Norm verschärft; was vor allem Auswirkungen auf mehrebenige Anlagen mit geschlossenen Blechbühnen und einer nicht mehr geringen Brandlast haben wird.

Einrichtungsschutz

Ein weiterer neuer Begriff ist der Einrichtungsschutz. Mit Einrichtungsschutzanlagen lassen sich einzelne Einrichtungen (Maschinen, Apparate, Lagerbehälter, aber nicht Lagerflächen) so sicher schützen, dass diese Einrichtungen nicht zur Brandentwicklung und Brandausbreitung beitragen. Analog lassen sich erhöhte, lokal begrenzte Brandlasten auf definierten Teilflächen, z.B. Bereitstellungsflächen, durch selbsttätige Löschanlagen oder halbstationäre Löschanlagen schützen.

Die Gefahr des „Überlaufens“ solcher Einrichtungen und Flächen durch einen Brand von außen, ist durch ausreichend breite Freistreifen (wie bei Teilabschnitten) zu verhindern. Die für die Einrichtung oder Teilfläche dimensionierten selbsttätigen Feuerlöschanlagen stehen ausschließlich für diese Einrichtung zur Verfügung und müssen jeweils ihren eigenen Löschmittelvorrat vorhalten. Die Wirkfläche der Löschanlage muss bei Teilflächen das Doppelte der Teilfläche betragen und die Freistreifen einschließen. Bei Teilflächen können analog auch geeignete halbstationäre Löschanlagen eingesetzt werden. Löschanlagen für diesen Zweck dürfen nicht bei der Ermittlung des Zusatzbeiwertes α_L angerechnet werden. Das Restrisiko wird durch Ansatz der Mindestbrandlast von 15 kwh/m² berücksichtigt.

Die zu schützenden Einrichtungen und Teilflächen dürfen max. 400 m² groß sein. Kommen bei sehr großen Brandbekämpfungsabschnitten mehrere solcher Teilflächen vor, dürfen diese nicht aneinander stoßen und in der Summe nicht mehr als 10% der Brandbekämpfungsabschnittsfläche belegen.

Globaler Nachweis

Im Gegensatz zur gültigen DIN 18230-1 darf $t_{ä}$ als Eingangsgröße für die Industriebaurichtlinie als das flächenmäßig gewichtete arithmetische Mittel der einzelnen $t_{äi}$ der Ebenen i des mehrebenigen Brandbekämpfungsabschnittes ermittelt werden, wenn die mittlere rechnerische Brandbelastung der Ebenen 60 kWh/m² und auf Teilflächen mit erhöhten Brandlasten 100 kWh/m² nicht überschreitet. Bei mehreren Teilabschnitten eines eingeschossigen Brandbekämpfungsabschnittes wird ebenfalls das gewichtete arithmetische Mittel für die Ermittlung von $t_{ä}$ herangezogen.

Anrechenbare Wärmeabzugsöffnungen

Anrechenbar sind ständig vorhandene Öffnungen, die ins Freie oder in einen anderen Abschnitt/Ebene führen, sofern sie eine Mindestgröße von neu 1 m² haben sowie Flächen von Toren und Türen, die durch die Feuerwehr geöffnet werden können. Hierzu gehören auch die Öffnungen, die der Zuluft dienen und die mindestens 6 m² groß sein müssen. Weiterhin anrechenbar sind solche Öffnungen, die mit Materialien verschlossen sind, die im Brandfall erst bei größeren Brandwirkungen zerstört werden. Insbesondere für Brandbekämpfungsabschnitte mit geringen Brandbelastungen (d. h. bei niedrigen äquivalenten Branddauern) treten im Brandfall erst spät bzw. gar nicht solch hohe Temperaturbeanspruchungen an den vorgenannten Bauteilen auf, so dass deren Zerstörung nur bedingt anzunehmen ist.

In Tabelle 1 sind die Bedingungen bezüglich der Anrechenbarkeit von Öffnungen zusammengestellt, die sich aus den Regelungen in 8.2 der Norm in Abhängigkeit von der Art der Öffnungsverschlüsse ergeben.

Tabelle 1 Anrechenbarkeit von Öffnungen bei der Berechnung des w-Faktors

Zeile	Art des Öffnungsverschlusses	Anrechenbarkeit
1	ständig offen	ab 1 m² Mindestgröße
2	Flächen von RWA-Geräten	immer
3	von außen ohne Gewaltanwendung zu öffnen	immer
4	Verglasungen mit Kunststoffen mit einer Schmelztemperatur < 300°C	im Dachbereich zu 100 % in der oberen Hälfte des Außenwandbereiches: bei $t_{ä}$ ≤ 15 min zu 50 %[a] bei $t_{ä}$ ≥ 30 min zu 100 % (Zwischenwerte durch Interpolation)
5	Verglasungen, die bei Brandeinwirkung ganz oder teilweise zerstört werden	Einfach-Fensterglas: bei $t_{ä}$ ≤ 15 min zu 80 %[a] bei $t_{ä}$ ≥ 30 min zu 100 % handelsüblichesZweischeiben-Isolierglas: bei $t_{ä}$ ≤ 15 min zu 35 %[b] bei 15 min < $t_{ä}$ 30 min zu 50 %[b] bei $t_{ä}$ ≥ 30 min zu 100 %
6	Flächen von Wärmeabzugsöffnungen	mit Nachweis, wenn die äquivalente Branddauer (ohne Berücksichtigung der betrachteten Öffnungen) größer ist als die Auslösezeit nach DIN 18232-7
7	Flächen von Öffnungen mit Abdeckungen, die im Brandfall zerstört werden	mit Nachweis flächiger Freigabe der Öffnungen durch Brandeinwirkung nach ETK

[a] Bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr darf der Wert 100 % angesetzt werden

[b] Bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr darf der Wert verdoppelt werden

Für Öffnungen, die mit Zweischeibenisolierglas verschlossen sind, darf der angegebene Wert bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr verdoppelt werden. Dies wird damit begründet, dass einer Werkfeuerwehr zugemutet werden kann, Öffnungen mit Gewalt zu schaffen. Kunststoffbekleidungen werden als Wetterschutzbekleidung bei Gebäuden häufig vollflächig über den gesamten Fassadenbereich ausgeführt. Ihre Anrechenbarkeit als Wärmeabzugsfläche im Brandfall ist dabei in Tabelle 1, Zeile 4, verdeutlicht. Danach ist zunächst nur die obere Hälfte des Außenwandbereiches in einer Ebene behandelt und als Wirkungsbereich für den Wärmeabzug ausgewiesen.

Damit wird dem Sachverhalt entsprochen, dass sich bei einer Fassade in der Regel nur in der oberen Hälfte des Außenwandbereiches die erforderlichen Öffnungstemperaturen einstellen. Wenn jedoch nachgewiesen wird, dass bei Vorhandensein einer Werkfeuerwehr diese technisch und organisatorisch in der Lage ist, die Kunststoffbekleidung auch in der unteren Hälfte rasch zu zerstören, so darf die gesamte Öffnungsfläche angesetzt werden.

Die horizontalen Öffnungen im Dach sind im allgemeinen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen z. B. nach DIN EN 12101-2 mit geprüften Wärmeabzugsöffnungen. Ansonsten gilt als Wärmeabzugsöffnung die lichte Öffnungsfläche. Für die Berechnung aus den Rohbaumaßen darf 85 % der Bruttofläche angesetzt werden, früher 90 %. Flächen, die im Brandfall nicht zerstört werden oder die nicht geöffnet werden können, wie z. B. Brandschutzverglasungen oder Verbundsicherheitsverglasungen, dürfen nicht angesetzt werden.

Brandbekämpfungsabschnitte mit mehreren Ebenen

In mehrebenigen Brandbekämpfungsabschnitten findet bei einem Brand unterhalb des Dachgeschosses eine Rauchgasströmung zwischen den einzelnen Ebenen durch die Öffnungen in den Ebenendecken statt. Die Wärme wird, neben dem Wärmeabfluss durch die Umfassungsbauteile, über die Öffnungen in den Außenwänden aller Ebenen und im Dach in die Umgebung abgegeben. In welchem Umfang eine Rauchgas- und Wärmeableitung aus der unten liegenden Ebene in die darüber liegenden Ebenen stattfindet, hängt u.a. wesentlich von der Größe und Anordnung der Öffnungsflächen ab, die in den Deckenflächen zur Verfügung stehen.

Bei mehrebenigen Brandbekämpfungsabschnitten und Öffnungen in den Decken von > 20% der Grundfläche und mindestens gleich großen Dach-öffnungen darüber, ist davon auszugehen, dass im Brandfall Wärme aus den unten liegenden Ebenen ungehindert in die obere Ebene und von dort über die Öffnungen im Dach in die Umgebung abgeführt wird.

In DIN 18230-1: 1998-05 war der Nachweis für die Ebenen in mehrebenigen Brandbekämpfungsabschnitten lediglich für übereinander liegende horizontale Öffnungen in den Decken und im Dach für die Bereiche $\leq$ 2 % sowie $\geq$ 20 % geregelt. Der Grund für den ungeregelten Zwischenbereich sind die nicht so

ohne weiteres ableitbaren Rauchgasströmungen zwischen den Geschossen, insbesondere die Frage inwieweit sich eine sogenannte Kaminwirkung einstellt. Eines der wesentlichen Ziele dieser Normenbearbeitung war es daher, die Lücke 2 % ≤ $A_{hi}/A_{E,i}$ ≤ 20 % im Anwendungsbereich der Norm zu schließen.

Zu diesem Zweck wurde unter Verwendung des Rechenprogramms MRFC in einer umfangreichen Parameterstudie durch die TU Wien das Brandverhalten in den jeweiligen Ebenen eines mehrebenigen Brandbekämpfungsabschnittes näher untersucht.

Unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen gelang es, die betrachtete Ebene auf den eingeschossigen Nachweis zurückzuführen (Bild 2).

Im genormten Rechenmodell werden die beiden Bereiche 0 % ≤ $A_{hi}/A_{E,i}$ < 20 % sowie $A_{hi}/A_{E,i}$ ≥ 20 % voneinander unterschieden. Bei der Anwendung der bezogenen horizontalen Öffnungsgrößen ≥ 20 % wird der bisherige Besitzstand der Norm beibehalten. Dagegen wurde der Anwendungsbereich zwischen 0 % und 20 % auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse neu definiert.

Für die Erstellung der Ebenennachweise im Bereich 0 % ≤ $A_{hi}/A_{E,i}$ < 20 % wird vorausgesetzt, dass die Öffnungen in den Decken und im Dach gleichmäßig verteilt sind. Dies gilt als erfüllt, wenn jeweils mindestens eine Öffnung auf 400 m² in übereinander liegenden Bezugsflächen vorhanden ist.

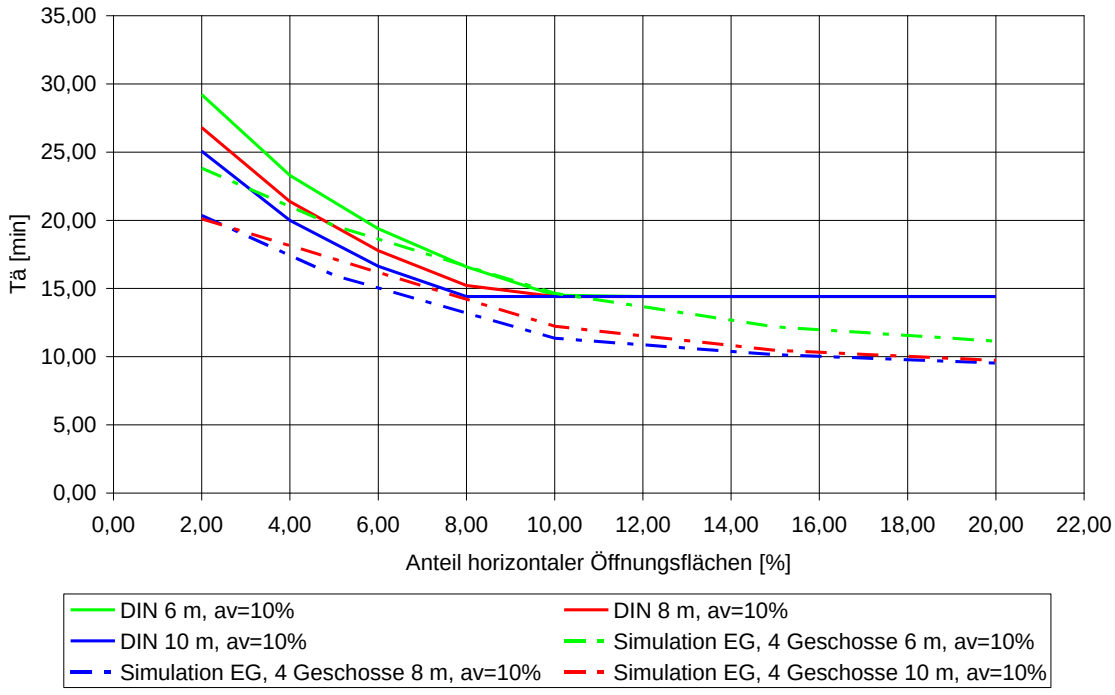


Bild 2 *Vergleich der Ergebnisse für $t_{ä}$ eines eingeschossigen BBA nach DIN 18230-1 und den Simulationsergebnissen für das Erdgeschoss bei einem 4-geschossigen Gebäude mit Geschosshöhen von 6 m, 8 m und 10 m (aus Bericht TU-Wien 12.07).*

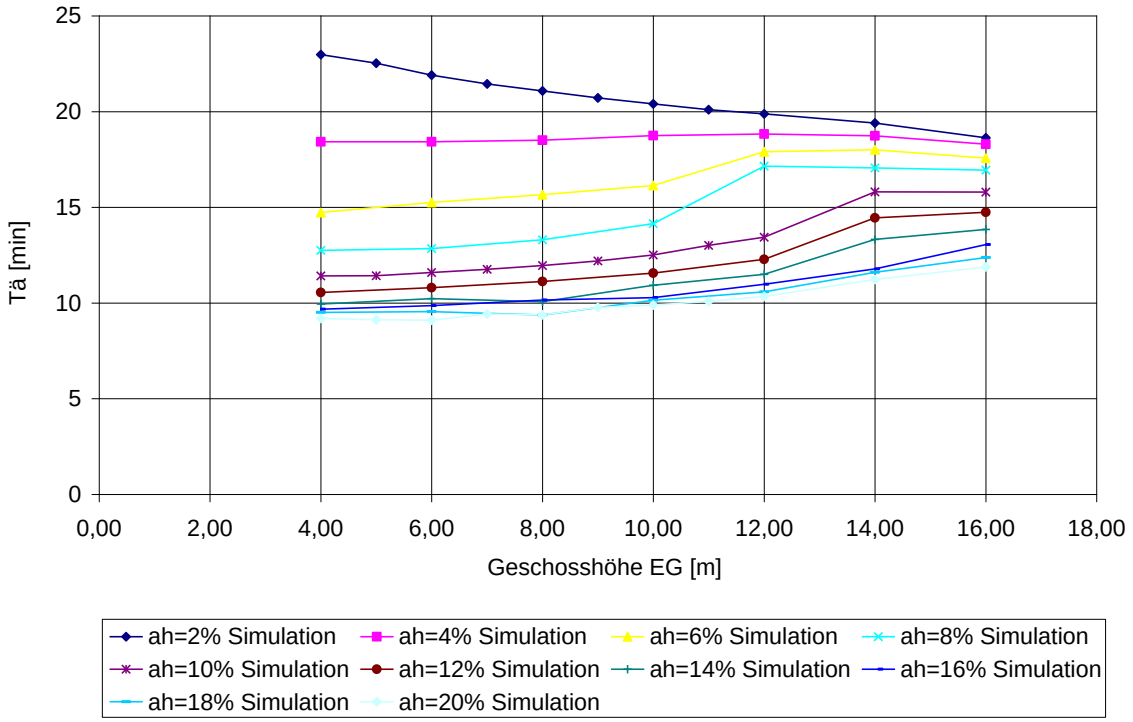


Bild 3 *Höhenabhängigkeit des tä im EG bei variablen Höhen EG (4 bis 16 m) und 1.OG (16 bis 4 m, Höhe EG + Höhe 1.OG =20 m, av = 0,1) (aus Bericht TU-Wien 12.07).*

Weiterhin wird zunächst unterstellt, dass die Höhe aller Ebenen gleich groß ist. Bei der Untersuchung des Brandverhaltens hat sich jedoch gezeigt, dass eine kleinere Höhe h_{i+1} im darüber liegenden Geschoss i+1 im Vergleich zur Höhe h_i des betrachteten Geschosses i zu ungünstigeren Werten führt, als dies bei gleichen oder größeren Höhen der Fall wäre. Zur Berücksichtigung des negativen Effektes bei $h_{i+1} < h_i$ ist daher der Wärmeabzugsfaktor w_i der Ebene i bei $h_{i+1} \leq 0{,}5\ h_i$ um 25 % zu vergrößern. Bei Werten $0{,}5 < h_i{+}1/h_i < 1{,}0$ kann interpoliert werden.

Liegen bei Brandbekämpfungsabschnitten mehrere Ebenen über der betrachteten Ebene und oder größere Höhen des Brandbekämpfungsabschnittes vor, so kann nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass die Temperaturen ausreichen, um die in Tabelle 1 unterstellten Zerstörungswirkungen zu erreichen. Es dürfen in diesen Fällen daher nur die Öffnungen gemäß Zeilen 1 bis 3 der Tabelle 1 angesetzt werden.

Wer die Randbedingungen für den Nachweis nicht einhalten kann oder wem dieses Ergebnis nicht genügt, dem verbleibt der Weg eines individuellen Einzelnachweises über Ingenieurmethoden.

Abtrennung von Teilabschnitten

Bei der Unterteilung von eingeschossigen Gebäuden in Teilabschnitte mittels definierter Freistreifen wird unterstellt, dass keine Übertragung von Feuer, jedoch von Rauch über die Abtrennungen hinweg erfolgt.

Die erforderliche Feuerwiderstandsdauer erf t_F wird für jeden Teilabschnitt unter Berücksichtigung der jeweiligen Besonderheiten nachgewiesen. Der Teilabschnittsnachweis ersetzt hierbei den globalen Nachweis für den Brandbekämpfungsabschnitt.

Will man Brandlastbeschränkungen vermeiden, muss eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein, die in Anhang A 2.2 nunmehr konkretisiert werden:

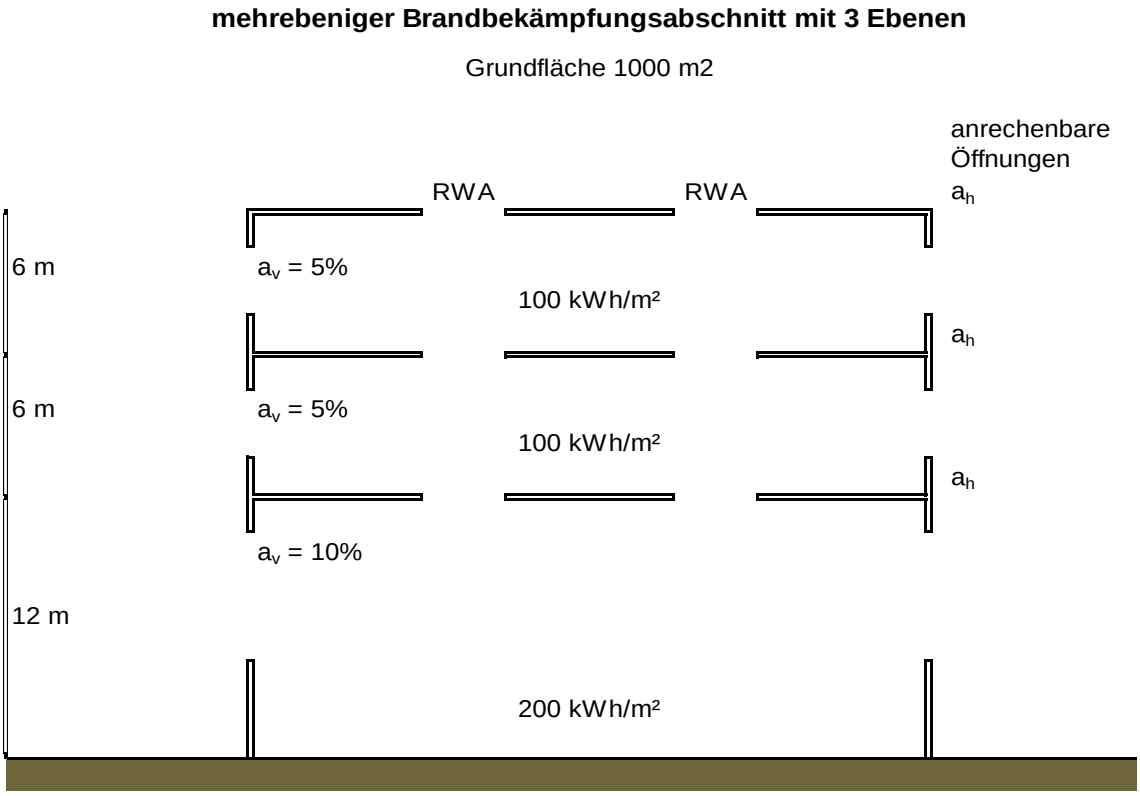
- selbsttätige, flächendeckende Feuerlöschanlage im gesamten BBA
- tragende Bauteile der Teilabschnitte müssen feuerbeständig sein
- Breite der Freistreifen größer 10m
- RWA mind. 1 % der Grundfläche in den Teilabschnitten
- Dachtragwerk im Bereich des Freistreifens aus nichtbrennbaren Baustoffen
- Bedachung aus nichtbrennbaren Baustoffen, lichtdurchlässig mindestens B1, nicht brennend abtropfend

BEISPIEL

Im Beispiel wird für einen Brandbekämpfungsabschnitt mit drei Ebenen der Parameter a_h variiert. Grundsätzlich kann der Einfluss von a_h ignoriert werden und eine geschlossene Decke unterstellt werden. Die Entlastung der Ebene erfolgt dann nur über die Öffnungen in der Außenwand. Wie das Ergebnis in Bild 6 zeigt, führt das zu höheren Anforderungen an die Tragkonstruktion. Die Deckenöffnungen bringen dagegen nennenswerte Entlastungen. Der globale Nachweis wurde hier wegen Überschreitung der 60 kWh/m² gesondert geführt (siehe auch Erläuterung der DIN 18230-1, 1997). Wegen der Reduzierung der Ebenenhöhen auf 50 % der unteren Ebene, ist w in Ebene 1 um 25 % zu erhöhen (vgl. Anhang B, B2). Nach der Berechnung der äquivalenten Branddauern der einzelnen Ebenen ist die gegenseitig Beeinflussung der Ebenen nach 4.1.4 zu überprüfen und die Frage ob das globale Ergebnis maßgebend ist.

Bei ungleichmäßiger Anordnung der horizontalen Öffnungen ist die Wirksamkeit der Öffnungen geringer. Deshalb fordert die Norm eine Reduktion der rechnerischen Öffnungsfläche um 20 % (Anhang B, B2). Darüber hinaus, ist der rechnerischen Brandlast 30 % der Brandlast des darunterliegenden Geschosses zuzuschlagen. Bild 6 zeigt, wie $t_ä$ dadurch ansteigt. Deutlich wird auch, dass dieser Nachteil durch größere Öffnungen kompensiert werden kann. Im Beispiel nicht verfolgt wurde der Einfluss von $t_ä$ auf die Öffnungen in der Fassade. Hier

kann eine iterative Vorgehensweise notwendig werden, um die Abhängigkeit der anrechenbaren Öffnungsflächen von $t_{ä}$ zu erfassen.



weitere Daten:

c = 0,2

A_G = 1000 m²

$A_B = A_G + A_{E1} + A_{E2}$ = 1000 m² + (1 - a_{h1})*1000 m2 + (1-a_{h2})*1000 m²

Bild 4 *Beispiel für einen 3 – ebenigen Brandbekämpfungsabschnitt mit unterschiedlichen Höhen der einzelnen Ebenen*

Wärmeabzugsfaktor w

a_h	gleichmäßig verteilt				ungleichmäßig verteilt			
	global	EG	1.Ebene	2.Ebene	global	EG	1.Ebene	2.Ebene
0%	1,74	1,1	1,98	1,98	1,74	1,1	1,98	1,98
2%	1,29	1,03	1,49	1,49	1,36	1,09	1,57	1,57
4%	1,03	0,83	1,19	1,19	1,12	0,89	1,29	1,29
10%	0,64	0,63	0,74	0,74	0,73	0,63	0,85	0,85
20%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,63	0,54	0,54

nach alter Norm nicht zulässig

Bild 5 *Wärmeabzugsfaktor für unterschiedliche horizontale Öffnungsflächen im Bsp. nach Bild 4*

äquivalente Branddauer $t_{ä}$

a_h	gleichmäßig verteilt				ungleichmäßig verteilt			
	global	EG	1.Ebene	2.Ebene	global	EG	1.Ebene	2.Ebene
0%	46,4	44	39,6	39,6	46,4	44	39,6	39,6
2%	34,4	41,2	34,4	29,8	36,3	43,6	50,2	40,8
4%	27,5	33,2	33,2	23,6	29,9	35,6	41,3	33,5
10%	17,1	25,2	25,2	14,8	19,5	25,2	27,2	22,1
20%	13,3	20	20	10	13,3	25,2	25,2	10,8

nach alter Norm nicht zulässig

Bild 6 *Äquivalente Branddauer für unterschiedliche horizontale Öffnungsflächen im Bsp. nach Bild 4*

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Als wesentliche Neuheit bringt die neue DIN 18230-1 eine, wenn auch mit Einschränkungen versehene Lösung für mehrebenige Brandbekämpfungsabschnitte mit Deckenöffnungen zwischen 2 % und 20 %.

Lokale erhöhte Brandlasten können in ihrer Wirkung auf dem gesamten Brandbekämpfungsabschnitt durch Einrichtungsschutzanlagen oder lokale Löschanlagen begrenzt werden.

Darüber hinaus gibt es eine ganze Reihe von Verbesserungen, die die Norm präziser und besser anwendbar machen.

Obwohl die Norm erst mit der Fertigstellung der noch in Bearbeitung befindlichen Musterindustriebaurichtlinie und deren bauaufsichtlicher Einführung offiziell anwendbar ist, bestehen aus Sicht der Projektgruppe Brandschutz (44. Sitzung) der Fachkommission Bauaufsicht, keine Bedenken, sie bereits heute einzusetzen. Dies muss jedoch im jeweiligen Einzelfall mit der Bauaufsichtsbehörde bzw. dem Prüfingenieur/Prüfsachverständigen abgestimmt werden und ist über eine Abweichung analog § 3 MBO zu regeln.

Für eine breite Anwendung der Norm wird auch die Weiterentwicklung der DIN 18230-2 und -3, m-Faktor Ermittlung des Abbrandverhaltens von Materialien in Lageranordnung – Werte für den Abbrandfaktor m und Rechenwerte, von Bedeutung sein. Die Bearbeitung hieran wurde aufgenommen.

Darüber hinaus arbeitet ein Normenausschuss daran, eine DIN 18230-4, Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs durch Brandsimulation (Ingenieurmethoden), zu erstellen. Hiermit entsteht eine Alternative zur DIN 18230-1, die eine genauere Berücksichtigung lokaler Einwirkungen und die Berechnung komplexer Gebäudegeometrien erlaubt.

ERARBEITUNG VON DIN 18230-4 – NACHWEISE DURCH BRANDSIMULATION IM INDUSTRIEBAU

Ulrich Max
Ingenieurbüro für Brandsicherheit AGB, Bruchsal
Ulrich Schneider
Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz, Technische Universität Wien, Wien

EINLEITUNG

Die neue Norm DIN 18230-4 soll für alle Industriebauten gemäß Muster-Industriebaurichtlinie (MIndBauRL) gelten und die allgemeine Anwendung von Ingenieurmethoden im Brandschutz gemäß Abschnitt 4.3 und Anhang 1 der Richtlinie erleichtern. Ziel ist es, die Eingangsparameter und Rechengrößen für Brandsimulationen in Industriegebäuden festzulegen, sodass die Anwendung im Rahmen eines vorgeschriebenen Verfahrens erfolgt und von behördlicher Seite aus gesehen nachvollziehbar und überprüfbar ist. Als Anwendungsbereiche kommen in Betracht:

- komplexe Gebäudegeometrien,
- Teilflächen oder -abschnitte von sehr großen Brandbekämpfungsabschnitten,
- lokale Brandwirkungen auf Bauteile,
- Wärmeabzug bei Gebäuden mit mehreren Ebenen mit Öffnungen an Stelle von Geschossdecken nach der MIndBauRL.

Die Brandsimulation kommt vor allen Dingen zum Einsatz, wenn die Grundvoraussetzung der DIN 18230-1, dass z. B. Brandlasten über die Grundfläche des Brandbekämpfungsabschnittes gemittelt werden dürfen, nur noch teilweise erfüllt oder nicht mehr gegeben ist. In diesen Fällen bleibt es nur übrig, die für eine Brandschutzbemessung größte Teilfläche mit der höchsten Brandbelastung und dem geringsten Wärmeabzug zu ermitteln und dafür die äquivalente Branddauer zu bestimmen. Dieser Teilbereich ist dann maßgebend für die Bemessung des gesamten Brandbekämpfungsabschnitts, ein globaler Nachweis nach DIN 18230-1 ist nicht mehr erforderlich und kann entfallen.

Im Folgenden werden einige Begriffe aus der DIN 18230-4 (Entwurf März 2011) erläutert, welche in der Praxis häufig zu Missverständnissen führen.

Äquivalente Normbranddauer $t_{ä}$: Zeit in Minuten, bei der im betrachteten Bauteil im Normbrand (Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1) näherungsweise dieselbe Wirkung (z. B. Temperatur) erreicht wird wie im (natürlichen) Bemessungsbrand.

Äquivalenzverfahren: Bestimmung der äquivalenten Normbranddauer von Bauteilen auf der Grundlage eines Temperatur-Zeit-Verlaufes, welcher bei einem Bemessungsbrand ermittelt wurde und nach einer äquivalenten Umrechnung der Brandwirkungen auf die Normbrandbeanspruchung nach DIN EN 1363-1 für die Bauteilbemessung verwendet wird.

Brandbelastung: Auf eine Referenzfläche bezogene Brandlast in einem Brandabschnitt oder Brandbekämpfungsabschnitt in kWh/m². Referenzflächen können sein BA-Flächen, BBA-Flächen oder Teilflächen bzw. Teilabschnitte davon.

Brandlast: Masse der brennbaren Stoffe in einem Brandabschnitt, Brandbekämpfungsabschnitt oder auf Teilflächen davon, jeweils multipliziert mit ihrem Heizwert in kWh.

Brandleistung: In einem realen Schadensfeuer durch den Brand erzeugte zeitabhängige Wärmeleistung in kW. Löschmaßnahmen sind darin nicht berücksichtigt.

Spezifische Brandleistung: Wärmefreisetzungsrate eines Produktions- oder Lagerstoffes in kW bezogen auf 1 m^2 Brandfläche.

VERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER ÄQUIVALENTEN NORMBRANDDAUER

Berechnung von $t_ä$-Werten für Industriebauten durch Brandsimulation

Die Brandsimulation umfasst im Wesentlichen vier Einzelschritte und die in diesem Zusammenhang erforderlichen Festlegungen zum Zeitpunkt des Brandbeginns:

- Festlegung von Temperaturen und Drücken im Gebäude und der Umgebung für die Zeit t = 0,
- Beschreibung der Geometrie der Bauteile und der Art der verwendeten Baustoffe,
- Angaben über die Öffnungen für die Luftzufuhr und Wärme- und Rauchableitung und die zeitliche Steuerung von Öffnungen,
- Festlegung des Brandszenariums auf der Basis vorhandener Brandbelastungen und Eigenschaften der brennbaren Stoffe.

Brandsimulationen haben somit zum Ziel, unter Beachtung der im Industriebau vorhandenen Brandlast, der Ventilation und der Wärmeübertragung an Bauteile und des zu erwartenden Brandes die gemäß MIndBauRL erforderlichen $t_ä$-Werte zur Bestimmung des erforderlichen Feuerwiderstandes von Bauteilen und der maximal zulässigen Flächen für Brandbekämpfungsabschnitte zu ermitteln. Dazu ist es erforderlich, die Temperatureinwirkungen auf die Bauteile nach dem Äquivalenzverfahren anhand einer genormten Methode zu ermitteln.

Ausgangsbasis dieser Berechnungen sind Temperatur-Zeit-Kurven in Industriegebäuden, welche zur Bestimmung von $t_{ä}$ erforderlich sind. Als Referenzkurven zur Ermittlung der äquivalenten Normbranddauer $t_{ä}$ dient die Temperatur-Zeit-Kurve in einer definierten Bauteiltiefe in dem Referenzbauteil, welches der Normbrandbeanspruchung (ETK) unterliegt. Die Referenzkurve wird mit einer Temperatur-Zeit-Kurve verglichen, welche sich bei einem simulierten Bemessungsbrand in einem Industriebau in der gleichen Bauteiltiefe des Referenzbauteils einstellt.

Berechnung der äquivalenten Normbranddauer im Referenzbauteil

Die äquivalente Normbranddauer $t_{ä}$ entspricht der Zeit in Minuten, bei der im Normbrand (Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1) in einem genormten Bauteil infolge der Brandraumtemperaturen (ETK) die gleiche Brandwirkung erreicht wird, wie sie bei einem Bemessungsbrand in dem untersuchten BA bzw. BBA eines Industriebaues in einem Bauteil auftritt. Die bei einem Brand an definierter Stelle im genormten Bauteil erreichte Maximaltemperatur zum Zeitpunkt t wird dem äquivalenten Temperaturzeitpunkt $t_{ä}$ zugeordnet, welcher sich aus einer Normbeanspruchung an einem gleichartigen Bauteil (Referenzbauteil) ergibt.

Für das festgelegte Referenzbauteil aus Beton wurde für die Vergleichsmessung eine Tiefe von 35 mm festgelegt. In diesem Abstand von der heißen Betonoberfläche wird die Bestimmung der zeitabhängigen Referenztemperatur $T_{RBT,ETK}$ in dem Referenzbauteil und die Bestimmung der äquivalenten Branddauer durchgeführt. In Bild 1 ist das dazugehörige Ablaufschema angegeben.

Als Referenzbauteil wurde ein Bauteil aus Beton gewählt, weil sich nach vorliegenden Untersuchungen für die in der Baupraxis verwendeten Tragwerksbauteile die äquivalenten Branddauern mit Bauteilen aus Baustoffen wie Beton am besten bestimmen lassen. In Bild 2 ist das Äquivalenzverfahren für das Referenzbauteil grafisch dargestellt.

Für die Temperatureinwirkung $T_{RBT,ETK}$ im Referenzbauteil beim Normbrand $T_{G,ETK}(t)$ wurden die Bauteiltemperaturen im Referenzbauteil in der definierten Tiefe von 35 mm berechnet. Mit den Eigenschaften und Übergangsbedingungen (siehe unten) erhält man den Temperaturverlauf $T_{RBT,ETK}(t)$ im Referenzbauteil. Der Temperaturverlauf $T_{RBT,ETK}(t)$ ist somit Grundlage für alle $t_{ä}$-Bestimmungen.

$T_{RBT,ETK}(t)$ ist danach

- mit den in DIN 18 230-4 angegebenen Werten anzusetzen,
- oder im Rahmen eines eigenen Berechnungsprogramms zu ermitteln, wobei die zulässigen Abweichungen von der Norm mit +/– 4 °C festgelegt sind.

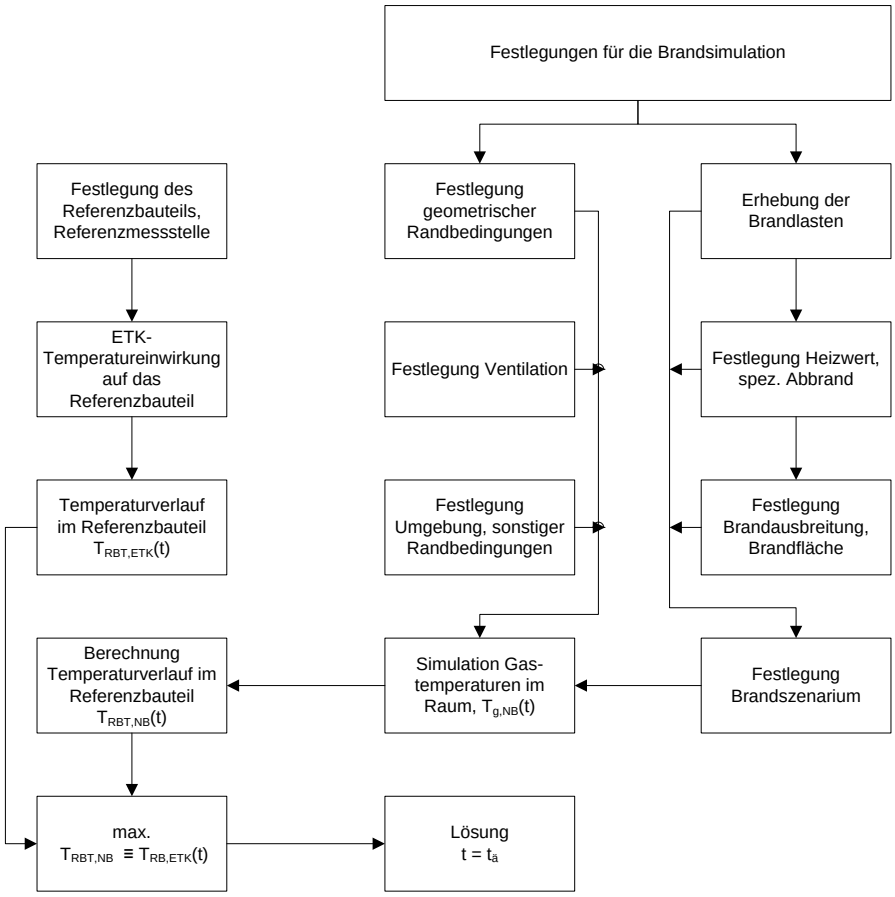


Bild 1 *Ablaufschema zur Bestimmung der äquivalenten Branddauer durch Brandsimulation*

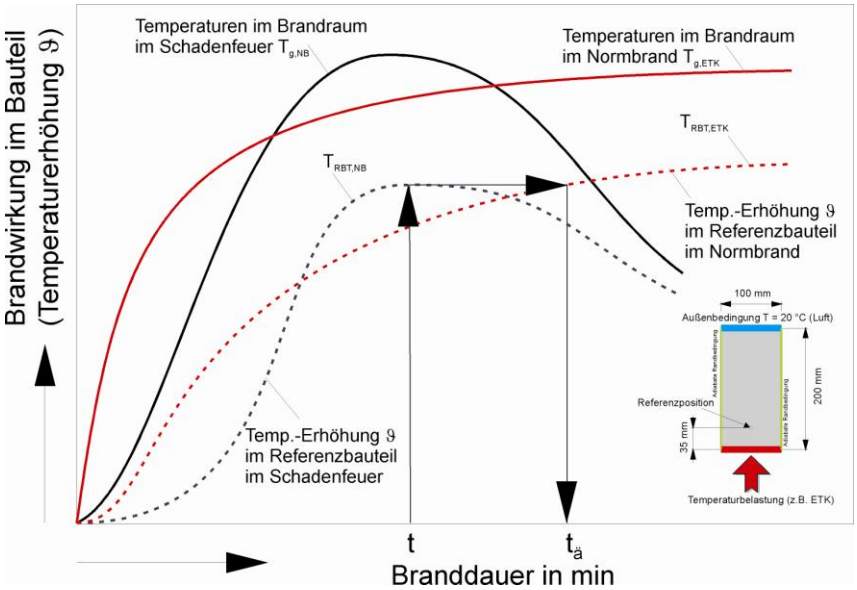


Bild 2 *Bestimmung der äquivalenten Branddauer $t_{ä}$ aus der Brandwirkung eines Brandes in einem Industriebau und des Normbrandes nach DIN EN 1363-1 am Referenzbauteil*

Gemäß den Ausführungen in der Norm müssen Rechenprogramme zur Berechnung von $t_{ä}$ mit den Normwerten verifiziert werden. Dazu sind die unten angegebenen Stoffwerte des Referenzbetons zu verwenden. Bei der Bestimmung der Heißgastemperaturen im Naturbrand durch Simulation sind die folgenden Einzelschritte einzuhalten:

Schritt 1: Festlegen des beurteilungsrelevanten Raums (Brandbekämpfungsabschnitt, Teilabschnitt, Ebene, usw.).

Schritt 2: Festlegen der für die Brandsimulation zu berücksichtigenden Einflussgrößen und Randbedingungen. Manuelle und automatische Maßnahmen zur Verbesserung des Wärmeabzuges dürfen unter Berücksichtigung des zeitlichen Ablaufes dieser Maßnahmen in der Simulation berücksichtigt werden.

Schritt 3: Berechnung der Heißgastemperaturen $T_{g,NB}(t)$ im betrachteten Raum durch Brandsimulation als zeitlich und räumlich gemittelten Temperaturverlauf in der Heißgasschicht – in der Regel die Heißgasschicht unter der Decke – für die Berechnung der Temperatureinwirkungen im Referenzbauteil.

Schritt 4: Auswertung der Simulationsergebnisse und Auswahl der maßgebenden „Messstellen“ (M) – in der Regel die Heißgasschicht unter der Decke.

Berechnet wird die eindimensionale Temperaturausbreitung in einer 200 mm dicken Betonplatte in horizontaler Anordnung bei unterseitigem Brandangriff. Der Beton ist vollständig hydratisiert, enthält nahezu thermisch inerte Gesteinskörnungen (Quarz) und hat eine Restfeuchte von 2 Gew. %. Für diesen Beton müssen für die Temperaturberechnungen im Referenzbauteil die in DIN 18230-4 angegebenen temperaturabhängigen Stoffkennwerte λ, ρ und c eingesetzt werden:

Für die Berechnung der eindimensionalen, zeitabhängigen Temperaturverteilung im Referenzbauteil unter Normalbrandbeanspruchung (ETK) gelten die nachstehenden Abmessungen und Randbedingungen für den Wärmeübergang:

- Bauteildicke 200 mm;
- Referenztemperatur in 35 mm Bauteiltiefe;
- Ausgangstemperaturen $T_0 = 20$ °C;
- Konvektion (heiße Seite) $\alpha_i = 25$ W/m^{2}K;
- Konvektion (kalte Seite) $\alpha_a = 5$ W/m^{2}K;
- Boltzmann Konstante $\sigma = 5{,}67 \cdot \times 10^{-8}$ W/m^{2}K^4;
- Einstrahlzahl $\varphi_{1,2} = 1$;
- Emissionszahl Beton $\varepsilon_b = 0{,}9$;
- Emissionszahl im Brandofen $\varepsilon_{f,g} = 0{,}7$.

Der Wärmeabzugsfaktor w wird aus der berechneten äquivalenten Branddauer $t_{ä}$ wie folgt berechnet:

$$w = \frac{t_{ä}}{Q \cdot c} \qquad \text{Gl. (1)}$$

Darin sind:

$t_{ä}$ äquivalente Normbranddauer

Q Brandbelastung im betrachteten Brandbereich A_B in kWh/m²

c Umrechnungsfaktor c nach DIN 18230-1 in min m²/kWh

Die Bestimmung von c erfolgt nach DIN 18230-1: 2010, Abschnitt 7.

Der Wärmeabzugsfaktor w wird aus der Simulation für verschiedene Brandbereiche A_B aus dem ermittelten $t_{ä}$-Wert berechnet, wenn dieses erforderlich ist. Die in DIN 18230-1 angegebenen Grenzen für w entfallen.

TEMPERATUR-ZEIT-VERLÄUFE FÜR BRÄNDE IN INDUSTRIEBAUTEN

Anforderungen an Brandsimulationsberechnungen

Die normativen Festlegungen für die Durchführung von Brandsimulationen zur Berechnung der repräsentativen Temperaturverläufe in Industriebauten werden im Folgenden dargestellt und die zugehörigen physikalischen Gleichungen angegeben. Die Vorgehensweise ist abgestimmt auf die allgemeinen Vorgaben der MIndBauRL, Anhang 1, und die darin im Einzelnen vorgeschlagenen physikalischen Parameter und Kennwerte.

In Industriebauten werden für die Bauteilbemessung nach DIN 18230-1 Brände zu Grunde gelegt, welche im Wesentlichen durch die Menge und Art der brennbaren Produktions- und Lagerstoffe, die Luftzufuhr, den Wärmeabzug und die Möglichkeit, sich zu entzünden, auszubreiten und zu einem Vollbrand zu entwickeln, bestimmt sind. Das genormte Bemessungsverfahren in DIN 18230-1 wurde abgeleitet aus Rechenergebnissen von Brandsimulationen mit MRFC für rechteckige Gebäudegeometrien und Gebäude mit gleich großen Abständen zwischen den Geschoßen und Ebenen. Industriebauten nach DIN 18230-1 dürfen zukünftig auch nach DIN 18230-4 berechnet werden. Die Nachweise durch Brandsimulation dürfen insbesondere in den nachstehend genannten Fällen angewendet werden:

- Industriebauten mit Geometrien, welche von den Grundannahmen, d. h. weitgehend rechteckige/quadratische Grundrisse, deutlich abweichen, z.B. Industriebauten mit eingeschossigen Bereichen und angrenzenden Bereichen mit mehreren Ebenen, die in offener Verbindung stehen,

- Industriebauten mit Produktions- und Lagerstoffen, welche nach ihrem Abbrandverhalten nicht den Bewertungen durch die Faktoren m oder ψ gemäß DIN 18230-1 und -3 entsprechen,
- Teilabschnitts- und Teilflächennachweise in großen Industriebauten (> 2400 m²), welche nicht durch die vereinfachten Nachweise in DIN 18230-1 abgedeckt sind,
- Ermittlung des Wärmeabzuges in Gebäuden mit mehreren Ebenen, welche nicht durch die Nachweise für Gebäude mit mehreren Ebenen nach DIN 18230-1 abgedeckt sind,
- Industriebauten mit Maßnahmen für einen optimalen Wärmeabzug,
- Industriebauten mit Tragkonstruktionen und Brandwänden, welche lokalen Bränden oder direkten Flammenbeanspruchungen unterliegen.

Die bei einem Bemessungsbrand für die Ermittlung von $t_ä$ maßgebenden Temperaturen werden durch die berechneten räumlichen, mittleren Brandgastemperaturen in Bauteillängs- und -querrichtung entweder im Abstand von 10 cm bis 50 cm von der betroffenen Bauteiloberfläche (in der Regel der Decke) oder als Mittelwert von mindestens 10 relevanten Messpunkten anhand der direkt an die Bauteiloberfläche anschließenden Raumgitter mit Gitterweiten von 20 cm bis 50 cm dargestellt.

Bei Zonenmodellen gelten die unter den Decken oder Ebenen zeitabhängig berechneten Brandgastemperaturen als maßgebend für die Berechnung von $t_ä$. Bei CFD-Modellen sind in den betroffenen Brandbereichen in der Regel mehrere „Messbäume“ unterhalb der Decke diagonal anzuordnen, um eine mittlere Heißgastemperatur im Abstand von ca. 20 cm bis 50 cm zu ermitteln.

Bei der Brandsimulation sind nachstehend angegebene Kennwerte für den Wärmeübergang auf die angrenzenden Bauteile zu verwenden:

- Konvektion (heiße Seite): $\alpha_i = 25$ W/m²K
- Konvektion (kalte Seite): $\alpha_a = 5$ W/m²K
- Emissionszahl Brandrauch: $\varepsilon_{f,g} = 0{,}7$
- Emissionszahl Flamme: $\varepsilon_{fl} = 1{,}0$
- Emissionszahl Baustoffe: $\varepsilon = 0{,}9$
- Einstrahlzahl: $\varphi = 1{,}0$

Abweichende Kennwerte für die konvektiven und radiativen Wärmeübergänge bei der Brandsimulation sind zulässig, wenn genauere Nachweise durchgeführt und diese in der Dokumentation gesondert dargestellt werden.

Brandsimulationsmodelle müssen die Strahlung von Brandgasen und Flammen berücksichtigen, weil der Strahlungsanteil bei Bränden bis zu 50 % der gesam-

ten Brandleistung betragen kann (Regelfall 30 %) und somit maßgebend die Brandraumtemperaturen beeinflusst.

Brandsimulation mit Zonenmodellen – Geometriemodellierung

Die Modellierung von Industriebauten kann bei ungleichmäßig verteilten Brandbelastungen und/oder Wärmeabzügen sowie bei großen BA oder BBA auf der Basis definierter Teilflächen erfolgen, welche bei der Simulation durch vorgegebene Brandbereiche (geometrisch ausgebildete oder virtuell festgelegte Raumbereiche) dargestellt werden. Dabei umfasst die Summe aller Brandbereiche den gesamten Brandabschnitt oder Brandbekämpfungsabschnitt hinsichtlich der Grundflächen, Decken- und Ebenenabstände sowie die geometrischen Maße aller Öffnungen nach DIN 18230-1: 2010, Abschnitt 8.2. Folgende Bereiche können für eine Bemessung relevant werden:

- Für Brandbereiche mit Brandbelastungen welche, auf Teilflächen $100\ m^2 < A_T \leq 400\ m^2$ angeordnet sind und das 1,6 Fache der mittleren Brandbelastung überschreiten müssen die lokalen $t_ä$-Werte berechnet werden, sofern die betroffenen Bauteile als BA- oder BBA-Wände und Decken auszubilden sind. Eine Brandübertragung auf angrenzende Flächen braucht nicht berücksichtigt zu werden.
- In Brandabschnitten und Brandbekämpfungsabschnitten mit Brandbelastungen auf Teilflächen $A_T > 400\ m^2$, welche das 1,6 Fache der mittleren Brandbelastung überschreiten, sind die BA oder BBA in einzelne Brandbereiche A_T zu unterteilen, die der geometrischen Verteilung der Brandbelastungen entsprechen. Für diese Brandbereiche wird durch Brandsimulation der lokale $t_ä$-Wert berechnet.
- Der zu untersuchende Industriebau wird als eigener Brandbereich A_B ausgebildet und dient der Ermittlung der äquivalenten Branddauer für diesen Bereich oder für den ganzen BA bzw. BBA, wenn es nur einen Bereich gibt.
- Die Grundflächen einzelner Brandbereiche in Industriegebäuden sollen analog zur DIN 18230-1 eine Maximalfläche von 2 500 m² nicht überschreiten. Dieser Wert gilt als Bemessungswert für den Industriebau.
- Bei Industriebauten mit Flächen $A_{BA} < 5\,000\ m^2$ bzw. $A_{BBA} \geq 5\,000\ m^2$ sollten jeweils zwei oder mehr Bereiche nach den folgenden Gleichungen:

  $$A_B = \frac{A_{BA}}{n} \quad \text{mit } A_B < 5\,000\ m^2 \text{ und } n \geq 2 \qquad \text{Gl. (2)}$$

  oder

  $$A_B = \frac{A_{BBA}}{n} \quad \text{mit } A_B \geq 5\,000\ m^2 \text{ und } n > 2 \qquad \text{Gl. (3)}$$

  mittels Brandsimulation untersucht werden, wobei die geometrischen Gegebenheiten und vorliegenden Nutzungsbereiche im Brandbekämpfungsabschnitt zu berücksichtigen sind. Der jeweils größte $t_ä$-Wert ist maßgebend für die brandschutztechnische Bemessung der Bauteile.

Die Grundflächen der einzelnen Brandbereiche A_B sollten bei ungleichmäßig verteilter Brandbelastung etwa die gleichen Abmessungen haben, wenn sie aufgrund virtueller Unterteilungen und nicht nach den geometrischen Gegebenheiten gebildet werden. Bei unterschiedlichen Nutzungen, Wärmeabzügen und Brandbelastungen sind bei Industriebauten die jeweils unterschiedlichen Bereiche als Brandbereiche A_B abzubilden und die zugehörigen $t_ä$-Werte zu berechnen. Die größten berechneten $t_ä$-Werte sind maßgebend für die brandschutztechnische Bemessung aller Bauteile in den untersuchten Bereichen.

Brandsimulationen mit CFD-Modellen – Geometriemodellierung

Die Modellierung erfolgt auf der Basis einer räumlichen Diskretisierung, welche in kartesische Koordinaten oder als freie Volumengeometrien abgebildet werden und in ihrer Gesamtheit das Gebäude im Maßstab 1:1 abbilden. Bei der Verwendung kartesischer Volumengeometrien dürfen die Schrägen von Wänden oder Decken in Stufen durch Anpassung mit entsprechend kleinen Zellgrößen angenähert werden. Ebenso ist es zulässig, volumen- und höhengleiche Nachbildungen der Geometrien zu verwenden. Die Gitterabstände im Bereich von Öffnungen sind so festzulegen, dass die zu erwartenden Strömungen (Strömungsverluste) richtig abgebildet werden.

Randbedingungen für die Ventilation

Die Ventilation ist entsprechend der nutzungsspezifischen, anlagentechnischen und geometrischen Bedingungen zu modellieren. Alle Öffnungen welche der Zuführung von Luft oder Abfuhr von Wärme und Rauch dienen dürfen berücksichtigt werden.

Die Ventilation ist in der Simulation entsprechend den tatsächlich vorhandenen Zeiten für den Öffnungsbeginn, -ablauf und das Öffnungsende zu berücksichtigen. Bei einer Auslösung über eine flächendeckende Brandmeldeanlage darf der Beginn der Wirkung auf 1 min festgelegt werden. Für das manuelle Öffnen der Ventilation durch eine Werkfeuerwehr darf der Beginn des Öffnungsvorganges auf ≥ 5 min festgelegt werden. Die Dauer der Öffnungsvorgänge darf mit 1 min (automatisches Öffnen) und 15 min (Werkfeuerwehr) ohne gesonderten Nachweis angesetzt werden.

Die Berechnungen sind mit folgenden Umgebungsbedingungen durchzuführen:

- Temperatur: 20 °C
- Druck: $1{,}0133 \cdot 10^5$ Pa

Eine maßstäbliche Verkleinerung und Modellierung der Geometrie sowie weiterer brandschutztechnischer Eingangsgrößen ist im Simulationsmodell nicht zulässig.

Bei der Brandsimulation mit Zonen-Modellen sind alle Öffnungen anrechenbar, welche mit der Simulationsumgebung verbunden sind. Bei der Simulation sind vertikale und horizontale Öffnungen, soweit gesonderte Nachweise nicht vorliegen, mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,7 zu bewerten. Sehr große Öffnungen (> 4 m²) und solche mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten ≤ 1 m/s dürfen mit 0,95, Öffnungslamellen und schräggestellte Fensterklappen oder Luken dürfen mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,5 bewertet werden.

Horizontale Öffnungen in Decken von Gebäuden mit mehreren Ebenen sind zulässig und entsprechend ihrer geometrischen Anordnung zu berücksichtigen. Sie sind bis 4 m² Querschnitt mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,7 zu bewerten. Für Öffnungen > 4 m² und einem Seitenverhältnis > 1:2 und solchen mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit ≤ 1 m/s darf mit einem Kontraktionsbeiwert von 0,95 gerechnet werden.

Bei der Simulation der Durchströmung der Öffnungen in Außenbauteilen ist bei der Brandsimulation mit CFD-Modellen die Umgebung zu berücksichtigen, d. h. die Diskretisierung des Raumes an und um die Öffnungen hat so zu erfolgen, dass die maßgebenden physikalischen Phänomene an der Öffnung realitätsnahe wiedergegeben werden. Der Abstand der außen liegenden Gitter von Wänden oder Dächern muss bei vertikalen Öffnungen mindestens den 1,5-fachen Wert der Öffnungsbreite und bei horizontalen Öffnungen mindestens den 2,5-fachen Wert der kleinsten Abmessung der Öffnung betragen.

Das Gitterraster in Öffnungen und davor/dahinter soll den Wert von 6 Gitterabständen in der kleinsten Öffnungslänge bzw. einen Wert von 20 cm nicht überschreiten, um die Kontraktion der Strömungen in der Simulation abbilden zu können. Können die vorgenannten Bedingungen nicht eingehalten werden, ist davon auszugehen, dass die modellierten Öffnungsgrößen aerodynamisch wirksam sind und die erforderlichen geometrischen Öffnungen mittels der vorgenannten oder produktspezifischen c_V-Werte anzusetzen sind.

Die Berechnung des Schmelzens von Materialien, welche als Wärmeabzüge vorgesehen sind, ist zulässig. Die entstehende Wärmeabzugsfläche darf mit maximal 50 % der Ausgangsfläche berücksichtigt werden, soweit bezüglich der aerodynamischen Wirksamkeit der Öffnung beim Schmelzen kein gesonderter Nachweis geführt wird.

Bedingungen für Brandszenarien bei der Brandsimulation in Industriebauten

Unbeschadet der Art der verwendeten Rechenmodelle zur Berechnung der Temperatur-Zeit-Kurve bei der Simulation von Bränden in Industriegebäuden sind die folgenden Anforderungen einzuhalten. Zur Festlegung des Brandszenariums sind die gesamte Brandlast (Q_{ges}) im BA bzw. BBA, der Brandentstehungsort, der Brandablauf, die maximale Brandfläche und die brandspezifischen Kennwerte (z. B. Heizwert, spezifische Abbrandrate, Verbrennungseffektivität, Verbrennungsgleichung) für jeden Einzelfall zu ermitteln und festzulegen.

Ohne weitere Nachweise kann in einer vereinfachten Form der Nachweisführung das Brandszenarium nach DIN 18 230-1 verwendet werden. Hierzu wird die rechnerische Brandbelastung nach dem Verfahren der DIN 18 230-1 *mit Berücksichtigung des Abbrandfaktors m* ermittelt. Die für die Ermittlung der im Näherungsverfahren der DIN 18 230-1 angegebenen w-Faktoren durchgeführten Berechnungen gehen davon aus, dass eine Bemessungsbrandlast von 144 kWh/m^2 gleichmäßig über den gesamten Brandbekämpfungsabschnitt von 2.400 m^2 verteilt ist. Diese Annahme kann durch die genauere Brandsimulationsrechnung auf die tatsächlich vorhandene Geometrie, Ventilation, Bauteilbeschaffenheit und Brandbelastung angepasst und damit deutlich gegenüber den Annahmen der DIN 18 230-1 verbessert werden. Mit den tatsächlichen Randbedingungen werden dann die Berechnungen mit den weiteren Vorgaben des Brandszenariums in DIN 18 230-1 durchgeführt.

Ausgehend von einem Brandherd in der Mitte des Brandbekämpfungsabschnittes breitet sich der Brand in der Phase der Brandentwicklung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 1 m/min nach vier Seiten aus, bis die Hallenwände erreicht werden. Auf der so entstandenen Brandfläche verbrennt das Brandgut unter Berücksichtigung des m-Faktors (Mischbrandlast aus Holz und verschiedenen Kunststoffen) mit einem Heizwert von 3,74 kWh/kg bei einer definierten Abbrandgeschwindigkeit von 20 kg/m^2h, bis die gesamte Brandlast verbraucht ist. Für die Bemessungskonfiguration zur Ermittlung der w-Faktoren in DIN 18 230-1 (Hallenfläche 2.400 m²) tritt dabei nach etwa 30 min eine Vollbrandsituation ein, bei der das Brandgut über die gesamte Grundfläche des Bemessungs-Brandbekämpfungsabschnittes brennt. Bei anderen Verhältnissen von Brandbelastung und Hallengröße ist dies in der Regel nicht der Fall. Durch die Berücksichtigung der tatsächlichen Gegebenheiten wird eine deutliche Verbesserung der Rechenergebnisse erreicht.

Für einen genaueren Nachweis im Rahmen von DIN 18 230-4 sind ungeschützte Brandlasten nach DIN 18230-1, jedoch *ohne Berücksichtigung des m-Faktors* im Einzelfall zu ermitteln und festzulegen. Geschützte Brandlasten sind in der Simulation nicht zu berücksichtigen, sofern sie beim Abbrand der ungeschützten Brandlasten durch Strahlung und Konvektionswärme nachweislich nicht entzündet werden können. Diesbezüglich sind im Einzelfall gesonderte Nachweise erforderlich.

Brandlasten sind über die Flächen A_{BA} und A_{BBA} einschließlich der Verkehrswege zu verteilen, um die mittlere Brandbelastung zu berechnen und zu simulieren. Bei ungleichmäßig verteilten Brandlasten sind diese jeweils nur auf den zugehörigen Brandlastbereichen A_B, Teilabschnitten A_A und lokalen Teilflächen (100 m² ≤ A_T ≤ 400 m²) zu verteilen und der Brandsimulation zu Grunde zu legen. Bei der Unterteilung der Flächen A_{BA} und A_{BBA} in Brandbereiche nach DIN 18230-1, welche durch Verkehrswege (z. B. Breite 3 m) oder bauliche Maßnahmen gebildet werden, sind ungleichmäßig verteilte Brandlasten auf diese Brandbereiche A_B zu beziehen und bei der Festlegung des Brandszenariums zu verwenden.

Die Brandbelastungen sind als 90 %-Fraktile der vorliegenden Nutzung für jeden Einzelfall zu ermitteln und bei der Simulation zu verwenden. Das bedeutet auch, dass über den Nutzungszeitraum die Brandbelastungen nur im Rahmen von 10 % der Nutzungsdauer den Wert überschreiten dürfen.

Der Ort der Brandentstehung ist in den Mittelpunkt des betrachteten Brandbereiches zu legen, sofern nicht entsprechend den örtlichen Gegebenheiten eine Brandentstehung an den Rändern der Brandbereiche wahrscheinliche ist. Die mit Brandlasten belegten Brandflächen A_B sind bei der Simulation jeweils einzeln oder in der Summe (z. B. BA, BBA) als Bemessungsbrandfläche zu definieren. Die Brandausbreitung wird durch die Vorgabe der Brandausbreitungsgeschwindigkeit oder durch Anwendung physikalischer Brandausbreitungsmodelle bestimmt. Die in den Ausbreitungsmodellen zugrunde gelegten physikalischen Kennwerte der verwendeten brennbaren Stoffe sind in der Dokumentation gesondert anzugeben und zu begründen. Die Brandausbreitung soll zweidimensional erfolgen, wobei als Regelfall für die horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit 1 m/min anzunehmen ist.

Für die Brandausbreitung von Produktions- und Lagerstoffen, welche bei hinreichender Luftzufuhr nachweislich unter der Brandausbreitung von 1 m/min liegen, dürfen bei der Brandsimulation bis zum Zeitpunkt t_V bzw. bis eine Fläche von 75 m² erreicht ist geringere Ausbreitungsgeschwindigkeiten angesetzt werden. Danach ist eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1 m/min zu Grunde zu legen, wenn kein genauerer Nachweis über die Brandausbreitung erfolgt (z. B. Literaturkennwerte, Versuchsergebnisse).

Vertikale Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind bei größeren Lagerhöhen größer als die horizontale Ausbreitung und im Regelfall mit einem Faktor 2,5 bezogen auf die horizontale Ausbreitung ab einer Lagerhöhe von 4,5 m anzunehmen.

Die in der Brandsimulation anzunehmenden Heizwerte und Verbrennungseffektivitäten für die verschiedenen brennbaren Stoffe sind der DIN 18230-3 sowie einschlägigen Standardwerken [1], [2], [3], [4], [5], [8], [9] zu entnehmen. Soweit der Feuchtigkeitsgehalt der Produktions- und Lagerstoffe bekannt sind, dürfen die unteren Heizwerte gemäß DIN 18230-3 abgemindert werden. Wenn entsprechende Brennwerte vorliegen, können diese auf den unteren Heizwert umgerechnet werden. Die anzusetzende Brandleistung ergibt sich aus dem Produkt von Brandfläche und Heizwert.

Vergleichbar mit DIN 18 230-1 muß nicht die gesamte Brandlast berücksichtigt werden. Die ohne Berücksichtigung des m-Faktors ermittelte Brandlast darf unter Berücksichtigung der Verbrennungseffektivität der vorhandenen Stoffe reduziert werden. Die Verbrennungseffektivität ζ ist gemäß DIN 18230-4 nach Tabelle 1 nur grob festgelegt. Für genauere Nachweise können versuchstechnisch nachgewiesene Werte verwendet werden; Beispiele für Reinstoffe siehe Tabelle 2. Stoffgemische sind in der Regel nach der Menge der gefährlichsten Stoffe im Gemisch anzusetzen.

Tabelle 1 Verbrennungseffektivität von Produktions-, Bau- und Lagerstoffen nach DIN 18230-4

Phase	Mittlere Verbrennungseffektivität ζ
Gasförmig	1,0
Flüssig	0,9
Fest	0,8

Tabelle 2 Verbrennungseffektivität von festen, brennbaren Stoffen und Vorschläge für gemittelte Werte von Stoffgruppen[*)]*

Phase	Brennstoff	Heizwert MJ/kg	Rußanteil g/g	Verbrennungseffektivität	
				Literatur-Werte	Mittlere Werte
f	PVC	16,40	0,1720	0,35	0,42
f	Epoxy	28,80	0,0980	0,43	
f	Silikone	21,70	0,0650	0,49	
f	Diuron	20,30	0,1590	0,50	
f	Silikongummi	21,70	0,0780	0,50	
f	Polyesteretherketon	31,30	0,0080	0,56	0,62
f	Polycarbonate	31,60	0,1120	0,58	
f	Polyester 2	32,50	0,0890	0,60	
f	Polyester 1	32,50	0,0910	0,63	
f	PU gm35	28,00	0,1040	0,63	
f	PU gm31	25,00	0,1250	0,63	
f	PU gm39	26,00	0,1300	0,63	
f	PU gm37	28,00	0,1130	0,64	

*) Weitere Angaben über feste, flüssige und gasförmige Stoffe sind in [15] zu finden.

Die Verbrennungseffektivität wird bei der Brandsimulation durch Multiplikation mit der gesamten Brandlast sowie durch Multiplikation mit dem Heizwert bei der Berechnung der spezifischen Abbrandraten und Brandleistungen berücksichtigt:

Als Brandregime werden brandlastgesteuerte und ventilationsgesteuerte Brände unterschieden. In den Simulationen dürfen brandlastgesteuerte und ventilationsgesteuerte Brände berücksichtigt werden. D. h. unbeschadet der Höhe der tatsächlichen stoffabhängigen maximalen spezifischen Brandleistungen bzw. der spezifischen Abbrandraten der vorhandenen Stoffe oder des Verlaufes der bei der Simulation vorgegebenen Brandleistungskurven müssen die spezifischen Brandleistungen bzw. Abbrandraten so berechnet werden, dass sich physikalisch mögliche Brandabläufe im Brandbereich ergeben.

Verbrennungsrechnungen sind unter Berücksichtigung eines definierten Brennstoffes oder Gemisches und der vorhandenen Luftmengen erforderlich. Bei der Simulation dürfen die folgenden Arten von Brandszenarien verwendet werden:

- Vorgabe einer zeitabhängigen Brandleistungsfunktion oder Abbrandraten (Brandleistungskurven, Designfire), unter Berücksichtigung eines definierten Brennstoffes.
- Ausbreitungsmodelle unter Berücksichtigung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit, des Heizwertes, der Verbrennungseffektivität, der spezifischen Brandleistung und unter Berücksichtigung eines definierten Brennstoffes.
- Freie Berechnung der Abbrandraten mittels validierter Submodelle aus der Verbrennungslehre anhand der vorhandenen Stoffe und einer vollständigen chemischen und reaktionskinetischen Beschreibung des Verbrennungsmodells.

Nicht zulässig ist die Verwendung von:

- Volumenquellen, die in einem bestimmten Volumenbereich pro Zeiteinheit so viel Energie freisetzen, dass die durch den Bemessungsbrand vorgegebene (konvektive) Brandleistung $\dot{Q}_c(t)$ (gesamte Wärmefreisetzung $\dot{Q}(t)$ abzüglich Strahlungsanteil) exakt erreicht wird.
- Thermikstrahlen: Im Bereich der Brandquelle wird ein heißes Gas mit einem bestimmten Volumen- bzw. Massenstrom zugeführt.

Anmerkung: Mit Volumenquellen und Thermikstrahlen lassen sich zwar im Prinzip einem Brand ähnliche Temperaturprofile im Brandbereich erzeugen. Um die thermischen und geometrischen Strahlparameter in Abhängigkeit von der gewünschten Wärmefreisetzungsrate $\dot{Q}(t)$ bzw. $\dot{Q}_c(t)$ festzulegen, ist jedoch die Anwendung eines empirischen Modells (Plumemodell) oder eine komplette Verbrennungsberechnung mit einem CFD-Modell erforderlich.

Neben den Standardnachweisen sind in DIN 18 230-4 auch Brandszenarien sowie Berechnungsvorgaben für die Beantwortung von Sonderfragen bzw. zur Durchführung von besondern Nachweisen in Industriebauten enthalten. Diese betreffen:

- Brandszenarien für Teilflächenbereiche in Brandbekämpfungsabschnitten bei ungleichmäßig verteilter Brandbelastung (siehe Bild 3) oder für lokale Temperaturbeanspruchung von Wänden zur Trennung von Brandbekämpfungsabschnitten (Bild 4)
- Berechnung des Feuerüberschlages für den Nachweis von Teilabschnitten(Bild 5**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)
- Brandszenarium für die Feuerausbreitung zwischen zwei übereinander liegenden Ebenen(Bild 6)

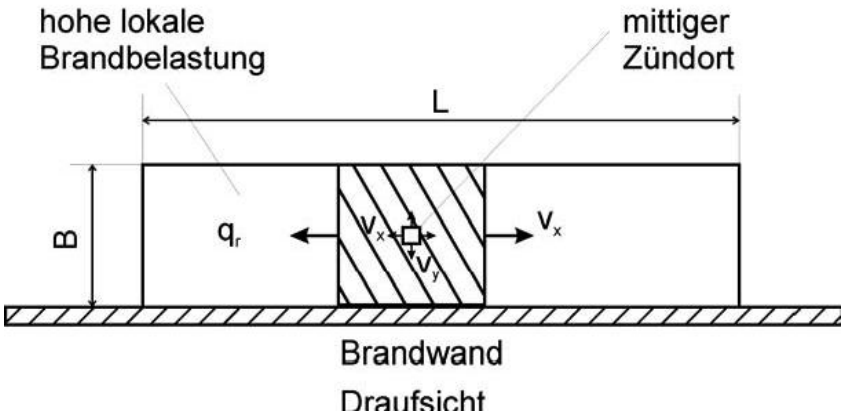


Bild 3 Lokales Brandszenarium für einen Brandbekämpfungsabschnitt

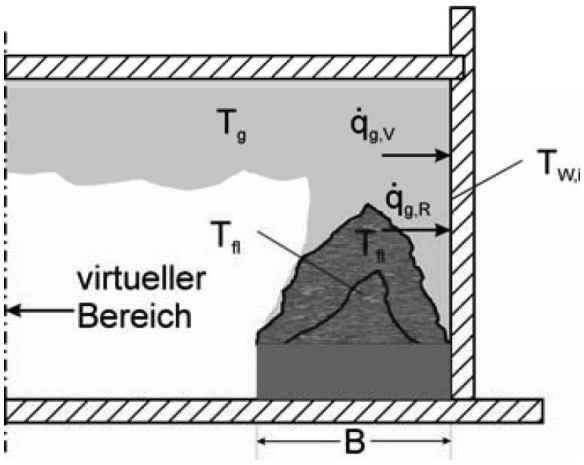


Bild 4 Brandszenarium für lokale Brandbeanspruchung von Wänden (Ansicht)

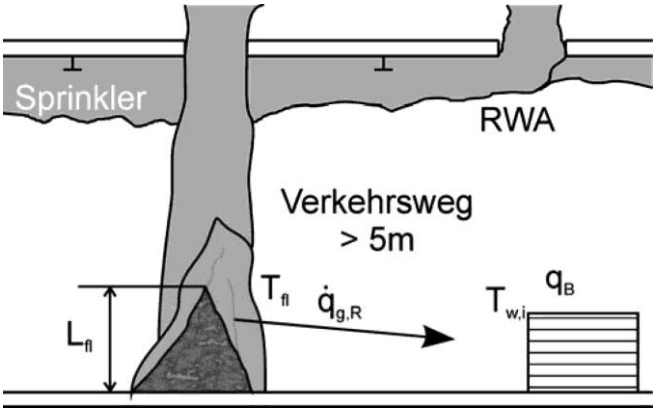


Bild 5 *Brandszenarium bei lokaler Brandbeanspruchung für die Abstandsberechnung zu brennbaren Objekten*

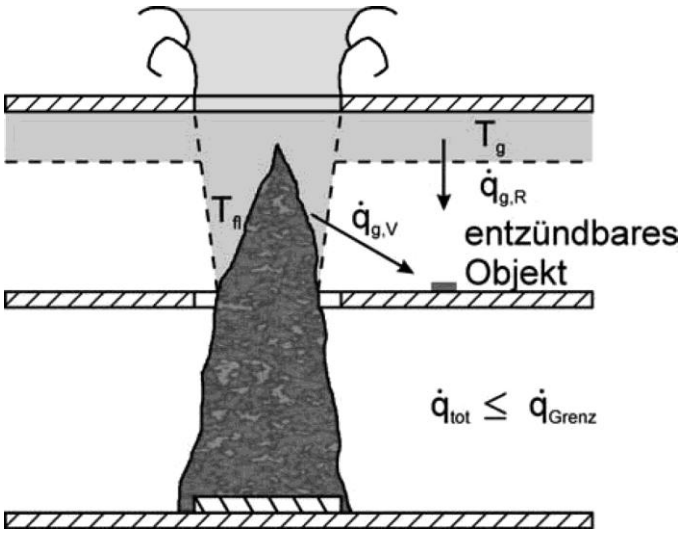


Bild 6 *Brandszenarium für lokale Brandbeanspruchung bei Brandübertritt zwischen Ebenen mit der Öffnung $A_Ö$*

Unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der durchzuführenden Brandsimulationsrechnungen enthält die DIN 18 230-4 im aktuellen Diskussionsstand noch ein Sicherheitskonzept, das nach den Grundsätzen des Sicherheitskonzepts für den Teil 1 unter Berücksichtigung der besonderen Bedingungen für den Teil 4 entwickelt wurde.

DOKUMENTATION UND PRÜFUNG VON ERGEBNISSEN AUS BRANDSIMULATIONEN

Im Hinblick auf die bauaufsichtliche Akzeptanz von Brandschutznachweisen, welche sich auf die Anwendung von Ingenieurmethoden abstützen, werden in der Norm besondere Vorgehensweisen vorgeschlagen. Die wesentlichen Elemente der Dokumentation von Ergebnissen aus Brandsimulationen müssen danach die folgenden Hauptpunkte umfassen:

- Vollständige Angaben über das Gebäude,
- Angaben über das/die verwendete(n) Rechenmodell(e),
- Angaben zur Brandsimulation (Bauteile, Ventilation, Brandszenarien),
- Ergebnisse äquivalente Branddauer ($t_ä$), evtl. für mehrere variierte Parameter.

Eine detaillierte Unterteilung der obigen Punkte ist im Folgenden angegeben:

1. Allgemeine bauliche Angaben

1.1 Bauwerks- und Nutzungsbeschreibung

1.2 Brandlastaufstellung, thermodynamische Stoffdaten, Unsicherheiten

1.3 Dokumentation Nachweisbereiche: BA, BBA, $t_ä$, erf t_f

2. Angaben zu dem verwendeten Rechenmodell

2.1 Rechenmodell für die Brandsimulation

2.2 Rechenmodell für die Bauteilberechnung

3. Angaben zur Brandsimulation zur Ermittlung von „$t_ä$“

3.1 Geometrische Modellierung für CFD- oder Zonen-Modelle

3.2 Umfassungsbauteile

3.3 Ventilation (Art und Lage der Öffnungen und die Öffnungsbedingungen)

3.4 Beschreibung der gewählten Brandszenarien mit Begründung

3.5 Simulationsmodelle und Anwendungsbereiche

3.6 Ergebnisse aus der Brandsimulation

4. Angaben zur äquivalenten Branddauer $t_ä$

4.1 Ergebnisse Bauteilsimulation

4.2 Maximale Temperatur im Referenzbauteil unter Naturbrand

4.3 $t_ä$-Wert nach dieser Norm

4.4 Soweit erforderlich: w-Faktor nach dieser Norm

Die Dokumentation zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs durch Brandsimulation muß vollständig, nachvollziehbar und überprüfbar zu sein.

INFORMATIVE ANHÄNGE ZUR DIN 18230-4

Der Anhang A behandelt die Berechnung eines Vollbrandszenariums in einer 1.600 m² großen, eingeschossigen Industriehalle mit dem Mehrraum-Zonenmodell MRFC und dem CFD-Modell FDS.

Gegenstand der Untersuchungen ist eine kleine Halle mit einer Grundrissfläche von 1600 m² und einer lichten Höhe von 6 m (Bild 7). Die lichten Innenmaße der Halle betragen 40 m x 40 m x 6 m.

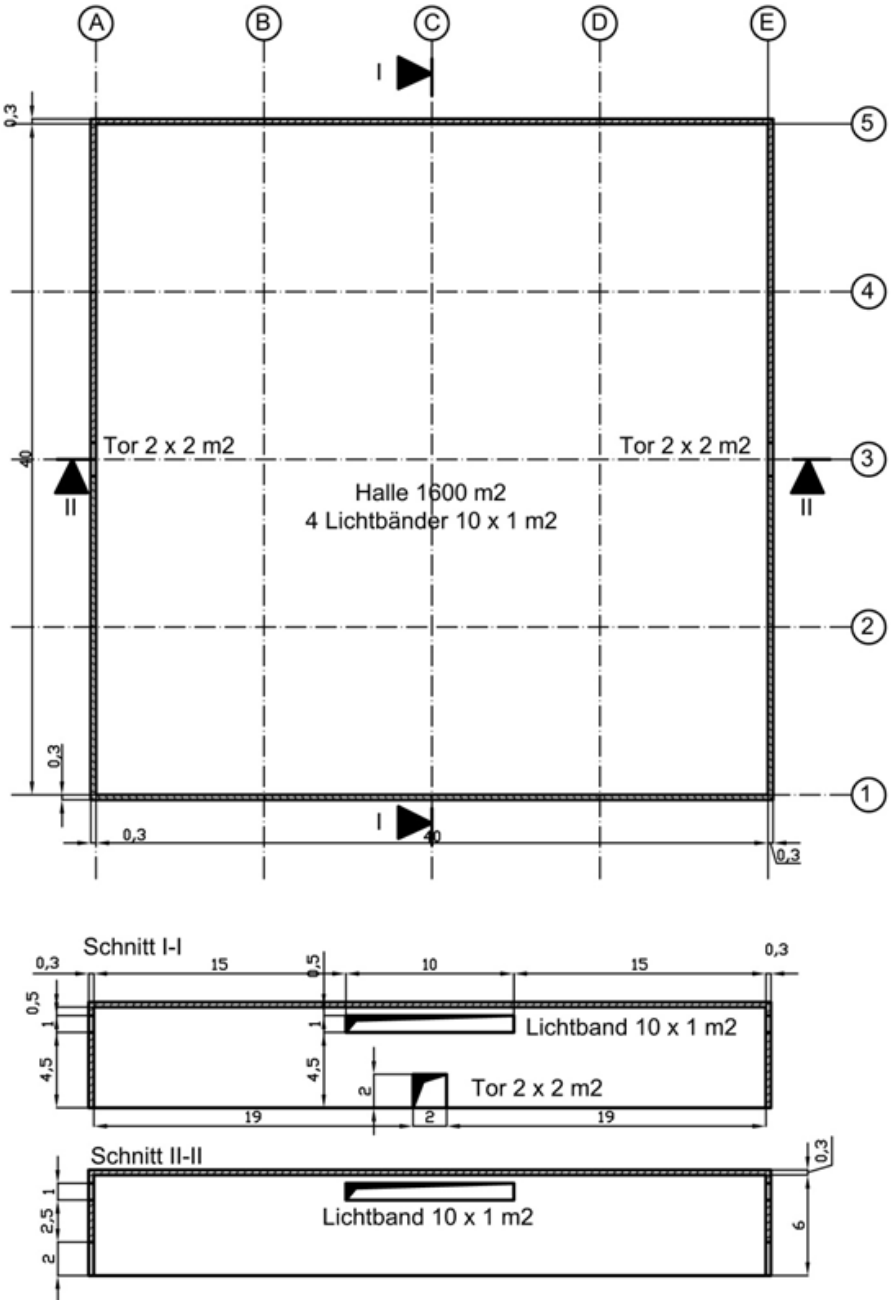


Bild 7 Schematische Darstellung der Untersuchungsgeometrie für Beispiel 1

Als Ventilationsflächen stehen Fensterbänder/Lichtbänder im Ausmaß von 40 m² (siehe Bild 7) und Tore im Ausmaß von 8 m² zur Verfügung. Es werden keine horizontalen Öffnungen angesetzt.

Die Tore sind mittig auf zwei Seitenwänden verteilt und weisen die Abmessungen von 2 x 2 m² auf (Summe: 2 Tore). Die Lichtbänder werden in allen 4 Seitenwänden jeweils mittig zur Wand angenommen. Die Dimension eines einzelnen Lichtbandes beträgt 10 x 1 m². Die Unterkante der Lichtbänder liegt in einer Höhe von 4,5 m über dem Fußboden. Die Sturzhöhe von der Oberkante des Lichtbandes bis zur Unterkante der Decke beträgt 0,5 m (siehe Bild 7).

Nach Abschnitt 5 der DIN 18230-4 wird ein Vollbrand in der Halle unterstellt. Ausgehend von der Hallenmitte breitet sich der Brand in alle vier Richtungen mit 1 m/min bis zum Erreichen der Hallenbegrenzung gleichmäßig aus. Die Fläche des Brandherdes soll mit < 100 cm² angesetzt werden.

Die Brandlastmenge wird mit 10 kg Brennstoff pro Flächeneinheit festgelegt. Für den vorgegebenen Stoff entspricht dies einer Brandbelastung von 48 kWh/m^2 (172,8 MJ/m^2). Zur Untersuchung gelangt eine Pyrolyseraten von 30 kg/m^2h. Dies entspricht einer maximalen spezifischen Brandleistung von 144 kW/m^2 bei einer Verbrennungseffektivität von ζ = 1,0. Mit diesem Brandszenarium tritt ca. 20 min nach Brandbeginn das Vollbrandszenarium auf.

Der Anhang B behandelt die Berechnung verschiedener Brandszenarien in einer 10 000 m² großen Industriehalle von 10 m Höhe. Die lichten Innenmaße der Halle betragen 50 m x 200 m x 10 m. Als Ventilationsflächen stehen Tore und horizontale Wärmeabzüge zur Verfügung. Es sind 10 Tore im Ausmaß von 240 m^2 vorhanden. Als Wärmeabzug dienen horizontale Öffnungen im Dach im Ausmaß von 2 % der Brandfläche, welche über der Brandfläche gleichmäßig verteilt angeordnet sind. Die Tore sind auf den beiden längeren Seitenwänden gleichmäßig über die Länge verteilt und nach Bild 8 angeordnet; sie weisen die Abmessungen von 6 x 4 m^2 auf.

Aufgrund der Teilflächenbetrachtung werden für die Simulation nur die Wärmeabzüge für die entsprechenden Teilflächen berücksichtigt. Die Wärmeabzüge werden durch 2 m^2 große horizontale Öffnungen, die gleichmäßig über der Teilfläche verteilt werden, gebildet.

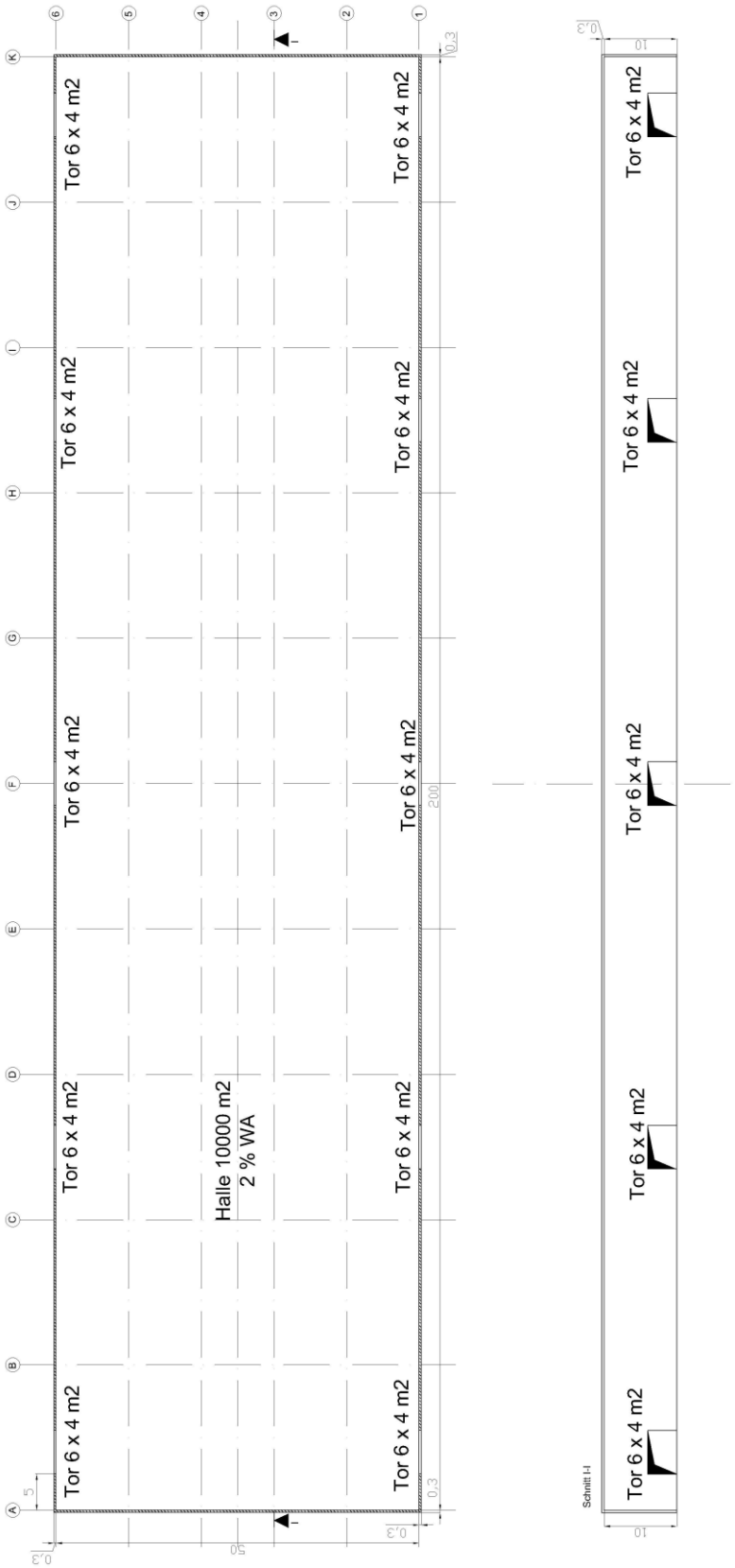


Bild 8 Schematische Darstellung der Untersuchungsgeometrie für Referenzbeispiel 2

Im Anhang D sind Angaben über die Verbrennungseffektivität von Produktions-, Bau- und Lagerstoffen nach Literaturangaben zusammengestellt.

Der Anhang E enthält Erläuterungen zu einzelnen Abschnitten in der Norm.

Der Anhang F behandelt die Grundlagen und Erläuterungen zum Sicherheitskonzept.

DERZEITIGE AKTIVITÄTEN

Für die Arbeiten bei der Konkretisierung einzelner Vorgaben bzw. Festlegungen in DIN 18 230-4 wurden zwei Arbeitsgruppen gegründet. Eine Arbeitsgruppe überarbeitet den aktuellen Diskussionsstand der Normbearbeitung mit dem Ziel der Erstellung eines Normentwurfs (Gelbdruck), der dann im Ausschuss beraten werden soll. Die Arbeiten sind im Wesentlichen redaktioneller Art und sollen den aktuellen Stand straffen und Querbeziehungen innerhalb der Norm verbessern. Der erste Entwurf soll bei der nächsten Sitzung im September beraten werden.

Eine zweite Arbeitsgruppe „Abarbeitung der Referenzbeispiele – Vergleich Zonen- mit Feldmodellen“ wurde unter Leitung von Herrn Dr. Upmeyer (Hagen Ingenieure, HIB) zunächst mit der Durchführung von Referenzberechnungen beauftragt. Die Arbeiten sollen die in den Anhängen A und B enthaltenen Referenzbeispiele (Berechnungen mit dem Zonenmodell MRFC) mit verschiedenen Rechenprogrammen untersuchen. Dabei werden Vergleichsrechnungen mit Zonen- und mit CFD-Modellen durchgeführt. Als Zonenmodelle wurden MRFC (durch einen anderen Anwender, bft Cognos) sowie CFAST (hhp Berlin) verwendet. Als CFD-Modelle wurden FDS (HIB, Halfkann+Kirchner, hhp Berlin und I.F.I.) vergleichend eingesetzt. Mit den Berechnungen ist die Anwendbarkeit der in DIN 18 230-4 vorgesehenen Regularien zur Durchführung der Berechnungen vergleichend zwischen den beiden Modelltypen mit jeweils unterschiedlichen Rechenprogrammen zu überprüfen. Damit sollen die Anwendbarkeit und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die verschiedenen Modelltypen untersucht werden.

Als Ergebnis wurde die Vergleichbarkeit der Berechnungen zwischen den Zonenmodellen festgestellt, wobei zu berücksichtigen ist, daß bei einer Brandfläche, die der Raumfläche entspricht (Vollbrand), mit dem Programm CFAST die Modellgrenzen überschritten werden. Gleiches gilt bei der Anwendung für sehr große Räume mit mehreren Öffnungen im Dach.

Bei den CFD-Modellen wurde festgestellt, daß bei den ersten Berechnungen größere Abweichungen bestehen. Diese wurden teilweise auf die unterschiedlich gewählten Gitternetzweiten zurückgeführt, was durch weitere Vergleichsrechnungen bestätigt wurde.

Im Zusammenhang mit den Vergleichsrechnungen wurde festgestellt, daß beim Referenzbeispiel 1 Abweichungen in den äquivalenten Branddauern bestehen. Die Berechnung der 2.400 m² Halle, welche zur Normung des Teil 1 der DIN 18230 verwendet wurde, soll daher im weiteren Verlauf der Bearbeitung mit den Zonen- und Feldmodellen nachgerechnet werden. Nach diesen Erfahrungen sollen Vergleichsrechnungen für verschiedene weitere Referenbeispiele zur Überprüfung der Gründe für die beim Referenzbeispiel 1 festgestellten Abweichungen durchgeführt werden. Hierbei sind auch die verschiedenen Brandregime („brandlast-„ oder „ventilationsgesteuert“) und Brandszenarien (nach Anhang 1 des Teil 1 sowie nach den Festlegungen in Teil 4) zu betrachten.

Es sollen von der Arbeitsgruppe weiterhin Vorschläge für die Mittelung der Temperatur in der Heißgasschicht bei der Berechnung mit CFD-Modellen an den Normenausschuss erfolgen. Dies ist erforderlich, um einheitliche Festlegungen für die Berechnung einer repräsentativen mittleren Temperatur für den untersuchten Brandbereich zu erhalten.

ZUSAMMENFASSUNG

Die DIN 18230-4 stellt eine wesentliche Ergänzung der DIN-Normen für den Industriebau dar, welche sich neben den Eurocodes mit der Anwendung von Ingenieurmethoden befassen. Sie steht im Einklang mit dem Anhang I der Muster-Industriebaurichtlinie und darf insoweit gemäß Abschnitt 4.3 der MIndBau RL für brandschutztechnische Nachweise von Bauteilen direkt eingesetzt werden.

Durch die Rückführung der Bemessung von Bauteilen, die nicht dem Normbrand unterliegen, auf eine äquivalente Normbranddauer ist es möglich, alle Bemessungen auch auf die Klassifizierungen nach Baurecht: feuerhemmend, hochfeuerhemmend und feuerbeständig zurück zu führen [12], [13]. Dieses ist ein großer Vorteil gegenüber Brandschutznachweisen für Naturbrände oder parametrische Brandleistungskurven nach DIN EN 1991-1-1-2, weil diese keinen Bezug zu bauaufsichtlichen Klassifizierungen nach der Einheitstemperatur-Zeit-Kurve haben. Es bleibt abzuwarten, ob die Norm auch auf andere Gebäude als Industriebauten angewendet wird. In diesem Fall wäre allerdings eine Überarbeitung der Sicherheitsbeiwerte γ und α_L in Bezug auf die vorliegenden Gebäudenutzungen erforderlich.

LITERATUR

[1] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz, 2. Auflage. ISBN 978-3-8041-5238-0, 499 S., Werner Verlag GmbH & Co KG, Köln, 2008

[2] Hosser, D. (Hrsg.): Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04-01 Mai 2009, 2. Auflage, Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdb), Technisch-Wissenschaftlicher Beirat (TWB), Referat 4, Altenberge, Braunschweig, 2009

[3] Schneider, U.: Strahlungsberechnung in Brandräumen: Entzündung brennbarer Objekte durch Rauchgas- und Flammenstrahlung, Teil 1. vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Heft 3/2008, S. 129-144, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2008

[4] Schneider, U.; Franssen J.M.; Lebeda, C.: Baulicher Brandschutz. 2. Auflage, ISBN 978-3-89932-086-2, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2008

[5] SFPE (USA): The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fourth Edition, National Fire Protection Association, Quincy, 2008

[6] Schneider, U.: Strahlungsberechnung in Brandräumen: Entzündung brennbarer Objekte durch Rauchgas- und Flammenstrahlung, Teil 2. vfdb-Zeitschrift, 57. Jahrgang, Heft 4/2008, S. 159-173, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2008

[7] Schneider, U.: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz. 1. Auflage, Werner Verlag, Neuwied, 2002

[8] Schneider, U.: Ingenieurmethoden im Brandschutz. Bauphysik-Kalender 2006, S. 237-300, Herausgeber: Nabil A. Fouad, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2006

[9] Schneider, U.; Max, U.: Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beuth Kommentare, 3. Auflage, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003

[10] Schneider, U.; Max, U.: Brandsimulation unter Berücksichtigung der Sprinklerwirkung. vfdb-Zeitschrift, 56. Jahrgang, Heft 3/2007, S. 101-121, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 2007

[11] Schneider, U.; Kersken-Bradley, M.; Kirchberger, H.: Brandschutz – Dokumentation einer Entwicklung. Bauphysik, Heft 6, 30. Jahrgang, S. 405-416, ISSN 0171-5445, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2008

[12] Schneider, U.: Über die Möglichkeit der Umrechnung von natürlichen Bränden auf die Brandbeanspruchung nach DIN 4102-2. Zentralblatt für Industriebau, 19. Jahrgang, Heft 1, S. 24-29, C.R. Vincentz Verlag, Hannover, Jan. 1973

[13] Schneider, U.: Bewertung des unterschiedlichen Brandverhaltens von Baustoffen bei natürlichen Bränden. (Beitrag zum Berechnungsverfahren nach DIN 18 230 E), Betonwerk und Fertigteil-Technik, 38. Jahrgang, Heft 9, S. 653-658, Bauverlag GmbH Wiesbaden, Sept. 1972

[14] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Brandschutzleitfaden für Gebäude des Bundes; Baulicher Brandschutz für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von Gebäuden des Bundes; 3. Auflage, Stand Juli 2006

[15] Schneider, U.; Kolb, T.: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz. 6. Auflage, Expert Verlag, Renningen, März 2011

[16] Schneider, U.:Ingenieurmethoden im Industriebau – DIN 18230-4: Ermittlung der äquivalenten Branddauer und des Wärmeabzugs durch Brandsimulation, Beitrag vds-Fachtagung, Mai 2011.

DIN 4102-4 - ERGÄNZENDE REGELUNGEN ZU DEN BRANDSCHUTZ-TEILEN DER EUROCODES

Christiane Hahn
HAHN Consult – Ingenieurgesellschaft für Tragwerksplanung und Baulichen Brandschutz, Hamburg/Braunschweig

EINLEITUNG

DIN 4102-4 ist für den baulichen Brandschutz das Handbuch der Praxis. Seit mehreren Jahrzehnten wird diese Norm von den Planern, der Bauaufsicht, den Brandschutzingenieuren sowie den ausführenden Firmen akzeptiert und genutzt. DIN 4102-4 ist die von der Praxis geforderte einfache und verständliche Normung.

Um es nochmals zu verdeutlichen DIN 4102-4 ist ein Katalog geprüfter und klassifizierter Baustoffe und Bauteile auf der Grundlage i.d.R. genormter Baustoffe und Bauteile. Die Prüfungen der Bauteile und Baustoffe erfolgten nach DIN 4102. DIN 4102-4 ist eine reine nationale Norm und es ist bis heute in Europa nicht gelungen, eine entsprechend umfassende Normung zu beauftragen, geschweige denn zu erarbeiten. Die nationalen Interessen stehen über dem technischen Know-how.

1940 wurde ein Blatt 2 in DIN 4102 von 1934 erweitert, das klassifizierte Bauteile und Baustoffe beschrieb. Eingestuft wurden die Bauteile in feuerhemmend, feuerbeständig. Auf die Zusammenfassung der noch älteren Ausgaben zu Feuerwiderstandsfähigkeiten von Baustoffen und Bauteilen wird an dieser Stelle verzichtet.1970 wurde dann erstmals der Teil 4 – richtigerweise das Blatt 4 - mit lediglich 8 Seiten herausgegeben. Der Inhalt dieses Normteils ist dem Bild 1 zu entnehmen. Im Inhalt wird unterschieden nach Baustoffen, Feuerwiderstandsklassen für Bauteile, z. B. F 30 bis F 180, und Sonderbauteilen.

1978 gab es dann erstmals einen Entwurf mit einem umfangreichen Teil 4 mit 80 Seiten. Hier wurde nicht mehr nach Feuerwiderstandsklassen für Bauteile, sondern nach klassifizierten Bauteilen, z.B. Wände, Decken, Dächer, etc., unterschieden. 1981 erschien dieser Entwurf dann mit umfangreichen Änderungen in der Gliederung, jedoch nicht mit wesentlichen inhaltlichen Änderungen, als Weißdruck. Im Bild 2 ist der Inhalt dieses Normteiles wiedergegeben. 1992 erschien dann der nächste Entwurf mit insgesamt 194 Seiten. Von der Gliederung entsprach dieser Entwurf der Fassung 1981, jedoch ohne die Anhänge, die in den Text integriert wurden. Mit Fassung März 1994 erschien dieser Entwurf mit einer Kürzung auf 149 Seiten in der noch heute gültigen Fassung. Diese Fassungen seit 1970 wurden maßgeblich von Prof. Dr. Ing. Meyer-Ottens bearbeitet, meinem Lehrmeister. Seit meiner ersten Tätigkeit im Brandschutz durfte ich seit dem Entwurf 1978 den Abschnitt Mauerwerk maßgeblich bearbeiten und für den Rest Korrekturen überprüfen.

2004 wurde aufgrund der europäischen Normung ein erster Schritt unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. Wesche, meinem 1. Kollegen, gemacht, die europäische Normung für den Teil 4 zu berücksichtigen. Der Teil 4 wurde durch eine A1 Fassung dahin gehend ergänzt, dass neuere nationale Ergebnisse aus Brandprüfungen ergänzt wurden. Außerdem wurden Korrekturen vorgenommen. Zusätzlich wurde DIN 4102-22 als Anwendungsnorm entwickelt, um eine Verbindung zwischen den alten globalen Bemessungsverfahren und den neuen Bemessungsverfahren nach Teilsicherheitskonzept zu schaffen. In Tabelle 1 sind die Entwicklungen von DIN 4102-4 zusammengefasst. Weitere Angaben zum heutigen Stand von DIN 4102-4 in Verbindungmit DIN 4102-22 sowie den Eurocodes sind den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

UK 699.81 : 691 : 351.78 : 001.4 DEUTSCHE NORMEN Februar 1970

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
Einreihung in die Begriffe

DIN 4102 Blatt 4

Behaviour of building materials and structures in fire; classification with respect to definitions

Frühere Ausgaben: DIN 4102 Blatt 2: 8.34, 11.40; DIN 4102 Blatt 4: 9.65x

Vorbemerkung

Im Zusammenhang mit der Überarbeitung von DIN 4102 Widerstandsfähigkeit von Baustoffen und Bauteilen gegen Feuer und Wärme,
Blatt 1 —; Begriffe
Blatt 2 —; Einreihung in die Begriffe
Blatt 3 —; Brandversuche
jeweils Ausgabe November 1940 wurde mit der Titeländerung auch der Inhalt der Norm neu gegliedert:
DIN 4102 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen
Blatt 1 —; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Baustoffen (in Bearbeitung)
Blatt 2 —; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Bauteilen, Ausgabe Februar 1970
Blatt 3 —; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Sonderbauteilen, Ausgabe Februar 1970
Blatt 4 —; Einreihung in die Begriffe, Ausgabe Februar 1970
Blatt 5 —; Erläuterungen zu Blatt 1 bis 4 (in Bearbeitung).

Begriffe, Anforderungen und Prüfungen von Baustoffen (später DIN 4102 Blatt 1) sind z. Z. durch die von der Arbeitsgruppe Einheitliche Technische Baubestimmungen (ETB) bearbeitete 3. Fassung (Februar 1970) der Ergänzenden Bestimmungen zu DIN 4102 geregelt.
Hausschornsteine, die den bauaufsichtlichen Anforderungen entsprechen, sind in DIN 18 160 Blatt 1 „Feuerungsanlagen; Hausschornsteine, Bemessung und Ausführung", behandelt.

Inhalt

1. Allgemeines
2. Hinweis auf weitere Normen
3. Baustoffe
3.1. Nichtbrennbare Baustoffe
3.2. Brennbare Baustoffe
4. Bauteile (F 30)
4.1. Bauteile mit Putz oder Unterdecken
4.2. Decken mit Belägen
4.3. Wände
4.4. Decken und gleichzustellende Dächer
4.5. Balken und Unterzüge
4.6. Pfeiler und Stützen
4.7. Treppen
5. Bauteile (F 90)
5.1. Wände
5.2. Decken und gleichzustellende Dächer
5.3. Balken und Unterzüge
5.4. Pfeiler und Stützen
5.5. Treppen
6. Bauteile (F 180)
6.1. Stahlbetonstützen
6.2. Stützen aus Stahl
7. Sonderbauteile
7.1. Brandwände
7.2. Gegen Feuer widerstandsfähige, nichttragende und nichtaussteifende Außenwandelemente, Brüstungen u. ä.
7.3. Feuerschutzabschlüsse
7.4. Abschlüsse in Fahrschachtwänden der Feuerwiderstandsklasse F 90
7.5. Gegen Feuer widerstandsfähige Verglasungen
7.6. Gegen Flugfeuer und strahlende Wärme widerstandsfähige Dacheindeckungen und Dachabdichtungen

Fortsetzung Seite 2 bis 8

Fachnormenausschuß Bauwesen im Deutschen Normenausschuß (DNA)
Arbeitsgruppe Einheitliche Technische Baubestimmungen (ETB)

Deutscher Normenausschuß, Berlin 30

Anderung Februar 1970: Redaktionell überarbeitet im Zusammenhang mit DIN 4102 Blatt 3, siehe auch Vorbemerkung. Inhalt teilweise ergänzt; DIN 4102 Blatt 10, Ausgabe Oktober 1965, zurückgezogen.

Alleinverkauf der Normblätter durch Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin 30 und Köln
2.70
DIN 4102 Bl.4 Febr. 1970 Preisgr. 6
Vertr.-Nr. 0002

Bild 1 Inhalt DIN 4102 Blatt 4 Ausgabe 1970

DK 699.81 : 691.001.33 : 614.841.332 DEUTSCHE NORMEN März 1981

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen

Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile

DIN 4102 Teil 4

Inhalt

Seite

1 Geltungsbereich 4

2 Klassifizierte Baustoffe 4
2.1 Allgemeines 4
2.2 Baustoffe der Klasse A 5
2.3 Baustoffe der Klasse B 5

3 Klassifizierte Betonbauteile mit Ausnahme von Wänden 6
3.1 Allgemeines zur Bemessung von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen 6
3.2 Feuerwiderstandsklassen statisch bestimmt gelagerter Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normalbeton 8
3.3 Feuerwiderstandsklassen statisch unbestimmt gelagerter Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normalbeton 12
3.4 Feuerwiderstandsklassen statisch bestimmt gelagerter Balken aus Gasbeton mit Rechteckquerschnitt bei maximal 3seitiger Brandbeanspruchung 14
3.5 Feuerwiderstandsklassen von Decken aus Stahlbeton- und Spannbetonplatten aus Normalbeton 16
3.6 Feuerwiderstandsklassen von Decken aus Stahlbetonhohldielen und Gasbetonplatten 20
3.7 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbeton- und Spannbetondecken aus Fertigteilen aus Normalbeton 22
3.8 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbeton- und Spannbeton-Rippendecken aus Normalbeton ohne Zwischenbauteile 23
3.9 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbeton- und Spannbeton-Plattenbalkendecken aus Normalbeton 32
3.10 Feuerwiderstandsklassen von Stahlsteindecken 33
3.11 Feuerwiderstandsklassen aus Stahlbeton- und Spannbeton-Balkendecken sowie entsprechenden Rippendecken jeweils aus Normalbeton mit Zwischenbauteilen 34
3.12 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbetondecken in Verbindung mit im Beton eingebetteten Stahlträgern 36
3.13 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbetondächern aus Normalbeton 37
3.14 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbetonstützen einschließlich Konsolen aus Normalbeton 38
3.15 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbeton- und Spannbeton-Zuggliedern aus Normalbeton . . . 40

4 Klassifizierte Wände 41
4.1 Allgemeines zur Bemessung von Wänden 41
4.2 Feuerwiderstandsklassen von Beton- und Stahlbetonwänden aus Normalbeton 42
4.3 Feuerwiderstandsklassen von nichttragenden Wänden aus Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge 43
4.4 Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus Mauerwerk und Wandbauplatten einschließlich von Pfeilern und Stürzen 44
4.5 Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge 44
4.6 Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus bewehrtem Gasbeton 46
4.7 Brandwände 47
4.8 Feuerwiderstandsklassen zweischaliger Wände aus Holzwolle-Leichtbauplatten mit Putz 50
4.9 Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus Gipskarton-Bauplatten 51

Seite

4.10 Feuerwiderstandsklassen von Fachwerkwänden mit ausgefüllten Gefachen 54
4.11 Feuerwiderstandsklassen von Wänden aus Holztafeln 54

5 Klassifizierte Holzbauteile mit Ausnahme von Wänden 60
5.1 Feuerwiderstandsklassen von Decken aus Holztafeln 60
5.2 Feuerwiderstandsklassen von Holzbalkendecken 64
5.3 Feuerwiderstandsklassen von Dächern aus Holz und Holzwerkstoffen 68
5.4 Feuerwiderstandsklassen von Holzbalken 70
5.5 Feuerwiderstandsklassen von Holzstützen 72
5.6 Feuerwiderstandsklassen von Holzzuggliedern . . 75
5.7 Feuerwiderstandsklassen von Holzverbindungen 76

6 Klassifizierte Stahlbauteile 81
6.1 Allgemeines zur Bemessung von Stahlbauteilen . . 81
6.2 Feuerwiderstandsklassen bekleideter Stahlträger 82
6.3 Feuerwiderstandsklassen bekleideter Stahlstützen einschließlich Konsolen 84
6.4 Feuerwiderstandsklassen von Stahlzuggliedern 86
6.5 Feuerwiderstandsklassen von Stahlträger- und Stahlbetondecken mit Unterdecken 86

7 Klassifizierte Sonderbauteile mit Ausnahme von Brandwänden 94
7.1 Feuerwiderstandsklassen nichttragender Außenwände 94
7.2 Feuerwiderstandsklassen von Feuerschutzabschlüssen, Abschlüsse in Fahrschachtwänden der F-Klasse F 90 und Verglasungen der Feuerwiderstandsklassen F und G 94
7.3 Feuerwiderstandsklassen von Lüftungsleitungen 94
7.4 Installationsschächte und -kanäle sowie Leitungen in Installationsschächten und -kanälen 97
7.5 Gegen Flugfeuer und strahlende Wärme widerstandsfähige Bedachungen 97

Anhang A: Allgemeines zur Brandschutzbemessung 98
A.1 Einflußgrößen auf die Feuerwiderstandsdauer . . 98
A.2 Feuerwiderstand von Gesamtkonstruktionen . . . 98

Anhang B: Sonderfälle der Klassifizierung von Betonbauteilen nach den Abschnitten 3 und 4 . . 98
B.1 Verwendung von Normalbeton mit vorwiegend karbonathaltigem Zuschlag 98
B.2 Kritische Temperatur crit T in Abhängigkeit von Stahlsorte und Beanspruchung, Δu-Werte 99
B.3 Abstandhalter, Baustoffklasse 99
B.4 Feuerwiderstandsklassen von Stahlbetonstützen mit bestimmtem Querschnitt und geringer Beanspruchung 100
B.5 Feuerwiderstandsklassen unbekleideter Stahlbeton- und Spannbeton-Zugglieder für begrenzte Dehnungen 100
B.6 Feuerwiderstandsklassen tragender Beton- und Stahlbetonwände mit geringer Beanspruchung . .101
B.7 Feuchtigkeitsgehalt und Abplatzverhalten 101

Anhang C: Sonderfälle der Klassifizierung von Stahlbauteilen nach Abschnitt 6 102
C.1 Kritische Temperatur crit T in Abhängigkeit von der Stahlsorte und Beanspruchung, Δd-Werte . .102
C.2 Unbekleidete Stahlbauteile 103
C.3 Beispiele für U/A-Berechnungen 103

Zitierte Normen und andere Unterlagen 105

Auszug aus Vorschau.pdf

Bild 2 Inhalt DIN 4102 Teil 4 Ausgabe 1981

Tabelle 1 Entwicklung DIN 4102-4

Norm	Ausgabe	Umfang	Inhaltsgliederung
DIN 4102 Blatt 2	Februar 1970	8 Seiten	Baustoffe, Feuerwiderstands-klassen F 30 – F 180, Son-derbauteile
E DIN 4102 Teil 4	März 1978	80 Seiten	Baustoffe, Wände, Decken, Dächer, Sonderbauteile
DIN 4102 Teil 4	März 1981	108 Seiten	Baustoffe, Wände, Decken, Dächer, Sonderbauteile Anhänge für Sonderfälle
E DIN 4102 Teil 4	August 1992	194 Seiten	Baustoffe, Wände, Decken, Dächer, Sonderbauteile
DIN 4102-4	März 1994	149 Seiten	Baustoffe, Wände, Decken, Dächer, Sonderbauteile
DIN 4102-4/A1	November 2004	50 Seiten	Berichtigungen, Ergänzun-gen, Hinweise zu Eurocodes
DIN 4102-22	November 2004	34 Seiten	Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemes-sungsbasis von Teilsicher-heitsbeiwerten
DIN 4102-4	2012	??	

DIN 4102-4:1994-11

Derzeitiger Stand

Um gleich allen Zweifel zu begegnen: Die DIN 4102-4 ist nach wie vor gültig, obwohl sie aus formalen Gründen eigentlich nicht mehr gültig sein dürfte. Formale DIN-Gründe sind, dass Normen grundsätzlich alle 5 Jahre aktualisiert werden sollen. Außerdem befürchtet das DIN, dass Doppelregelungen zur europäischen Normung enthalten sein könnten.

Viele der Bezugsnormen in DIN 4102-4 sind durch europäische Normen ersetzt worden und die deutschen Normen sind dann zurückgezogen worden. Oder einige Bezugsnormen sind aus anderen Gründen zurückgezogen worden. Damit sind diese Normen formal nicht mehr anzuwenden und der DIN 4102-4 wurde teilweise die Grundlage entzogen.

In Abstimmung mit den obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder, vertreten durch die ARGEBAU und dem DIBt ist DIN 4102-4 trotzdem weiter anwendbar, da es sich um eine nationale Norm mit nationalen Bezügen handelt. Auch wenn zahlreiche Bezugsnormen zurückgezogen wurden, wird akzeptiert, dass DIN 4102-4 weiterhin angewendet wird, weil die Prüfergebnisse zum Brandverhalten der Baustoffe und Bauteile, die Grundlage waren, weiterhin gültig sind. DIN 4102-4 wurde über die Liste der Technischen Baubestimmungen eingeführt und erfüllt damit die Funktion eines bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweises.

Inhalt der Norm

DIN 4102-4 unterscheidet zunächst zwischen Baustoffen und Bauteilen. Innerhalb der Bauteile wird unterteilt in Massivbauteile, Holzbauteile, Stahlbauteile, Verbundbauteile und Sonderbauteile. Als Untergruppe gibt es die Wände und Trockenbaukonstruktionen sowie Unterdecken. Innerhalb der Wände sind alle Bauarten einschließlich Brandwände vertreten, obwohl Brandwände per Definition Sonderbauteile sind. Die Anforderungen an die Bauteile in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsklasse werden in der Regel mit Tabellenwerten angegeben. Zusätzlich werden konstruktive Details zur Ausführung beschrieben.

In Bild 3 ist die Gliederung des Inhaltes von DIN 4102-4:1994 dargestellt.

Zusätzlich wurde in DIN 4102-4 eingeführt, dass bestimmte Literatur als weiterer Verwendbarkeitsnachweis herangezogen werden darf. Damit sollte seinerzeit der Umfang der DIN in Grenzen gehalten werden und andererseits sollte die Möglichkeit eröffnet werden, weitere Details offiziell anzuerkennen. In der Literatur werden Konstruktionsdetails ergänzt und außerdem können aktuelle Prüfergebnisse oder technische Erlkenntnisse der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Die vereinbarte Literatur wurde am Ende von DIN 4102-4 benannt.

Da DIN 4102-4:1994 seit mehr als 15 Jahren das Praxishandbuch schlechthin ist, kann an dieser Stelle darauf verzichtet werden, im Detail den Inhalt darzustellen.

DK 699.81 : 691.001.33 : 614.841.332 DEUTSCHE NORM März 1994

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen

Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile

DIN 4102 Teil 4

Fire behaviour of building materials and components; Synopsis and

Ersatz für Ausgabe 03.81

Allgemeines		Anwendungsbereich, Grundlagen, Brandschutzbemessung	1
Baustoffe		Klassifizierte Baustoffe	2
Massivbauteile		Bemessungsgrundlagen	3.1
		Balken statisch bestimmt gelagert	3.2
		Balken statisch unbestimmt gelagert	3.3
		Platten	3.4
		Hohldielen, Porenbetonplatten	3.5
		Fertigteile	3.6
		Rippendecken ohne Zwischenbauteile	3.7
		Plattenbalkendecken	3.8
		Stahlsteindecken	3.9
		Rippen- und Balkendecken mit Zwischenbauteilen	3.10
		Decken mit eingebetteten Stahlträgern	3.11
		Dächer	3.12
		Stützen	3.13
		Zugglieder	3.14
	Wände	Bemessungsgrundlagen	4.1
		Stahlbetonwände	4.2
		gegliederte Stahlbetonwände	4.3
		Leichtbetonwände mit geschlossenem Gefüge	4.4
		Mauerwerk und Wandbauplatten	4.5
		Leichtbetonwände mit haufwerksporigem Gefüge	4.6
		Porenbeton, bewehrt	4.7
		Brandwände	4.8
HWL, GKF		Holzwolle-Leichtbauplatten-Wände	4.9
		Gipskarton-Bauplatten-Wände	4.10
Holzbauteile		Fachwerkwände	4.11
		Holztafelwände	4.12
		Vollholz-Blockbalken-Wände	4.13
		Bemessungsgrundlagen	5.1
		Holztafeldecken	5.2
		Holzbalkendecken	5.3
		Dächer	5.4
		Balken	5.5
		Stützen	5.6
		Zugglieder	5.7
		Verbindungen	5.8
Stahlbauteile		Bemessungsgrundlagen	6.1
		Träger	6.2
		Stützen	6.3
		Zugglieder	6.4
Unterdecken		Träger- und Stahlbetondecken mit Unterdecken	6.5
Verbundbauteile		Bemessungsgrundlagen	7.1
		Verbundträger	7.2
		Verbundstützen	7.3
Sonderbauteile (Brandwände siehe Abschnitt 4.8)		nichttragende Außenwände (W)	8.1
		Feuerschutzabschlüsse (T)	8.2
		Fahrschachtabschlüsse	8.3
		Brandschutzverglasungen (G)	8.4
		Lüftungsleitungen (L)	8.5
		Installationsschächte und -kanäle (I)	8.6
		Bedachungen	8.7

Bild 3 Gliederung des Inhaltes von DIN 4102-4:1994-03

DIN 4102-4/A1 – STAND 2004

DIN 4102-4/A1:2004-11 gilt zusammen mit DIN 4102-4:1994-03. Sie gilt insbesondere für eine Bemessung im Brandfall nach einer Bemessung bei Umgebungstemperatur für Bauteile auf der Basis vonProduktbemessungsnormen nach zulässigen Spannungen bzw. nach dem Traglastverfahren. DIN 4102-4/A1 enthält darüber hinaus weitere allgemeine Korrekturen und Berichtigungen zu DIN 4102-4.

Inhalt

DEUTSCHE NORM November 2004

DIN 4102-4/A1

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen –
Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A1

Seite

Vorwort ... 3
Einleitung ... 4
1 Anwendungsbereich ... 4
2 Normative Verweisungen ... 4
3 Änderungen ... 5
3.1 Bauteile aus hochfestem Beton ... 5
3.2 Änderungen zum Mauerwerksbau ... 6
3.3 Änderungen zum Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge und bewehrtem Porenbeton ... 15
3.4 Holzbau ... 17
3.4.1 Allgemeines ... 17
3.4.2 Kaltbemessung nach der Normenreihe DIN 1052:1988-04 einschließlich DIN 1052/A1:1996-10 ... 17
3.5 Sonderbauteile ... 28
3.6 Anpassung der normativen Verweisungen in DIN 4102-4:1994-03 ... 30
3.7 Zusammenfassung der Druckfehlerberichtigung in DIN 4102-4 ... 40
Anhang A (informativ) Erläuterungen zur Bemessung im Brandfall ... 43
A.1 Brandschutzbemessung nach DIN 4102-4 ... 43
A.1.1 Überblick ... 43
A.1.2 Gesamtproblematik zu DIN 4102-4 ... 43
A.1.3 Ausblick ... 45
A.2 Brandschutzbemessung nach Eurocode ... 46
A.2.1 Veröffentlichte Eurocodes und Nationale Anwendungsdokumente (NAD) ... 46
A.2.2 Überführung der Europäischen Vornormen zur Brandschutzbemessung in Europäische Normen ... 48
Anhang B (informativ) Zuordnung von Sortier- und Festigkeitsklassen für Nadel- und Laubholz ... 49
Literaturhinweise ... 50

Bild 4 Inhalt DIN 4102-4/A1:2004-11

Zusammenfassung wesentlicher Angaben in DIN 4102-4/A1

DIN 4102-4/A1 erläutert ausführlich, dass es für tragende Bauteile für die Übergangsphase bis zur endgültigen Einführung der heißen Eurocodes 3 mögliche Nachweisverfahren zum Brandschutz gibt. Ausdrücklich wird festgeschrieben, dass ein Mischungsverbot zwischen den verschiedenen Bemessungsverfahren besteht.

Erstmals werden sämtliche Normenbezüge datiert, damit wird festgeschrieben in Verbindung mit welchen Produktnormen die in DIN 4102-4 vorgenommenen Klassifizierungen gelten. Bei wesentlichen Änderungen in den Produktnormen können die Feuerwiderstandsklassen nicht mehr gelten.

Erstmals werden Angaben zu hochfestem Beton in DIN 4102-4 aufgenommen. Dieses spiegelt die Entwicklung im Betonbau seit 1994 wider.

Im Mauerwerksbau werden die Prüfergebnisse, die zu besseren Klassifizierungen geführt haben, ergänzt. Zu Wänden aus bewehrtem Porenbeton erfolgen kleinere Änderungen.

Der Holzbau führt die aktuellen Sortierklassen ein. Außerdem streicht er alle Tabellen zu tragenden Bauteilen und führt vereinfachte und genauere Bemessungsverfahren in Anlehnung an Eurocode 5 Teil 1-2 (DIN EN 1995-1-2) ein. Damit wird der Schritt getan, dass eine Bemessung von tragenden Holzbauteilen nur noch über ein Rechenverfahren erfolgen kann. Die in der Praxis gerne genutzte einfache Bemessung nach Tabellen mit wenig Aufwand entfiel. Holzbau ist eine traditionelle Bauweise, die mit einfachen Mitteln umgesetzt wurde. Die Praxis hat daher trotzdem sehr häufig die Tabellen aus DIN 4102-4:1994 benutzt.

Bei den Sonderbauteilen wurden die Angaben zu Feuerschutzabschlüssen gestrichen, da die dazugehörenden Normen ersatzlos zurückgezogen wurden. Die Türindustrie hat ihr Interesse durchgesetzt, Brandschutztüren ausschließlich über Zulassungen zu vertreiben, um damit jeweils ihre Entwicklungen zu schützen. Kleinere Betriebe können dann nur noch mit Hilfe von Lizenzen arbeiten.

Außerdem erfolgten im Bereich der Bedachungen – Sonderbauteile – Änderungen.

Im Anhang A erfolgte dann eine ausführliche Erläuterung zur Gesamtproblematik der Brandschutzbemessung von tragenden Bauteilen nach DIN 4102-4 bzw. nach den Eurocodes.

DIN 4102-4 IN VERBINDUNG MIT DIN 4102-22 – STAND 2004

DIN 4102-22:2004-11 gilt zusammen mit DIN 4102-4:1994-03 einschließlich DIN 4102-4/A1:2004-11 zum brandschutztechnischen Nachweis nach einer Bemessung bei Umgebungstemperatur auf Basis von *nationalen* Produktbemessungsnormen mit Teilsicherheitsbeiwerten. Als Anwendungsnorm enthält sie zusätzliche Festlegungen und Anpassungen zu DIN 4102-4:1994-03 einschließlich DIN 4102-4/A1:2004-11.

Bei einer Bemessung bei Umgebungstemperatur nach den europäischen Bemessungsnormen (Eurocodes) gilt DIN 4102-22 nicht.

Inhalt

DEUTSCHE NORM **November 2004**

DIN 4102-22

Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen –
Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten

Seite

Vorwort ... 3
Einleitung ... 4
1 Anwendungsbereich ... 4
2 Normative Verweisungen ... 4
3 Symbole und Abkürzungen ... 5
4 Mechanische Einwirkungen im Brandfall ... 6
4.1 Allgemeines ... 6
4.2 Vereinfachte Kombinationsregeln ... 7
5 Beton ... 7
5.1 Allgemeines ... 7
5.2 Anpassungen der Aussagen in DIN 4102-4:1994-03 einschließlich DIN 4102-4/A1:2004-11 bei einer Kaltbemessung nach DIN 1045-1:2001-07 zusammen mit DIN 1045-1/A1:2002-07 ... 7
6 Holzbau ... 16
6.1 Allgemeines ... 16
6.2 Anpassungen der Aussagen in DIN 4102-4:1994-03 einschließlich DIN 4102-4/A1:2004-11 bei einer Kaltbemessung nach DIN 1052:2004-08 ... 16
7 Mauerwerksbau ... 30
8 Stahl ... 30
9 Klassifizierte Verbundbauteile ... 30
9.1 Grundlagen ... 30
9.2 Feuerwiderstandsklassen von Verbundträgern mit ausbetonierten Kammern ... 31
9.2.1 Anwendungsbereich, Ausnutzungsfaktor, Randbedingungen ... 31
9.3 Feuerwiderstandsklassen von Verbundstützen ... 31
9.3.1 Anwendungsbereich, Ausnutzungsfaktor ... 31
Anhang A (informativ) Erläuterungen zum Bereich Bauteile aus bewehrtem Porenbeton ... 32
Anhang B (informativ) Erläuterungen zum Mauerwerksbau ... 33
Literaturhinweise ... 34

Bild 5 Inhalt DIN 4102-22:2004-11

Zusammenfassung wesentlicher Angaben in DIN 4102-22

In den Abschnitten 1 bis 3 folgt DIN 4102-22 den Vorgaben der Eurocodes zum Aufbau einer Norm. Im Abschnitt 4 erfolgt eine Anbindung an DIN 1055-100 hinsichtlich der mechanischen Einwirkungen im Brandfall.

Für Beton sowie Leichtbeton mit dichtem Gefüge erfolgt die Anbindung an DIN 1045-1:2001 – Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten.

Für den Holzbau erfolgt die Anbindung an DIN 1052:2004 – Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten – und für die Holzwerkstoffe an die DIN V 20000-1.

Für den Mauerwerksbau konnte keine Anbindung an ein Bemessungsverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten erfolgen, weil zum Redaktionsschluss noch keine neue DIN 1053 mit einer Bemessung nach dem semi-probabilistischen Bemessungskonzept vorlag.

Für den Stahlbau gab es keine Änderungen.

Für den Verbundbau gab es Änderungen aufgrund der Neudefinition der Lastausnutzung.

Für den bewehrten Porenbeton gab es zwar gerade erschienene geänderte Bemessungsnormen, aber bis zum Redaktionsschluss konnten keine Angaben zur Verfügung gestellt werden.

Damit war DIN 4102-22 relativ unvollständig und hätte laufend dem aktuellen Normenstand angepasst werden müssen. Dies ist aber nicht erfolgt, weil keine Bearbeiter zur Verfügung standen.

DIN 4102-4:2012 UND EUROCODES

Grundlagen

Im Sommer 2007 wurde vom zuständigen Koordinierungsausschuss Brandschutz zunächst der Grundsatzbeschluss gefasst, DIN 4102-4 trotz der Eurocodes zu erhalten. Insbesondere die Industrie und die Praxis haben den Erhalt von DIN 4102-4 gefordert. Die Industrie hat u. a. ausgeführt, dass DIN 4102-4 ein Exportschlager im Osten und in den arabischen Ländern sei. DIN 4102-4 sei dort unverzichtbar, weil in diesen Ländern keine eigenen Regeln existieren und die deutschen Produkte nur mit DIN 4102-4 verkauft werden könnten.

Es wurde jedoch die Vorgabe gemacht, dass alle Bezugsnormen hinsichtlich der seit 1994 eingetretenen Änderungen zu überprüfen seien. Zunächst sollten eine A2-Fassung zu DIN 4102-4 und eine A1-Fassung zu DIN 4102-22 erarbeitet werden. Danach sollte eine konsolidierte Fassung erstellt werden, d. h. ein komplett überarbeiteter Teil 4. Es wurde eindeutig festgestellt, dass DIN 4102-4 eine rein nationale Norm ist und bleiben soll. So bleiben die F-Klassen erhalten

und es werden alle Anbindungen an nationale Bemessungsnormen mit Bemessungsverfahren nach Teilsicherheitsbeiwerten berücksichtigt. Dazu müssen jedoch die ca. 150 Verweise auf Bezugsnormen dahingehend überprüft werden, ob diese noch mit den seinerzeit für die Brandprüfungen zugrunde gelegten Normen übereinstimmen oder ob Grenzen zur Anwendung eingeführt werden müssen.

Die Normungsarbeit wird im Wesentlichen ehrenamtlich durchgeführt. Es wurden Arbeitsgruppen für die einzelnen Baustoffe der tragenden Bauteile sowie des Ausbaues gebildet. Einige Arbeitsgruppen haben schnell gearbeitet, andere hatten zunächst andere Prioritäten wie das Fertigstellen der kalten Bemessungsnormen, weitere haben überhaupt nicht gearbeitet. So wurden von den einzelnen Gruppen sehr unterschiedliche Interessen und Ziele verfolgt. Das DIN hat sich sehr schwer getan, einerseits die zu prüfenden Normen in bearbeitbarer Form und andererseits eine vollständige Liste aller zu ersetzenden Bezugsnormen zur Verfügung zu stellen. Außerdem war wegen Personalmangels über insgesamt mehr als 2 Jahre die Position des DIN-Geschäftsführers im Arbeitsausschuss vakant.

Nachdem die ARGEBAU beschlossen hatte, die Eurocodes für die Bemessung bei Normaltemperatur und für den Brandfall zum 01.07.2012 verbindlich einzuführen, wurde es erforderlich, die DIN 4102-4 systematisch im Hinblick auf sog, entgegenstehende Regelungen zu durchforsten. Für eine radikale Lösung des Problems durch Zurückziehen von DIN 4102-4 fand sich bei einer Umfrage des DIN in den betroffenen Arbeitsausschüssen keine Mehrheit. Auch die Vertreter der obersten Bauaufsichtsbehörden und des DIBt haben sich für den Erhalt von DIN 4102-4 ausgesprochen. Der Versuch einer kleinen Arbeitsgruppe, durch direkten Vergleich von DIN 4102-4 mit den Brandschutzteilen der baustoffbezogenen Euroccodes die vorhandenen Doppelregelungen herauszufiltern, scheiterte daran, dass die Eurocodes konsequent baustoffbezogen aufgebaut sind, während in DIN 4102-4 die den Eurocodes entgegenstehenden Regeln für tragende Bauteile mit nationalen Sonderlösungen und konstruktiven Detailangaben vermischt sind.

In einer Sitzung des Koordinierungsausschusses Brandschutz im Januar 2011 wurde nochmals intensiv über das weitere Vorgehen bei DIN 4102-4 diskutiert. Dabei wurde bestätigt, dass DIN 4102-4 nicht zurückgezogen, sondern als nationale Norm erhalten bleiben soll. Aber das im Arbeitsausschuss DIN 4102-4 bisher verfolgte Konzept einer konsolidierten Fassung von DIN 4102-4 fand keine Zustimmung. Es wurde beschlossen, eine „Restnorm“ DIN 4102-4 zu erstellen, aus der alle den Eurocode-Brandschutzteilen entgegenstehenden Regeln eliminiert, die nationalen Klassifizierung der nicht in den Eurocodes geregelten Konstruktionen sowie einzelne Detaillösungen jedoch erhalten bleiben. Die beiden Arbeitsausschüsse DIN 4102-4 und Konstruktiver baulicher Brandschutz wurden beauftragt, gemeinsame Arbeitsgruppen aus Vertretern beider Ausschüsse zu bilden, um die Erarbeitung der baustoff- und bauteilbezogenen Regelungen zu beschleunigen und sowohl das Know-how aus der nationalen Normung als auch die Detailkenntnisse über die Eurocodes zu berücksichtigen.

Aktueller Bearbeitungsstand

Von den eingesetzten Arbeitsgruppen wurden auf Grundlage der Beschlüsse erste Arbeitspapiere geliefert und in einer gemeinsamen Sitzung beider Ausschüsse im Mai beraten. Dabei zeigte, dass die Aufgabenstellung von den Gruppen zum Teil unterschiedlich interpretiert wurde und weitere Harmonisierungen der Entwürfe erforderlich sind. Dadurch haben sich die Arbeiten gegenüber dem sehr ehrgeizigen Terminplan – Veröffentlichung eines Gelbdrucks der „Restnorm“ bis Sommer 2011 – verzögert.

Die Gliederung der Norm wurde der Struktur der baustoffbezogenen Eurocodes angepasst. Da nur noch diejenigen Regeln erhalten bleiben sollen, die den Eurocode-Regelungen nicht entgegenstehen, müssen vor allem die Nachweise für üblichen tragende Bauteile entfallen. Hingegen sollen die Klassifizierungen für spezielle Konstruktionen und alte Bauweisen sowie einige Regeln zur konstruktiven Durchbildung weiter gelten.

Alle Ausbaukonstruktionen – Trockenbau, Unterdecken, etc. – bleiben erhalten und werden zum Teil noch durch neuere Prüfergebnisse ergänzt. Hier gäbe es durchaus mehr zu normen, aber die Industrie setzt stattdessen auf allgemeine bauaufsichtliche Prüfzeugnisse (abP), weil sie gegenüber dem Wettbewerb damit besser agieren kann.

Die vorliegenden Arbeitspapiere aus den Arbeitsgruppen wurden inzwischen von der Obfrau des Arbeitsausschusses DIN 4102-4 geprüft und an den Gesamtinhalt angepasst. Zurzeit werden sie vom DIN zu einem Normentwurf (Gelbdruck) zusammengestellt. Nach dessen Veröffentlichung wird es eine verkürzte Einspruchsfrist von 2 Monaten geben. Eine eventuell erforderliche Einspruchssitzung muss dann spätestens im Januar 2012 stattfinden, wenn der Weißdruck der DIN 4102-4 gleichzeitig mit den Brandschutzteilen der Eurocodes am 01.07.2012 bauaufsichtlich eingeführt werden soll. Dazu müsste unmittelbar nach der Einspruchssitzung das vom Arbeitsausschuss verabschiedete Druckmanuskript der Norm den Gremien der Bauaufsicht vorgelegt werden, damit die Fachkommission Bautechnik auf ihrer Frühjahrssitzung über die Aufnahme in die Liste der Technischen Baubestimmungen entscheiden kann.

Inhalt

Tabelle 2 zeigt die neue Aufteilung des Inhaltes von DIN 4102-4:2012.

Das Vorwort und die Einleitung entsprechen den europäischen Normen.

Zum Anwendungsbereich wird ausgesagt, dass die DIN 4102-4 die Brandschutzteile der Eurocodes in Teilbereichen ergänzt und zusätzliche Angaben enthält, die in den Eurocodes zurzeit fehlen.

In den Normativen Verweisen werden die alten Normen, soweit möglich und sinnvoll, dem heutigen nationalen Stand angepasst und datiert. Damit soll si-

chergestellt werden, dass künftige Änderungen dieser Normen keine negativen Auswirkungen auf die Klassifizierung der Bauteile haben.

Tabelle 2 Gliederung des Inhaltes von DIN 4102-4:2012

Abschnitt	Bauprodukte	Inhalt
	-	Vorwort
	-	Einleitung
1	-	Anwendungsbereich, Grundlagen
2	-	Normative Verweise
3	-	Begriffe
4	Baustoffe	Baustoffe
5	Bauteile	Beton, Leichtbeton
6		Porenbeton
7		Stahl
8		Verbund
9		Holz
10		Mauerwerk
11	Ausbau	Trockenbau
12	Sonderbau	Sonderbauteile
		Literatur

Der Abschnitt Begriffe enthält – entsprechend der europäischen Normung – die Definition von Begriffen, die in der Norm verwendet werden und nicht allgemein in gleicher Weise verstanden werden. Dieser Abschnitt wird nach Fertigstellung der übrigen Abschnitte noch zu ergänzen sein.

Der Abschnitt Klassifizierte Betonbauteile wird für den Beton zunächst die Grundlagen der Bemessung von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen zusammenfassen. Dann werden Feuerwiderstandsklassen für statisch bestimmt gelagerte und statisch unbestimmt gelagerte Stahlbeton- und Spannbetonbalken zusammengefasst. Es folgen die Decken aus Stahlbeton- und Spannbetonplatten und aus Spannbetonhohldielen, Stahlbeton- und Spannbetondecken

und -dächer aus Fertigteilen, Stahlbeton- und Spannbeton-Rippendecken, Stahlbeton- und Spannbeton-Plattenbalkendecken sowie Ziegeldecken nach DIN 1045-100. Weiter geht es mit Stahlbeton- und Spannbeton-Balkendecken sowie entsprechenden Rippendecken mit Zwischenbauteilen. Die Feuerwiderstandsklassen von Stahlbetondecken in Verbindung mit im Beton eingebetteten Stahlträgern sowie Kappendecken bleiben ebenso erhalten wie die Stahlbetondächern und Stahlbetonstützen sowie Stahlbeton- und Spannbeton-Zugglieder. Neu werden klassifizierte Stahlbetonwände aufgenommen. Der Abschnitt schließt mit Hinweisen zum hochfestem Beton und zum Leichtbeton mit geschlossenem und haufwerksporigem Gefüge.

Der Abschnitt Klassifizierte Bauteile aus bewehrtem Porenbeton umfasst Decken- und Dachplatten sowie tragende und nichttragende Wände aus bewehrten Porenbetonplatten.

Der Abschnitt Klassifizierte Stahlbauteile enthält Konstruktionsgrundsätze sowie Feuerwiderstandsklassen von bekleideten Stahlträgern und –stützen sowie Feuerwiderstandsklassen von Stahl-Zuggliedern. Ansonsten entfallen die Nachweise für tragende Stahlbauteile, die in Eurocode 3 Teil 1-2 abgedeckt sind.

Der Abschnitt Klassifizierte Verbundbauteile enthält lediglich den Hinweis, dass keine über Eurocode 4 Teil 1-2 hinausgehende Regelungen erforderlich sind.

Der Abschnitt Klassifizierte Holzbauteile umfasst Grundlagen zur Bemessung von Holzbauteilen sowie Feuerwiderstandsklassen von Decken in Holztafelbauart, Holzbalkendecken, Dächern aus Holz und Holzwerkstoffen, speziellen Holzbauteilen und Verbindungen. Es folgen klassifizierte Wände aus Holzkonstruktionen, d. h. 2schalige Wände aus Holzwolle-Leichtbauplatten, Fachwerkwände, Wände in Holztafelbauweise und Wände aus Vollholz-Blockbalken.

Der Abschnitt Klassifizierte Wände aus Mauerwerk umfasst tragende und nichttragende Wände aus Mauerwerk. Zurzeit wird der Nationale Anhang zum Eurocode 6 Teil 1-2 erstellt, wobei es noch Unklarheiten hinsichtlich der Aufteilung der Inhalte auf Eurocode 6 und DIN 4102-4 Abschnitt 10 gibt. Nach einem Gespräch der beteiligten Interessengruppen am 13.09.2011 soll endgültig über den Inhalt der beiden Papiere entschieden werden. Über das Ergebnis wird im mündlichen Vortrag berichtet.

Im Abschnitt Trockenbau werden alle klassifizierten Wand- und Unterdeckenkonstruktionen zusammengefasst. Hierzu werden einige Ausführungsdetails ergänzt, die in der Praxis benötigt und nachgefragt werden. Außerdem werden einige neuere Prüfergebnisse berücksichtigt.

Im Abschnitt Sonderbauteile werden die Brandwände aus allen Baustoffen zusammengefasst. Damit wird der Faden der Norm von 1970 wieder aufgenommen. Die Feuerschutzabschlüsse werden gestrichen, da es keine Norm mehr gibt, in der die Konstruktion und der Bau von Feuerschutzabschlüssen beschrieben ist. Der Teil zu Bedachungen wird aufgrund neuerer Erkenntnisse

wesentlich erweitert. Ansonsten werden an den Sonderbauteilen lediglich Anpassungen vorgenommen.

Das Literaturverzeichnis wird aktualisiert.

Zukunft

DIN 4102-4:2012 wird künftig nicht mehr alle Klassifizierungen des Brandverhaltens von Bauteilen umfassen. Die Praxis muss sich darauf einstellen, die Klassifizierung als Verwendbarkeitsnachweis ggf. in verschiedenen Normen zu finden, z. B. für tragende Bauteile in den Eurocodes, für raumabschließende, nichttragende Bauteile und Sonderbauteile in DIN 4102-4. Letztere wird auch weiterhin die Sonderkonstruktionen und alten Bauweisen klassifizieren, die in den Eurocodes nicht enthalten sind, sowie wichtige konstruktive Hinweise geben, die derzeit in den Eurocodes fehlen. Sonderbauteile sind nationale Bauteile und werden daher in DIN 4102-4 genormt. Allerdings sind Brandwände aus Beton und Mauerwerk auch in den entsprechenden Eurocodes geregelt.

Es ist gängige Praxis, dass für Bestandsbauten jeweils die zum Zeitpunkt der Errichtung gültige DIN 4102-4 als Beurteilungsgrundlage herangezogen werden darf, wenn keine wesentlichen Nutzungsänderungen vorgenommen werden. Bei Nutzungsänderungen sind die heute gültigen Normen zu verwenden oder der Brandschutz ist im Einzelfall risikoorientiert nachzuweisen.

Für Bauten, die in der Übergangszeit zwischen nationaler und europäischer Normung mit nationalen Normen für die kalte Bemessung auf Basis von Teilsicherheitsbeiwerten errichtet wurden, gab es bisher keine entsprechende Norm für die Brandschutzbemessung. Hier wurde die DIN 4102-4:1994 weiter zu Grunde gelegt, wobei sich die Anwender vielfach der formalen Probleme nicht bewusst waren. In Einzelfällen wurden zusätzliche Regeln von der Bauaufsicht in der Bauregelliste veröffentlicht, z. B. für Mauerwerk. Bekanntlich hinkt die Praxis den Entwicklungen aufgrund der europäischen Normung weit hinterher, insbesondere die Planer und die Baustellen. Daher wird es ohne ab Juli 2012 kaum möglich sein, nur noch nach den Eurocodes zu bemessen. So müssen Großbauten mit einem Planungsvorlauf von bis zu 5 Jahren in dem Bemessungssystem gebaut werden, mit dem sie entworfen wurden. Denn es ist wirtschaftlich nicht vertretbar, mitten in einem Bauvorhaben auf neue Normen umzustellen.

ZUSAMMENFASSUNG

DIN 4102-4 ist ein umfangreiches, über Jahrzehnte entstandenes Handbuch klassifizierter Baustoffe und Bauteile auf der Grundlage langjähriger Prüferfahrung, das in der Praxis seinen festen Platz hat und ständig gebraucht wird.

Aufgrund der bauaufsichtlichen Einführung der Brandschutzteile der Eurocodes, die sowohl tabellarische als auch rechnerische Nachweise für das Brandverhal-

ten insbesondere von tragenden Bauteilen enthalten, ist eine Reduzierung der DIN 4102-4 auf die nicht in den Eurocodes abgedeckten Konstruktionen erforderlich. Durch neue Bauproduktnormen hat sich teilweise die Grundlage der Klassifizierungen geändert, sodass diese nicht mehr gültig sind oder Anwendungsgrenzen eingeführt werden müssen. Andererseits fehlen in den Eurocodes zum Teil Konstruktionsdetails, sodass auf die Regelungen in DIN 4102-4 zurückgegriffen werden muss.

Der Brandschutznachweis wird zukünftig nicht mehr in einem Papier zu finden sein, sondern über diverse Papiere verteilt. Dieser Nachteil soll langfristig durch ein gemeinsames Praxis-Handbuch aufgefangen werden.

LITERATUR

[1] DIN 4102-4:1994-03 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile;

[2] DIN 4102-4/A1:2004-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A1

[3] DIN 4102-22:2004-11 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten

[4] E DIN 4102-4/A2:2004-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile; Änderung A2, nicht veröffentlicht

[5] E DIN 4102-22/A1:2004-11 : Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen- Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten, Änderungen A1, nicht veröffentlicht

[6] Hosser, D. (Hrsg.): Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes, Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6, (Beuth-Kommentare), 1. Auflage. Berlin: Beuth Verlag, 2000

[7] Bauen in Europa: Brandschutzbemessung; Eurocodes 1 bis 6 und Eurocode 9, 1. Auflage. Berlin: Beuth Verlag, 2000

[8] Hahn, Chr.: Mauerwerk nach DIN 4102-4, Mauerwerk-Kalender ff.

[9] Hahn, Chr.: Mauerwerk nach Eurocode 6-1-2, Mauerwerk-Kalender ff

[10] Hahn, Chr.: DIN 4102-4 – Kommentar – z. Zt. in Arbeit

SITZUNG 3

BRANDSCHUTZKONZEPTE

FÜR SONDERBAUTEN

Sitzungsleitung: H.-J. Gressmann, Abu Dhabi

ALTERNATIVER LÖSUNGSVORSCHLAG FÜR DIE RÜCKHALTUNG WASSERGEFÄHRDENDER STOFFE IN LOGISTIKANLAGEN IM EINKLANG MIT DEM WASSERHAUSHALTSGESETZ

Stefan Ehmann
WTM Engineers GmbH, Hamburg

EINLEITUNG

Auf Grundlage des Besorgnisgrundsatzes, geregelt in § 62 Wasserhaushaltsgesetz - WHG [1] i.V.m. den Festlegungen für Hamburg gemäß der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen – VAwS [2], ist bei der Lagerung wassergefährdender Stoffe zum Schutz der Grund- und Oberflächengewässer eine Rückhaltung von verunreinigtem Löschwasser vorzunehmen.

Bei Einhaltung der Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe – Löschwasserrückhalterichtlinie - LöLüRL [3] gilt der Besorgnisgrundsatz in Bezug auf die Auffangmengen als erfüllt. In der Summe wirkend mit ergänzenden Vorschriften und Richtlinien wird der Besorgnisgrundsatz in Gesamtheit erfüllt.

Die LöRüRL wurde 1992 als Konsequenz aus dem Großbrand beim Schweizer Chemieunternehmen Sandoz (Basel, 1. November 1986, siehe Bild 1) als Muster-Richtlinie erstellt und hat seither zur Verhinderung ähnlicher Schadenfälle beigetragen und sich bewährt.

Im Rahmen der LöRüRL wird eine Begrenzung der Lagermenge (in Abhängigkeit zur Wassergefährdungsklasse) unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen wie brandschutztechnische Infrastruktur (→ Einstufung der Sicherheitskategorie nach Art der Feuerwehr, Vorhandensein einer Brandmeldeanlage oder automatische Löschanlage) und Art des Lagerns (im Freien, im Gebäude, Art des Gebindes, Lagerguthöhe, Lagerdichte) vorgenommen. Die sich ergebenden zulässigen Lagerabschnittsflächen werden üblicherweise innerhalb von Gebäuden durch den Einbau von F 90-Wänden oder im Außenbereich durch die Berücksichtigung von Abständen begrenzt.

Die Restriktion der Lagerflächen und damit verbundener zusätzlicher Einbau von Wänden führen zu einer Einschränkung der Gebäudenutzbarkeit. Hiervon sind insbesondere Wirtschaftsbereiche betroffen, die der flexiblen Nutzung großer, offener Flächen bedürfen. Das hier vorgestellte Beispiel aus dem Bereich der Logistik stellt einen alternativen Lösungsansatz zur Erreichung des Schutzziels einer wirksamen Löschwasserrückhaltung in einem besonderen Einzelfall dar.

Bild 1 Welt-Online 08.07.2011 – Brand bei Sandoz

AUFGABENSTELLUNG

Die Aufgabenstellung durch den Bauherrn lautete, ein Rückhaltesystem zu entwerfen, das die flexible Nutzung einer neuen, aber bereits bestehenden Logistikhalle zur Lagerung von Gütern, im Wesentlichen wassergefährdende Stoffe, ermöglicht (Bilder 2 bis 4).

Bild 2 Geplante Regal-Lagerung im Hallenbereich

Bild 3 Geplante Lagerung von Gütern im Hallenbereich

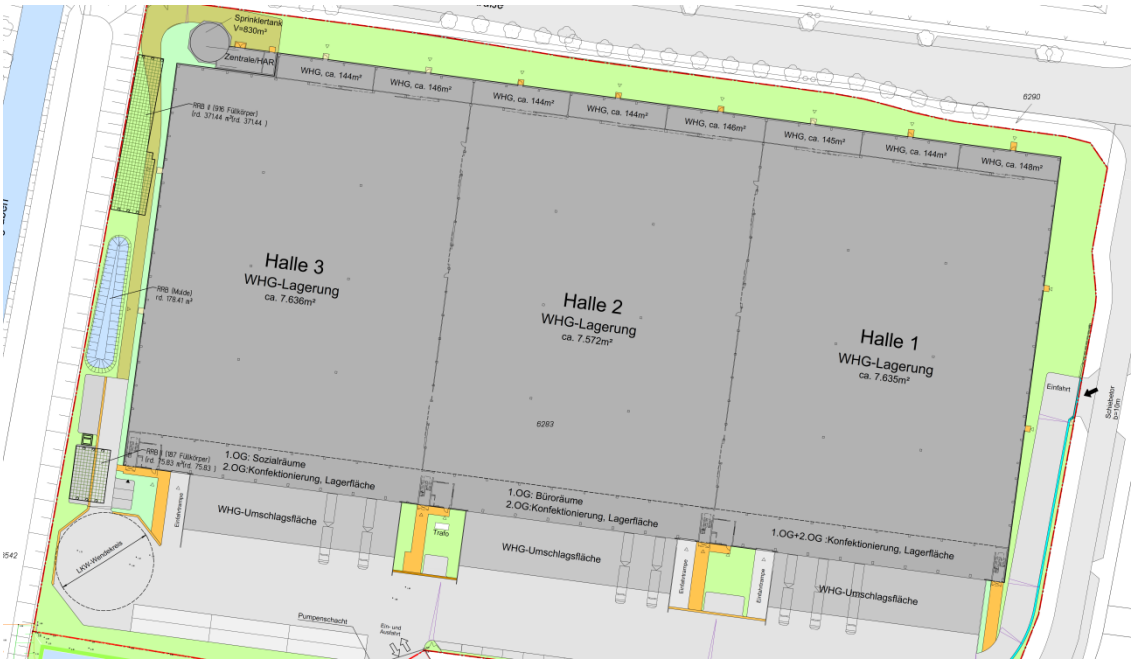


Bild 4 Lageplan des Logistikzentrums

Dabei waren folgende Randbedingungen zu berücksichtigen:

- Erdgeschossiges Logistikzentrum mit Maximalabmessungen von etwa 225 m x 110 m und einer Grundfläche von ca. 24.500 m², auf der wassergefährdende Stoffe (Stoffe der Wassergefährdungsklassen 1-3, unter anderem Schmierstoffe bis WGK 2) gelagert werden sollen;

- Stahltragkonstruktion mit Hallenhöhen von ca. 12 m, bestehend aus drei untereinander brandschutztechnisch separierten Hallenbereichen (Brandabschnitte) von je ca. 7.500 m² mit vorgelagerten Umschlag- bzw. Verladebereichen;
- flächendeckende, automatische Wasserlöschanlage nach VDS CEA 4001 [5] mit Decken- und Regalsprinklerung.

UNTERSUCHUNG DER LÖSUNGSMÖGLICHKEITEN

Ausbildung nach LöRüRL

Bei einer stringenten Ausbildung nach LöRüRL sind nach Tabelle 1 die zulässigen Lagerflächen einzuhalten. Unter Berücksichtigung der Angaben des Bauherrn zum Umfang der geplanten Lagerung mit wassergefährdenden Stoffen und der jeweiligen Klassen wurde im ersten Schritt eine Unterteilung der Hallen vorgenommen. Aufgrund der geringen Lagerdichte konnte der Erhöhungsfaktor von 1,3 bei Berücksichtigung der Sicherheitskategorie K4 für die Lagerung von WGK1- und WGK3-Gütern in Ansatz gebracht werden.

Tabelle 1 Tabelle 1 nach LöRüRL [3]

Tabelle 1 Zulässige Lagermenge und zulässige Fläche von Lagerabschnitten

1	2	3	4
Sicherheitskategorie	Zulässige Lagermenge sowie zulässige Fläche des Lagerabschnitts bei Lagerdichten von 0,7 bis 1,2 t/ m² für		
	WGK 1 in t bzw. m²	WGK 2 in t bzw. m²	WGK 3 in t bzw. m²
K 1	200	50	50
K 2	800	400	200
K 3	1200	800	600
K 3 (2 Staffeln)	1600	1000	800
K 3 (Zug)	2000	1200	1000
K 4	4000	3000	2400
Bei einer Lagerdichte unter 0,7 t/m² sind die angegebenen Werte für die Fläche mit dem Faktor 1,3 zu multiplizieren; bei einer Lagerdichte von mehr als 1,2 t/m² sind die angegebenen Werte für die Fläche mit dem Faktor 0,5 zu multiplizieren.			

Hierbei wurden die bereits durch Brandwände in die Hallen 1, 2 und 3 gegliederten Bereiche durch drei zusätzliche F 90-Wände in Lagerabschnitte aufgeteilt (Bild 5). Im rückwärtigen Teil der Hallen befinden sich darüber hinaus planmäßig kleinere Bereiche (sog. Kompartments – Hallen 1.3 bis 1.5, 2.3 bis 2.5 sowie 3.3 und 3.4) mit je ca. 145 m². Die mit den Ziffern 1.6, 2.6 und 3.5 versehenen Flächen kennzeichnen die Umschlagsflächen außerhalb der Hallen.

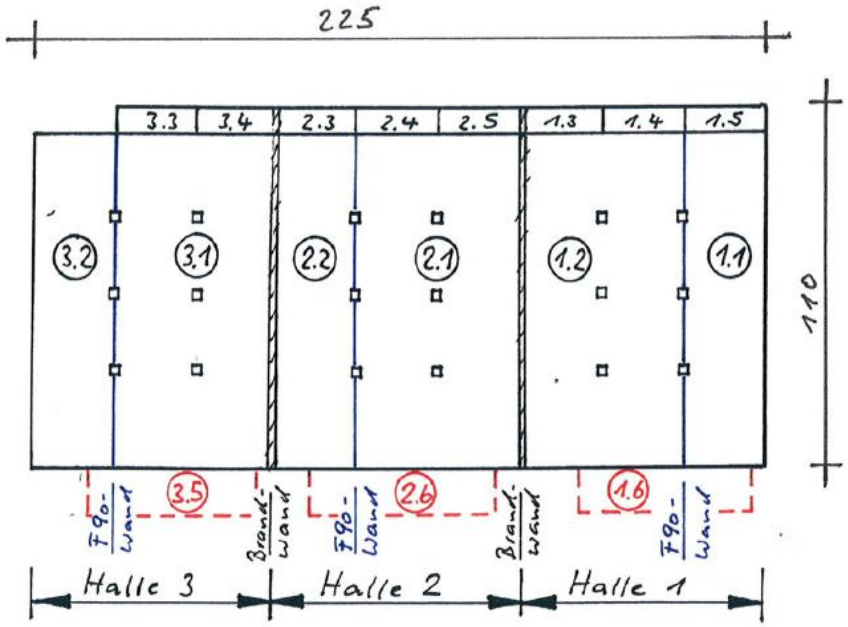


Bild 5 Hallenabschnittsflächen nach LöRüRL

Nach Tabelle 2 kommt es zu geringfügigen Überschreitungen der zulässigen Lagerabschnittsgrößen in 1.1, 2.2 und 3.2 um ca. 6 %. Dies wurde unter Berücksichtigung der unmittelbaren Nähe zur benachbarten Feuerwache, welche über die automatische Brandmeldeanlage frühzeitig alarmiert wird, als unbedenklich eingestuft.

Tabelle 2 Nachweis der Hallenflächen in Abhängigkeit von der Wasserfährdungsklasse

Halle	Abschnitt	$A_{vorhanden}$	WGK	Lagerdichte	$A_{zulässig}$
1	1.1	2.545 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
1	1.2	5.090 m²	1	0,69 to/m²	5.200 m²
1	1.3	143 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
1	1.4	145 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
1	1.5	148 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
2	2.1	5.048 m²	1	0,69 to/m²	5.200 m²
2	2.2	2.524 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
2	2.3	143 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
2	2.4	145 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
2	2.5	146 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
3	3.1	5.091 m²	1	0,69 to/m²	5.200 m²
3	3.2	2.545 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
3	3.3	143 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
3	3.4	146 m²	3	1,2 to/m²	2.400 m²
	Σ =	**24.002 m²**			

Eine Unterteilung durch F 90-Wände mit Zuordnung der jeweiligen Wassergefährdungsklassen würde eine beträchtliche Einschränkung der Nutzbarkeit der Halle für den Bauherrn bedeuten. Zudem sind bei der baulichen Ausbildung der F 90-Wände, insbesondere in Trockenbauweise unter Einhaltung der Zulassung, der bauliche Anschluss und die Aussteifung gerade bei höheren Hallen mit Stahltragkonstruktionen äußerst aufwendig (hier Hallenhöhe ca. 12 m). Die Anordnung einer alternativen Tragkonstruktion aus Stahlbeton erleichtert die Einbausituation, beinhaltet aber gleichzeitig eine Einschränkung in Bezug auf mögliche Ausführungsvarianten bei der Gebäudeplanung und erfordert ggf. zusätzliche Gründungselemente. Im Bestreben nach mehr Flexibilität wurde daher nach einer Alternative gesucht.

Abgleich mit Rahmenbedingungen für Lagerungen im Hamburger Hafen

Unter anderem wurde die Lagerung von wassergefährdenden Gütern im Bereich des Hamburger Hafens zum Vergleich herangezogen. Grundlage hierfür bilden die Bestimmungen und Anforderungen des Anforderungskonzeptes Hafenumschlagbetriebe [4]. Hiernach können gemäß Anhang II für Lagerungen im Freien bei Unterteilung durch Freiflächen Brandabschnittgrößen bis 2.400 m² gebildet werden (z. B. bei 2.400 m² bis zu 250 m³ Löschwasserrückhaltevolumen bei vorhandener automatischer Löschanlage bzw. 300 m³ ohne Löschanlage). Die Bemessung des erforderlichen Löschwasserrückhaltevolumens erfolgt hierbei pauschal ohne Unterscheidung der Wassergefährdungsklassen.

ALTERNATIVER LÖSUNGSVORSCHLAG

Vor dem Hintergrund der Außenlagerung im Hamburger Hafen und zur Realisierung der Wünsche des Bauherrn wurde der nachfolgend beschriebene Ansatz für die Auffangeinrichtungen entwickelt (vgl. Bild 6). Dabei war allen Beteiligten klar, dass es sich bei dieser Vorgehensweise um eine Sonderlösung handelte, die besonderer Maßstäbe und hohen Abstimmungsbedarf aller Verantwortlichen bedurfte, die sich auch auf die zukünftige Betreiberverantwortung erstreckt.

- Hallenbereiche: Die Ausbildung einer Löschwasserrückhaltung erfolgt mittels Wannenausbildung und Gefälle in Richtung Umschlagflächen. Eine gleichmäßige Wasserverteilung zwischen den Hallen ist durch dükerartige Rohrverbindungen gewährleistet (Bild 7).
- Umschlagflächen: Im Außenraum werden die Bereiche der Umschlagflächen (Verladeflächen) mit weiteren, mediendichten Auffangwannen mit Gefälle zu den Rinnen und Abläufen als Tiefhöhe ausgebildet.
- Zentrales Auffangbecken: Südlich der Hallen ergänzt ein zusätzliches Löschwasserauffangbecken das Rückhaltevolumen (Bilder 8 bis 10). Über Rohrverbindungen ist das Becken mit den Wannenausbildungen von Hallen- und Umschlagbereich verbunden.

- Einleitung: Über redundante Pumpenanlagen wird das verbleibende Löschwasser nach abgeschlossenem Einstau (6 bis 9 cm Höhe) der vorgenannten Rückhaltebereiche aus den Auffangbereichen in das zentrale Becken gepumpt.
- Schutz der Grund- und Oberflächengewässer: Dem Entweichen von Löschwasser in das angrenzende Gewässer oder das Kanalnetz wurde durch die Installation von automatischen Schiebern, ausgelöst über die Brandmelde- bzw. Löschanlage sowie durch zusätzliche Sicherung über eine Handsteuerung, begegnet.
- Lagergüter: An den Betreiber werden hinsichtlich der Art der Lagergüter und der Lagermengen Anforderungen gestellt, die dieser mittels modernster EDV-Technik steuert.

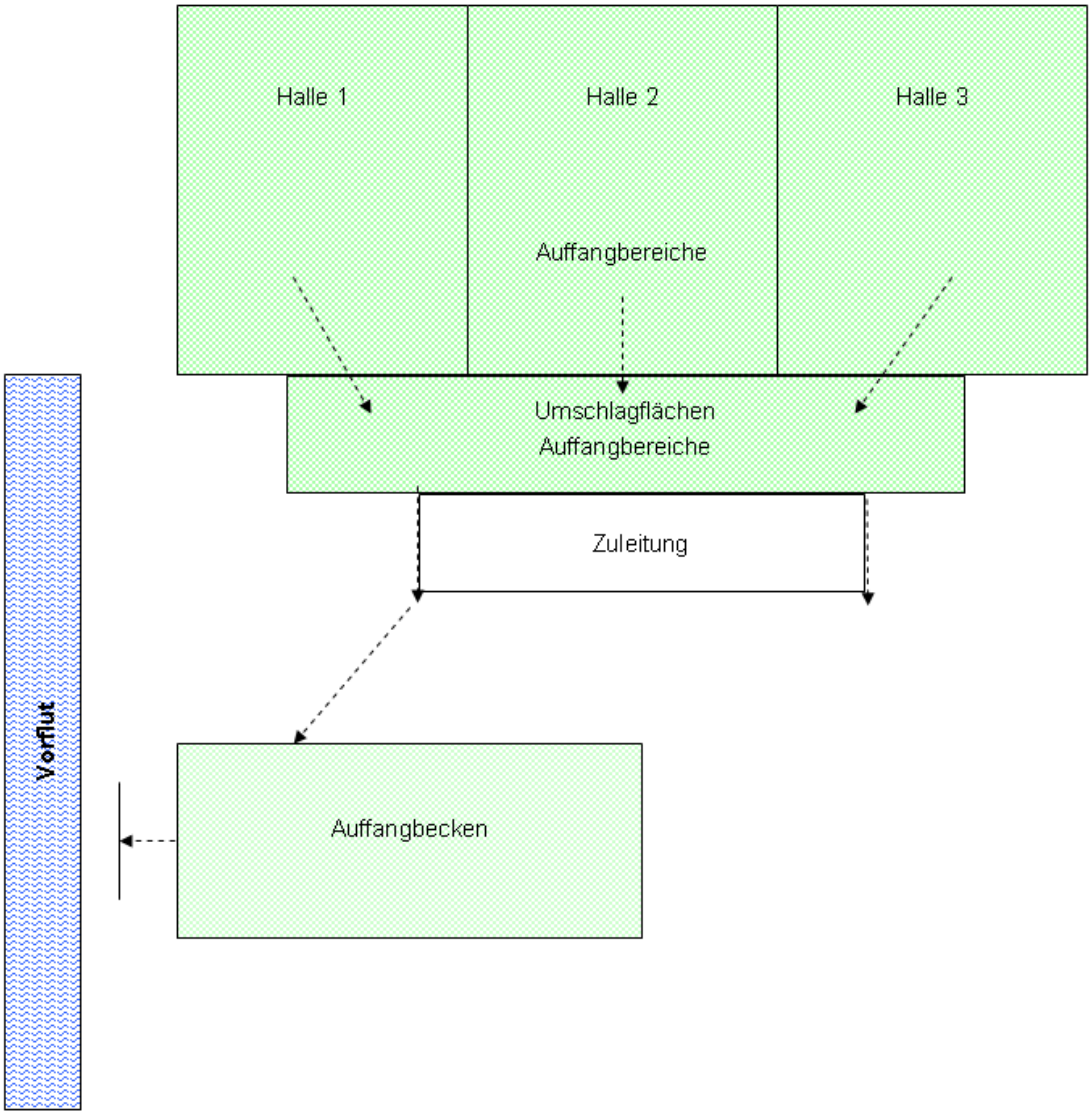


Bild 6 *Aufbau und Bestandteile der Auffangeinrichtungen für das Löschwasser (Schema)*

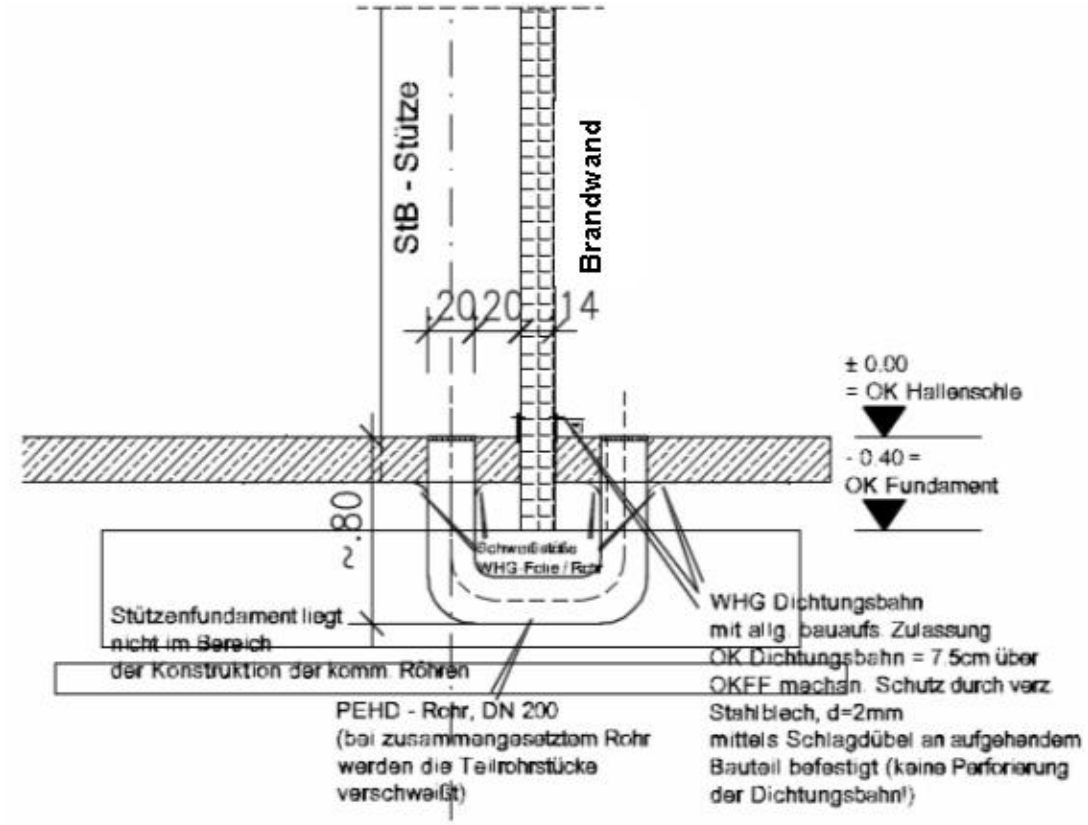


Bild 7 Wannenausbildung der Halle mit Durchleitung unter Brandwand (Düker)

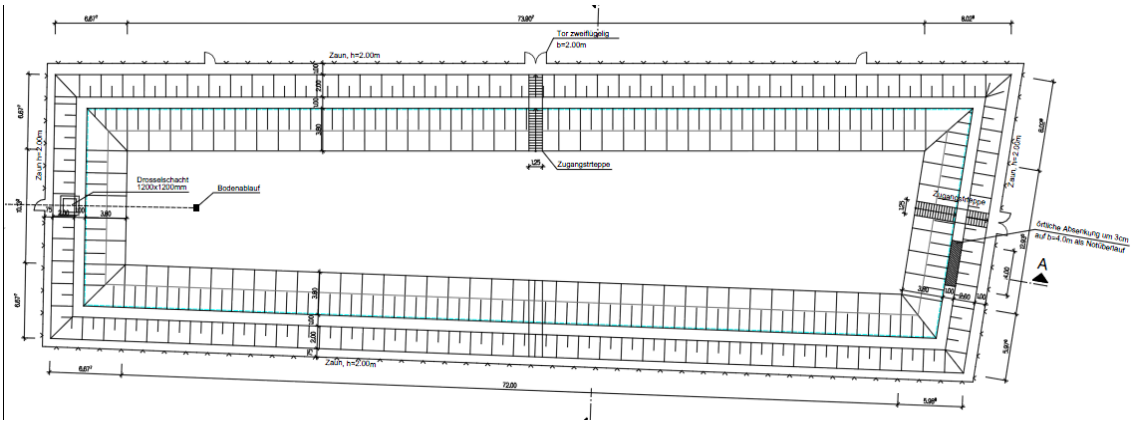


Bild 8 Abwicklung Löschwasserrückhaltebecken

Bild 9 *Logistikhalle mit eingezäuntem Rückhaltebecken, Böschung und Wartungstreppe*

Bild 10 *Abdichtung des Rückhaltebeckens mit hochfesten Polyethylen-Abdichtungsbahnen* $d \geq 3$ *mm*

Die Auffangeinrichtungen und Wannenausbildungen wurden entsprechend der Beanspruchung nach den Bestimmungen der VAwS und den nachrangigen technischen Regelwerken für wassergefährdende Stoffe - TRwS [6] – konstruiert. Die Abdichtungen wurden mit hochfesten Polyethylen-Dichtungsbahnen (d ≥ 3 mm) ausgebildet.

Beim Auffangbecken selbst wurden im Bereich des Beckenbodens unterhalb der Abdichtung eine Sandschicht sowie eine kapillarbrechende Schicht angeordnet (Bild 11). Im Böschungsbereich der Abdichtung wurden Schutz- und Drainagematten ergänzt. Für die ca. 3,20 m hohe Böschung selbst fanden eine Anreicherung des Sandgemisches mit 4-6 Massenprozent Zement und die Anordnung einer 60 cm starken Betonstütze Verwendung, um wegen der beschränkten Grundstücksgröße eine maximale Rückhaltung zu erzielen.

Bei der Planung war der maximale Grundwasserstand als maßgebliche Randbedingung zu berücksichtigen. Vor diesem Hintergrund wurden die Baugrundbewegungen und Böschungswinkel mit dem Ziel des maximal möglichen Rückhaltevolumens optimiert.

Zur Ableitung des Niederschlagswassers wurde ein Bodenablauf vorgesehen, welcher das Wasser über einen nachgeschalteten Drosselschacht der Vorflut zuführt (Bild 12).

Um sicherzustellen, dass kein verunreinigtes Löschwasser in den Graben gelangt, verschließen automatische, notstromgepufferte Schieber bei Brandalarm die Bodenöffnung (Bild 13). Als weitere Sicherungsmaßnahme wurde eine manuelle Handauslösung installiert.

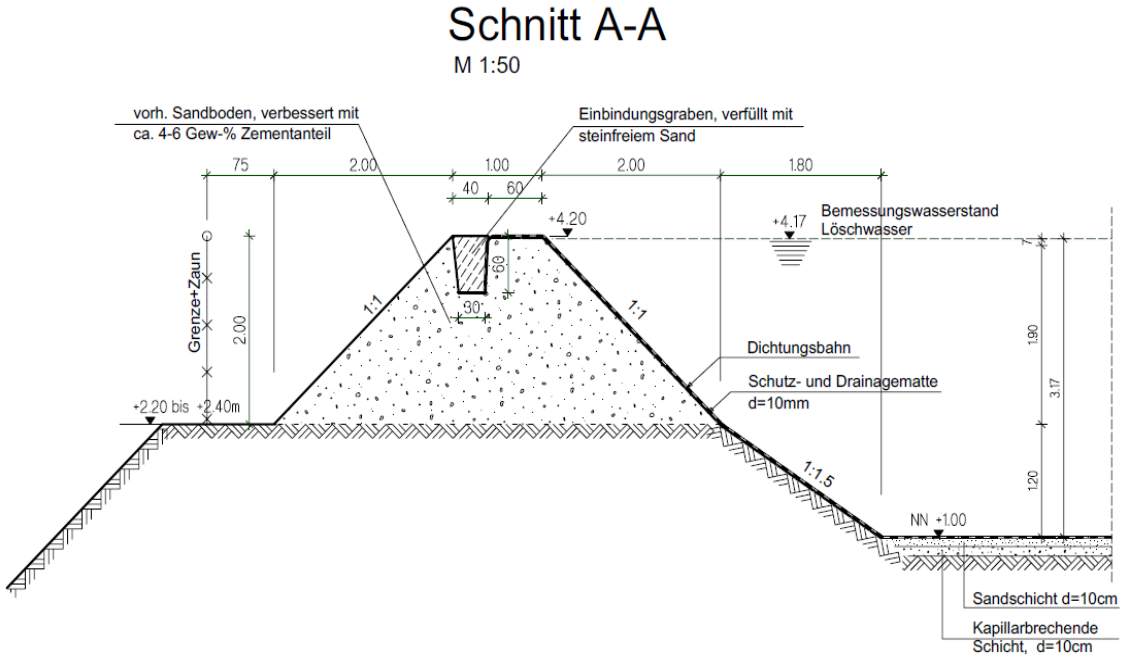


Bild 11 Auffangbecken mit Böschungsdetail

Bild 12 Bodenablauf zum Ablassen des Regenwassers aus dem Auffangbecken

Bild 13 Schacht mit elektromotorischem Schieber und manueller Handauslösung

NACHWEIS DER GLEICHEN SICHERHEIT

Wesentlicher Bestandteil der Planung zur alternativen Ausführungsvariante für diesen Einzelfall war ein extern von der Bauaufsicht in Auftrag gegebenes Gutachten, das die Gleichwertigkeit der gewählten Lösung zu den Bestimmungen der LöRüRL [3] bestätigt und Bestandteil des Umweltschutzberichtes zur Baugenehmigung ist.

Auf Basis dieses Umweltschutzberichtes wurden folgende Annahmen getroffen:

Die Berechnung des erforderlichen Rückhaltevolumens erfolgte mit dem Ansatz von 0,75 m³ Löschwasserbeaufschlagung je m² Lagerfläche für wassergefährdende Stoffe gemäß einer Veröffentlichung der vfdb [7] wie folgt:

$V_{\text{Löschwasser}}$	7.635 m² x 0,75 m³/m²	=	5.726 m²
$V_{\text{WHG Produkt}}$	6.650 m³ x 0,02[1)]	=	133 m³
$V_{\text{Verdrängung der Behälter/Gebinde}}$		=	100 m³
	∑	=	5.959 m³

[1)] 2% der wassergefährdenden Stoffe als austretende Menge im Brandfall.

Die Berechnung des erforderlichen Rückhaltevolumens von 5.959 m³ basiert auf Erfahrungen und Untersuchungen von Feuerwehren hinsichtlich der bei Löscheinsätzen anfallenden Löschwassermengen, die in [7] ausgewertet wurden. Für die Ableitung der verwendeten Bemessungsansätze wird dabei angenommen, dass 50 % des eingesetzten Löschwassers verdampfen.

Bei der Abschätzung des tatsächlich anfallenden Löschwassers auf Grundlage der beschriebenen Szenarien wurde in dem von der Bauaufsicht in Auftrag gegebenem Gutachten im Gegensatz hierzu auf die Berücksichtigung einer Verdampfungsrate aus folgenden Gründen bewusst verzichtet:

- Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors, da die jeweilige Vorgehensweise bei einem konkreten Löscheinsatz sehr stark vom Einzelfall abhängt und die Abschätzung aufgrund dessen eine gewisse Unsicherheit beinhaltet;
- Stark unterschiedliche Verdampfungsraten, je nach Aufbringen des Löschwassers, ob als Vollstrahl oder als Sprühstrahl.

Es ist sicherlich davon auszugehen, dass beim Löscheinsatz ein Teil des Löschwassers verdampft. Während die Einschätzung der anfallenden Löschwassermengen auf plausiblen und konkreten Szenarien basiert, die auf den Auslegungsdaten und der Verfügbarkeit von Löschwasser aus dem öffentlichen Netz gegründet sind, ist der Umfang der Löschwasserverdampfung jedoch nicht exakt vorhersehbar. Durch die Nichtberücksichtigung einer Verdampfung von Löschwasser wird eine nach oben hin abdeckende und Abschätzung erzielt.

Die aufnehmbaren Löschwassermengen wurden im Einzelnen wie nachfolgend geplant:

$V_{\text{Wannenausbildung Hallen 1-3}}$	=	1.614 m²
$V_{\text{LKW-Verlade-/Umschlagflächen}}$	=	207 m²
$V_{\text{Löschwasserauffangbecken}}$	=	3.830 m²
	∑ =	5.747 m³

Für die verbleibende Differenzmenge an Löschwasser im Umfang von 212 m³ (= ca. 3,5 % der errechneten Rückhaltemenge) ist für den Brandfall die Aufnahme und Entsorgung aus dem Auffangbecken durch ein Fachunternehmen gewährleitstet durch eine entsprechende vertragliche Verpflichtung mit einer Reaktionszeit von höchstens 45 Minuten nach Brandmeldung. Die Bestimmungen der VAwS sind hierbei zu beachten.

Zur Überprüfung des berechneten Ansatzes zur Löschwasserrückhaltung erfolgte eine Ermittlung der zu erwartende Löschwassermengen unter Beachtung verschiedener Szenarien:

a) Überprüfung zur Betrachtung der zur Verfügung stehenden Löschwassermengen und -quellen:

   - ESFR-Sprinkleranlage als Decken- und Regalsprinklerung mit einer tatsächlichen Leistung von bis zu 900 m³/h.
   - Für Löschwasser stehen zudem Hydranten (im Umkreis von 300 m zum Objekt) mit einer Leistung von 96 m³/h zur Verfügung.

   Der daraus zu erwartende Löschwasseranfall kann demnach mit dem Rückhaltevolumen von 5.747 m² für 5 Stunden und 46 Minuten zurückgehalten werden.

   Die Sprinkleranlage löst automatisch aus. Nach einer ersten Lagebeurteilung schaltet die Feuerwehr die Anlage ab und führt den weiteren Löschangriff ohne Sprinkleranlage durch.

b) Einsatztaktik der Feuerwehr:

   In ca. 30 bis 60 Minuten kann aus dem öffentlichen Leitungsnetz über Anschlüsse an Hauptversorgungsleitungen eine Löschwasserversorgung von ca. 10.000 bis 20.000 l/m (600-1.200 m³/h) aus einer Entfernung von bis zu 2 km aufgebaut werden. Im Mittel steht dann 900 m³/h Löschwasser zur Verfügung.

   900 m³/h Löschwasser reichen z. B. für die Versorgung von 5 Wenderohren à 3.000 l/min (gesamt: 15.000 l/min = 900 m³/h). Der Einsatz von 5 Wenderohren stellt eine mögliche Vorgehensweise bei einem unterstellten Großbrand, der deutlich über den Wirkbereich der Sprinkleranlage hinausgeht,

innerhalb eines großen Brandabschnitts dar. Eine derartige Vorgehensweise ist vorstellbar, um den Brand auf den betroffenen Brandabschnitt zu begrenzen und die anderen Brandabschnitte zu sichern. Dieses Szenario kann etwa eintreten, wenn der Löschvorgang durch die Sprinkleranlage nicht in dem Umfang erfolgreich gewesen ist, dass der Brand bis zum Beginn des Feuerwehreinsatzes auf einen Bereich begrenzt werden konnte.

Für die Abschätzung der anfallenden Löschwassermenge wird angenommen, dass die Feuerwehr die weiteren Löschmaßnahmen mit einer Löschwasserleistung von 900 m³/h durchführt (siehe Ausführungen oben).

Bei diesem Löschwasseranfall wäre das geplante Rückhaltevolumen in 6 Stunden und 23 Minuten erschöpft.

Ergebnis: Sowohl unter Beachtung des pauschalen Berechnungsansatzes zum erforderlichen Löschwasservolumen nach vfdb als auch unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Löschwasserquellen oder der Einsatztaktik der Feuerwehr wurde die Dimensionierung einer ausreichenden Löschwasserrückhaltung nachgewiesen. Verdampfendes Löschwasser wurde hierbei wegen der nicht exakt bestimmbaren Verdampfungsrate nicht angesetzt. Die Einhaltung der Schutzziele des Wasserhaushaltsgesetzes – der Schutz der Grund- und Oberflächengewässer vor verunreinigtem Löschwasser – wurde mit der hier als Alternativlösung dargestellten, globalen Ausbildung von Rückhaltevolumina gleichfalls sichergestellt.

VARIANTENVERGLEICH

Der Vergleich der notwendigen baulichen und finanziellen Aufwendungen für eine Ausbildung der Löschwasserrückhaltung nach den Festlegungen der LöRüRL mit Unterteilungen durch F90-Wände und der alternativen, schutzzielorientierten Anordnung eines zentralen Löschwasserrückhaltebeckens war als Entscheidungsvorlage für die Bauherrn erforderlich.

Neben der Erstellung von drei, je ca. 100 m langen F 90-Wänden als Trockenbaukonstruktion mit Betonsockel sind bei der Standardlösung nach LöRüRL für diesen Fall die jeweiligen Anschlusspunkte auszubilden, Aussteifungen einzubauen und für den Betrieb notwendige Öffnungen mit T30-Toren zu verschließen. Ebenso sind die Durchführungen zu sichern, ein Austausch der Wärmedämmung im Bereich des Dachanschlusses vorzunehmen und technische Einrichtungen wie Sprinklernetz sowie Brandmeldeanlage an die Wände anzupassen.

Für die Alternativlösung ist ein Auffangbecken mit Pumpen und Kanalnetz zur Einleitung des Löschwassers zu installieren. Zu ergänzen ist weiterhin eine Ableitung für Regenwasser und der Einbau von Drosseln, Schiebern und Schächten.

Tabelle 3 Kostenvergleich

Realisierungs-Faktoren	3 x F90-Wände mit Anschlüssen, Aussteifung, Türen, Anpassung Sprinklerung + BMA etc.	Kanalnetz mit Beckenausbildung (Alternativlösung)
Baukosten	650.000,-- €	515.000,-- €
Bauzeit	5 Monate im lfd. Betrieb	3 Monate im lfd. Betrieb

Wie die Gegenüberstellung in Tabelle 3 zeigt, liegen im direkten Vergleich die Baukosten für die Ausbildung des Auffangbeckens mit ca. 515.000,-- € unter den Kosten der konventionellen Ausbildung nach LöRüRL.

Zu berücksichtigen sind hier allerdings auch die Kosten für das Gelände, auf dem das Auffangbecken installiert wird. In dieser Diskussion muss auch der Eintrag der Grunddienstbarkeit für das zusätzliche Flurstück Berücksichtigung finden. Ebenso ist zu beachten, dass die Ausrüstung der Logistikanlage entsprechend der LöRüRL im Zuge der Erstellung und/oder bei Verwendung von feuerbeständigen Bauteilen auch im Dachbereich geringere Kosten verursacht hätte.

Mit 5 Monaten Bauzeit im laufenden Betrieb und aufgrund der Aussteifungs- und Anschlussproblematik, stellt die Ausbildung von F90-Wänden gegenüber der Kanal- und Beckenausbildung gerade auch im Bestand den größeren baulichen Aufwand bei wesentlichen Eingriffen in die betrieblichen Abläufe dar. Gegebenenfalls ist sogar eine Verstärkung der Gründung zu berücksichtigen.

Ergebnis: Unter Beachtung des geringeren baulichen Aufwandes und des damit verbundenem Kostenvorteils sowie insbesondere der, aufgrund des Verzichts der Anordnung von zusätzlichen F 90-Wänden, gewonnenen Flexibilität und somit wesentlich besseren Nutzbarkeit der Hallen im Sinne des Bauherrn, wurde im Ergebnis die Ausführung eines Becken zur Auffangung des Löschwassers beschlossen. Für den Betreiber stellt jede Wand in der Anlage ein Hindernis für die geplante Nutzung und Regalierung dar. Der Anlagenbetreiber hat neben den Investitionskosten für die Löschwasserrückhaltemaßnahmen auch den Verlust an Regalfläche und die höheren Betriebskosten zu analysieren.

Da die Errichtung eines Löschwasserrückhaltebeckens keine standardmäßige Lösung nach WHG bzw. LöRüRL darstellt, ist der damit einhergehende Planungs- und Zeitaufwand nicht zu unterschätzen. Vielmehr kann der Zeitraum dafür im Vorwege nicht benannt werden, so dass sich dementsprechende Risikopotentiale ergeben.

ZUSAMMENFASSUNG

Ein Hamburger Logistiker plant die Lagerung von wassergefährdenden Stoffen in einer modernen, vielseitig zu nutzenden Lagerhalle. Bei der Planung wird neben der herkömmlichen Ausbildung nach LöRüRL auch eine alternative Ausbildung als pauschale Löschwasserrückhaltung ohne Unterscheidung der Wassergefährdungsklassen in einem zentralen Auffangbecken untersucht.

Die Kosten und der bauliche Aufwand der im Beitrag beschriebenen Lösung einer Löschwasserrückhaltung gegenüber einer konservativen Ausbildung mit Unterteilung durch F 90-Wände, sind merklich geringer. Wesentlich aber ist die Bedeutung der nach LöRüRL in den Hallen anzuordnenden, zusätzlichen Wände für den Betreiber des Gebäudes.

Mit der gewählten Lösung ist es möglich, die vom Kunden gewünschte Flexibilität bei der Hallennutzung zu realisieren. Zudem bedeutet dies auch einen Zugewinn an Variabilität für die bauliche Ausführung der Lagerhalle, da Aussteifungs- und Anschlussproblematiken für F 90-Trockenbauwände (insbesondere zulassungsbedingt) nicht zu beachten sind.

Zu berücksichtigen ist aber auch der höhere Zeitaufwand, der für die Abstimmung und die Planung dieser Sonderlösung aufzuwenden war – hier ca. 1,5 Jahre. In diesem speziellen Fall profitieren alle Beteiligten von dem nahe gelegenen, verfügbaren Grundstück.

LITERATUR

[1] Wasserhaushaltsgesetz (WHG vom 31.07.2009, zuletzt geändert am 11.08.2010)

[2] Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (VAwS Hamburg vom 19.05.1998, zuletzt geändert am 01.09.2005)

[3] Richtlinie zur Bemessung von Löschwasser-Rückhalteanlagen beim Lagern wassergefährdender Stoffe – Löschwasserrückhalterichtlinie (LöRüRL Hamburg, Fassung August 1992)

[4] Anforderungen an das Lagern, Bereitstellen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe in Verpackungen, ortsbeweglichen Behältern und Containern im Geltungsbereich des Hafenentwicklungsgesetzes – Anforderungskonzept Hafenumschlagsbetriebe (Stand März 1998)

[5] VDS CEA 4001: Richtlinie über Planung und Einbau von Sprinkleranlagen von 2010-11 (04)

[6] Technische Regel wassergefährdender Stoffe – Ausführung von Dichtflächen (TRwS von Oktober 2005)

[7] vfdb-Zeitschrift 1/90, K.P. Günter, W. Thon, M. Bockwoldt, Löschwasserrückhaltung als Beitrag zum Umweltschutz

BRANDSCHUTZKONZEPT FÜR DIE ERWEITERUNG VON TERMINAL 1 DES FLUGHAFENS FRANKFURT/M.

Jochen Zehfuß
hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Hamburg
Holger Hofmann
Fraport AG, Frankfurt am Main

EINLEITUNG

Der Flughafen Frankfurt/Main, betrieben von der FRAPORT AG, spielt im internationalen Luftverkehr als einer der wichtigsten Flughäfen der Welt eine herausragende Rolle. Den Flughafen Frankfurt/Main nutzen zurzeit 54 Millionen Fluggäste im Jahr, für das Jahr 2020 werden bis zu 88 Millionen Fluggäste prognostiziert. Das enorme Wachstum erfordert eine ständige Erweiterung und einen Ausbau des Flughafens. In dem hier vorgestellten Ausbauprojekt wird das Terminal 1 des Flughafens um einen ca. 800 m langen Flugsteig erweitert, der mit einem Wurzelbauwerk an den Bestand anschließt. Das Projekt stellt für die Brandschutzplanung eine besondere Herausforderung dar, da keine flughafenspezifischen Sonderbauvorschriften vorliegen, es sich um einen ausgedehnten Gebäudeteil handelt, eine komplexe und vielfältige Nutzung als Verkehrsbauwerk, Verkaufs- und Versammlungsnutzung sowie sehr große Technikbereiche vorliegen und Schnittstellen zum Bestand unter Beibehaltung des Betriebs berücksichtigt werden müssen. Weiterhin ist die Abtrennung zwischen der sogenannten Land- und Luftseite sowie dem Schengen und Non-Schengenbereich zu berücksichtigen. Dieser brandschutztechnischen Herausforderung kann nur mit einem schutzzielorientierten Brandschutzkonzept [1] begegnet werden, bei dem die funktionalen Anforderungen an die Bauteile, Baustoffe und anlagentechnischen Komponenten in enger Abstimmung mit der Feuerwehr und den Genehmigungsbehörden am Schutzziel orientiert festgelegt werden und die Erfüllung dieser funktionalen Anforderungen, z. B. mittels Ingenieurmethoden, nachgewiesen wird.

BEDEUTUNG DES FLUGHAFENS FRANKFURT/M.

Der von der Fraport AG betriebene Flughafen Frankfurt bietet in Europa die meisten Umsteigeverbindungen und bildet als Basis einer der weltgrößten Fluggesellschaften, der Deutschen Lufthansa AG, einen der wichtigsten Knotenpunkte im internationalen Luftverkehr. Über die Hälfte der mittlerweile über 54 Millionen Passagiere pro Jahr steigen in Frankfurt um [2].

Im Jahr 2020 werden bis zu 88,3 Millionen Fluggäste prognostiziert. Das entspricht einem jährlichen Passagierwachstum von 3,5 %. Durch dieses Wachstum des Luftverkehrs kommt es am Flughafen Frankfurt absehbar zu einem Engpass an Positionen für Großraumflugzeuge, insbesondere für den neuen revolutionären Flugzeugtyp Airbus A 380. Zur Deckung des zukünftigen Bedarfs

an Gebäudepositionen für Großraumflugzeuge der neuen Generation leistet das Projekt „A-Plus“ als Ausbau des Terminal 1 mit einem ca. 800 m langen neuen Flugsteig inkl. eines an den Bestand anschließenden Wurzelbereichs einen bedeutenden Beitrag. Weitere große Ausbauprojekte am Flughafen Frankfurt sind der nahezu fertiggestellte Bau einer neuen Landebahn im Norden sowie Planung und Neubau des Terminal 3 im Südosten des Flughafens.

ANGABEN ZUM GEBÄUDE A-PLUS

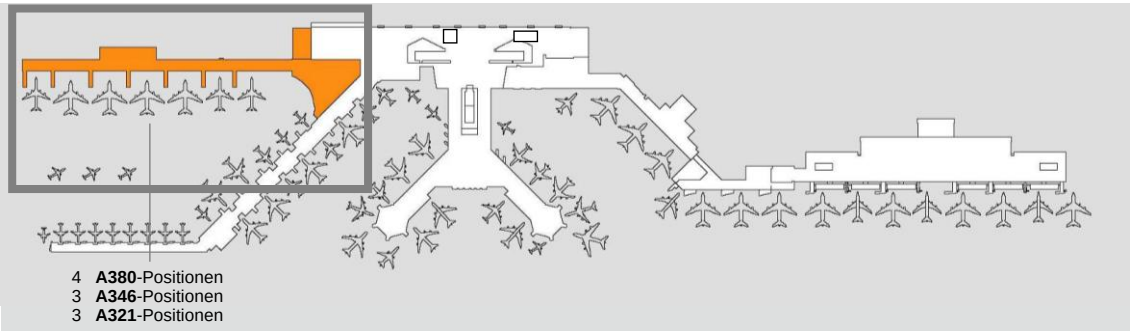
Das geplante Gebäude “A-Plus“ wird westlich des bestehenden Terminals 1 im Norden des Flughafens Frankfurt errichtet.

Das Gesamtgebäude A-Plus erschließt oberirdisch insgesamt vier Ebenen (Ebenen 01 - 04). Die Fußbodenoberkante der Ebene 04 liegt dabei in einer Höhe von ca. + 15,25 m. Es sind zwei Untergeschosse vorhanden (Ebenen U1 und U2). Die Ebene U2 liegt dabei in einer Tiefe von bis zu 11,50 m.

Die Abmessungen der einzelnen Gebäudeteile können Bild 1 entnommen werden.

Flugsteig A-Plus

Übersicht : Ein Flugsteig der Superlative



Gesamtlänge: ca. 790m

Flugsteig
-Länge: ca. 580 m
-Breite: ca. 25 m
-Höhe: ca. 22 m

Wurzel
-Länge: ca. 210 m
-Breite: ca. 150 m im Mittel
-Höhe : ca. 22 m

- BGF [m2]:	**ca. 185.400**
- BRI[m3]:	**ca. 1. Mio.**

Nutzungen:

Untergeschoss U02:	Technik
Untergeschoss U01:	GFA, Technik
Obergeschoss E01:	Gepäck, Busabf., Ankunft
Obergeschoss E02:	Schengen-Ebene
Obergeschoss E03:	Non-Schengen Ebene
Obergeschoss E04:	NS-Ankommer / Technik

Bild 1 Erweiterung des Terminal 1 durch das Projekt „Hochbau A-Plus“

Die Baumaßnahme „Hochbau A-Plus“ wird in zwei Bereiche aufgeteilt. Sie besteht aus dem eigentlichen Neubau des Flugsteigs A-Plus mit den südlich zum Vorfeld hin angeordneten Brückenbauwerken sowie dem östlich des Flugsteigs angrenzenden Neubau der Wurzel A, die den Bestand des Terminals 1 mit dem neuen Flugsteig verbindet (Bild 2).

Bild 2 Perspektiven Projekt „Hochbau A-Plus“

Der Neubau Wurzel A als Anschlussbereich zum bestehenden Terminal 1 bietet Raum für Sicherheits- und Passkontrollen, Handel, Lounges und auch eine großzügige Erweiterung der Gepäckausgabe- und Ankunftshalle A. Die Wurzel A bildet den zentralen Knotenpunkt zwischen dem bestehenden Flugsteig A und dem neuen Flugsteig A-Plus und wird nach Fertigstellung jährlich von ca. 30 Mio. Fluggästen passiert.

In den Abflugebenen der Wurzel A öffnet sich ein runder Marktplatz mit großen Laden- und Gastronomieflächen und mehreren Lufthansa-Lounges. Er bietet einen attraktiven Zentralbereich, durch den die Passagiere bequem zu ihren Abfluggates gelangen. Dieser architektonisch reizvolle Raum, der sich kegelförmig nach oben öffnet, verleiht dem Neubau einen unverwechselbaren Charakter (Bild 3).

Bild 3 Neubau Wurzel A – Zentraler Knotenpunkt zwischen Bestand und Neubau

Der Neubau des Flugsteigs A-Plus hat nach Fertigstellung des Bauvorhabens im Jahr 2012 eine Abfertigungskapazität von bis zu sechs Millionen Fluggästen pro Jahr und bildet damit einen wesentlichen Schwerpunkt der Lufthansa A 380-Abfertigung am Terminal 1. Insgesamt 7 Großraumflugzeuge der neuen Generation können am Flugsteig A-Plus positioniert werden, 4 davon sind für den Airbus A380 vorgesehen.

Neben der Aufnahme der Warteräume und Zugangsbauwerken zu den Flugzeugen (Brückenbauwerke) bildet eine Aufweitung den Mittelpunkt des Flugsteigs A-Plus. Hier sind weitere Laden- und Gastronomieflächen angeordnet, um dem Passagier auch kurz vor seinem Abflug noch einen angenehmen und abwechslungsreichen Aufenthalt zu ermöglichen (Bild 4).

Der neue Flugsteig A-Plus weist innen Flexibilität der Funktionen, eine Stringenz der Abläufe und ebenfalls eine repräsentativ-ansprechende Gestaltung auf. Die Außenwirkung ist geprägt von einer klar gegliederten, harmonisch proportionierten Fassade.

Neben Stahlbetonbauteilen, Stahlstützen und Stahlfachwerkträgern für die tragenden und aussteifenden Bauteile werden für die Decken Stahlverbundträger und Stahlbetonrippendeckenkonstruktionen geplant. Die Dachdecke der Ebene 04 im Wurzelgebäude besteht aus einer Stahlkonstruktion mit einer Trapezblecheindeckung.

Bild 4 Neubau Flugsteig A-Plus – Bereich Aufweitung

Für die Planung und Realisierung des Projektes „Hochbau A-Plus“ wurde eine Planungsgemeinschaft unter Führung des renommierten Architekturbüros gmp (von Gerkan, Marg und Partner), Hamburg verpflichtet. Weiterhin sind an der Planungsgemeinschaft das Tragwerksplanungsbüro Weber + Poll aus Hamburg, der Verkehrsplaner VSU aus Herzogenrath und hhpberlin Ingenieure für Brandschutz, verantwortlich für die Brandschutzplanung, beteiligt.

BRANDSCHUTZKONZEPT

Allgemeines

Das Gebäude ist gemäß § 45 /HBO/ als bauliche Anlage besonderer Art und Nutzung (Sonderbau) einzustufen. Für diesen Sonderbau können besondere Anforderungen gestellt oder Erleichterungen gestattet werden.

Gemäß § 2 (3) /HBO/ handelt es sich um ein Gebäude der Gebäudeklasse 5.Die Hauptnutzung des Gebäudes entspricht einer typischen modernen Flughafenterminalnutzung, für die keine Sonderbauvorschrift baurechtlich eingeführt ist. Aus diesem Grunde wird in Abstimmung mit der Bauaufsichtsbehörde auf Grundlage der /HBO/ ein schutzzielorientiertes Brandschutzkonzept [1] erarbeitet.

In § 13 /HBO/ sind die grundlegenden Schutzziele definiert:

- der Entstehung eines Brandes vorbeugen,
- der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorbeugen,
- die Rettung von Mensch und Tier ermöglichen sowie
- wirksame Löscharbeiten ermöglichen.

Im Brandschutzkonzept werden die aus diesen grundlegenden Schutzzielen resultierenden konkreten Anforderungen festgelegt. Die Erfüllung der baurechtlich verankerten Schutzziele ist in den Vordergrund der Betrachtung zu stellen. Grundlage dafür sind zum einen die in der /HBO/ formulierten materiellen Anforderungen sowie die Ergebnisse von Brandschutznachweisen mit ingenieurmäßigen Methoden.

Abwehrender Brandschutz

Der Flughafen Frankfurt hat eine anerkannte Werkfeuerwehr, die zwei Löschzüge für den Flugzeugbrandschutz und einen Löschzug für den Gebäudebrandschutz vorhält. Aus einem der Löschzüge Flughafenbrandschutz können Fahrzeuge auch für den Gebäudebrandschutz eingesetzt werden, sodass die gleichzeitige „Abarbeitung“ mehrerer Einsätze für die Flughafenfeuerwehr möglich ist. Die Berufsfeuerwehr Frankfurt/Main wird nur bei Großschadenslagen alarmiert oder wenn alle Kräfte der Werkfeuerwehr für den Flugzeugbrandschutz gebunden sind.

Für den Feuerwehrangriff werden im Bereich „Hochbau A-Plus“ zehn Feuerwehranlaufpunkte vorgesehen, die mit einem Feuerwehreinsatzschrank (Bedienfeld der BMA, Laufkarten, Steuerung der ELA, Einsatzmittel etc.) und einem Entrauchungstableau ausgestattet sind. Fünf dieser Feuerwehranlaufpunkte werden auch als Feuerwehrangriffsweg für die Sprinkleralarmierung ausgestattet. Die Erschließung im Gebäude erfolgt durch die mehr als 30 Treppenräume sowie sechs Aufzüge in Bauart von Feuerwehraufzügen.

Luftseitig ist für den Flugzeugbrandschutz eine Löschwassermenge von 6.400 l/min erforderlich. Löschwasserentnahmestellen werden im Bereich aller Treppenräume in den Brückenbauwerken vorgesehen. Landseitig ist ein Löschwasserbedarf von 3.200 l/min sichergestellt.

Rettungswege

Zur Erfüllung der Grundsatzanforderung, die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten zu ermöglichen, müssen die Rettungswege so angeordnet und ausgebildet sein, dass ihre Benutzbarkeit im Brandfall für einen ausreichend langen Zeitraum möglich ist. Die Rettungswege müssen so dimensioniert sein, dass sie für den größten zu erwartenden Verkehr ausreichen. Für die Bewertung der Rettungswege (Länge und insbesondere Breite bzw. Kapazität) werden ingenieurmäßige Verfahren wie Personenstromanalysen und Rauchgassimulationen herangezogen. Für die Rauchableitung wird eine rauchfreie Schicht für einen ausreichend langen Zeitraum nachgewiesen. Die berechneten Evakuierungszeiten bis zum Verlassen des Gebäudes liegen bei sämtlichen Szenarien maximal bei ca. 16 Minuten, die Treppenräume werden von allen Personen innerhalb von maximal 15 Minuten erreicht.

Gemäß § 31 (2) /HBO/ muss von jeder Stelle eines Aufenthaltsraumes sowie eines Kellergeschosses mindestens ein notwendiger Treppenraum oder ein Ausgang ins Freie in höchstens 35 m Entfernung erreichbar sein. Sind mehrere notwendige Treppenräume erforderlich, müssen sie so verteilt sein, dass die Rettungswege möglichst kurz sind.

Gemäß Abstimmung mit der Genehmigungsbehörde sind aufgrund der Gewährleistung einer raucharmen Schicht ohne weitere Einzelbetrachtung Rettungsweglängenüberschreitungen bis 12 m bezogen auf die /HBO/ vertretbar. Die Rettungswege werden bis zu einem „sicheren Bereich“ gemessen, als dieser gilt:

- ein Ausgang in das Freie,
- ein notwendiger Treppenraum,
- ein Ausgang in die südlich des Flugsteigs angrenzenden Brückenbauwerke, die mit einem F 90/T 90-Glaselement vom Flugsteig abgetrennt sind.

Räume mit mehr als 100 m² Fläche müssen zwei Ausgänge haben, aufgrund der anlagentechnischen Ausstattung des Gebäudes können beide Rettungswege auch über die Verkehrsfläche führen.

In den Medienkanälen in den Untergeschossen sind Rettungsweglängen bis zu 70 m bis zum benachbarten Brandabschnitt oder zum Treppenraum zulässig.

Die Rettungswege müssen auch unabhängig der Problematik Land-/Luftseite, Schengen/Non-Schengen in jedem Falle sichergestellt werden. Es gilt das Prinzip „safety“ vor „security“. Zur Vermeidung illegaler Übertretungen der vorgenannten Grenzen werden die Rettungswege möglichst so geführt, dass die Bereiche unabhängig voneinander entfluchtet werden. Türen zwischen den Sicherheitsbereichen werden verriegelt und mit bauaufsichtlich zugelassenen Not-Auf-Tastern ausgestattet. In öffentlich zugänglichen Bereichen sind direkte Notausgänge in einen anderen Sicherheitsbereich zu vermeiden. Die Entfluchtung erfolgt in der Regel direkt über Treppenräume, die im normalen Betriebszustand nicht genutzt werden, bzw. – sofern erforderlich – über Schleusen in den anderen Sicherheitsbereich.

Während der Betriebszeiten führen Rettungswege auch durch die Sicherheitskontrollen in der Wurzel in Ebene 02 und 03. Bei geschlossenen Sicherheitskontrollstellen (Nachtabschluss außerhalb der Flugbetriebszeiten) ist für Personen wie Reinigungspersonal ein Notzugang zum Treppenraum angeordnet worden, sodass die Rettungsweglängen auch für den Fall „Nachtabschluss“ in ihrer Länge begrenzt sind.

Auch außerhalb der Öffnungszeiten muss in den Shops für Betriebs- und Reinigungspersonal ein Notausgang zur Verfügung stehen. Bei Glasfaltwänden wird der Notausgang durch eine mindestens 80 cm breite Türöffnung, bei Gitterroll-

toren durch eine mindestens 1 m hohe untere Öffnung sichergestellt, die erst nach Verlassen des letzten Mitarbeiters verschlossen werden.

Alarmierungs- und Rettungskonzept

Das Alarmierungs- und Rettungskonzept beinhaltet insbesondere die Alarmierung der Werkfeuerwehr sowie die Sicherstellung der Rettungswege über den erforderlichen Evakuierungszeitraum. Generell müssen alle Notausgänge und Rettungswege jederzeit benutzbar sein, auch wenn sie in oder über Sicherheitsbereiche führen. Werden Sicherheitsbereiche betreten, so erfolgt eine sofortige Alarmierung des Sicherheitspersonals, um eine unbefugte Nutzung (z. B. aufgrund eines Fehlalarms) der Rettungswege zu verhindern.

Bezüglich der Alarmierung und Evakuierung wird unterschieden zwischen

- öffentlich zugänglichen Bereichen und
- nicht öffentlich zugänglichen Bereichen (Zugang nur für Betriebs- und Wartungspersonal).

Generell erfolgt eine automatische Alarmierung der Werkfeuerwehr über die flächendeckend vorgesehenen automatischen Brandmelder oder die Handfeuermelder. Aufgrund der in einem Flughafen gemäß Luftsicherheitsgesetz einzuhaltenden Sicherheitsmaßnahmen erfolgt eine Evakuierung der öffentlich zugänglichen Bereiche des Gebäudes nicht automatisch, sondern ausschließlich durch die Werkfeuerwehr. Die Evakuierung der Personen wird entsprechend der vorgefundenen Lage von der Werkfeuerwehr in der Regel horizontal durchgeführt werden, d. h. in den benachbarten Brandabschnitt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass aufgrund der größeren Ausgangsbreiten (Flugsteig) kürzere Evakuierungszeiten entstehen und zum anderen Sicherheitslinien nicht überschritten werden müssen wie bei einer Evakuierung über Treppen aufs Flugfeld oder von Schengen-Bereiche in Non-Schengen-Bereiche. Die Treppenräume werden nur für die Selbstrettung aus öffentlich zugänglichen Bereichen genutzt, also nur von den Personen im unmittelbaren Umkreis um den Brandherd, die sich im selben Rauchabschnitt befinden.

Baulicher Brandschutz

Das Tragwerk wird in der Qualität F 90-A hergestellt. Die Dimensionierung erfolgt nach DIN 4102-4 in Verbindung mit DIN 4102-22. Im Rahmen eines Sondervorschlags der ausführenden Baufirmen sind in der Wurzel und im Flugsteig die Rippen der Stahlbetonrippendecke abweichend vom Amtsvorschlag (Stahlbetonbauweise) als Spannbetonträger ausgeführt worden. Hierdurch soll eine schlankere und kostengünstigere Bauweise erreicht werden. In den Rippen sind Aussparungen zur Führung von TGA-Leitungen vorgesehen. Aufgrund dieser Aussparungen und der erforderlichen schlanken Ausführung wurde ein rechnerischer Nachweis geführt, mit dem der erforderliche Feuerwiderstand (F 90)

trotz der gemäß Bemessungstabelle in DIN 4102-4 verringerten Achsabstände der Spannlitzen nachgewiesen werden konnte.

An das Tragwerk von Dächern werden nach /HBO/ keine besonderen Anforderungen gestellt. Das Dachtragwerk sowie das Tragwerk des Lichtkegels werden daher grundsätzlich ohne Feuerwiderstand errichtet. Eine Ausnahme bilden die Teile des Daches,

- über die Rettungswege über Dach geführt werden,
- an denen der Geschossüberstand im Bereich der gekrümmten Fassade der Wurzel über Zugstützen abgehängt ist,
- an denen L 90-Leitungen und FE-Kabel befestigt werden,
- an denen Brandwände und F 90-Wände aufgelagert sind.

Die im Gebäude vorhandenen Deckendurchbrüche werden durch Rauchschürzen abgetrennt. Im Bereich der Deckendurchbrüche wird eine verdichtete Sprinklerung angeordnet.

Der Lichtkegel wird zur Sicherstellung der Abtrennung des Schengen- und Non-Schengen-Bereiches mit einer Verglasung ausgeführt. Der Luftraum des Lichtkegels wird aufgrund seiner Höhe nicht gesprinklert. Die Verglasung kann in VSG ausgeführt werden. Mit einem rechnerischen Nachweis wurde gezeigt, dass ein vertikaler Brandüberschlag nicht zu erwarten ist. Um eine Zerstörung der Verglasung auch bei einem Brand von Brandlasten im ungesprinklerten Luftraum des Kegels sowie unmittelbar an der Verglasung zu verhindern, wurde zur Kühlung der Verglasung sowohl innen- als auch außenseitig eine Sprühwasserlöschanlage vorgesehen, die von der Feuerwehr manuell angesteuert werden kann.

Durch einen vereinfachten Nachweis mithilfe eines Plumemodells wurde gezeigt, dass unter den konservativen Annahmen

- Nichtansetzen der vorhandenen Sprinklerung,
- Brand direkt am Rand der Deckenöffnung des Lichtkegels,
- ungehinderte kreisförmige maximale Ausdehnung des Brandes,
- Beginn der Brandbekämpfung erst nach 11 Minuten

die Temperaturen im Plumebereich in Höhe der über dem Brandherd liegenden Ebene (+5,25 m) nicht zu einer geschossübergreifenden vertikalen Brandübertragung im Lichtkegelbereich führen.

Mit dem im Anhang C des Eurocode 1 Teil 1-2 [3] veröffentlichten Verfahren (Heskestad-Plumemodell) kann die in der Plume- bzw. Flammenachse wirkende Temperatur θ (z) entlang der Symmetrieachse z der Flammen (Plume-centerline-Temperatur) berechnet werden:

$$\theta\,(z) = 20 + 0{,}25 \cdot Q_c^{2/3} \cdot (z-z_0)^{-5/3} \qquad (1)$$

mit

$Q_c = 0{,}80 \cdot Q$ konvektiver Anteil der Wärmefreisetzungsrate [W],

z Höhe der Flamme [m] entlang der Flammenachse,

z_0 gedachter Ursprung der Achse gemäß [3]

$$z_0 = -1{,}02 \cdot D + 0{,}00524 \cdot Q^{2/5} \qquad (2)$$

mit

D Durchmesser des Brandes [m].

Mit dem im vfdb-Leitfaden [4] beschriebenen Heskestad-Delichatsios-Modell kann die Temperaturerhöhung in der Mittelachse des Plumes (Plumecenterline-temperatur) sowie in einem radialen Abstand r bestimmt werden:

$$\Delta T_p = T_0\,(Q^*)^{2/3} \cdot (0{,}188 + 0{,}313\; r/(z-z_0))^{-4/3} \qquad (3)$$

wobei

$$Q^* = Q_c / (\rho_0\, c_p\, T_0\, g^{1/2}\, (z-z_0)^{5/2}) \qquad (4)$$

ρ_0 Dichte der Umgebungsluft [kg/m³],

c_p spez. Wärmekapazität der Kaltgasschicht [kJ/(kgK)],

T_0 Temperatur der Umgebungsluft [K],

ΔT_p Erhöhung der Plumetemperatur [K],

g Erdbeschleunigung [m/s²],

r radialer Abstand zur Plume-Achse [m].

Gemäß [4] beträgt die flächenbezogene Brandlastdichte bei Verkaufsnutzungen $RHR_f = 500$ kW/m². Setzt man für die Brandentwicklungsdauer unter Berücksichtigung der brandlastarmen Freiflächen (Verkehrsflächen) auf der sicheren Seite liegend mit

$t_\alpha = 200$ s an,

so errechnet sich bei ungestörter Brandausbreitung (keine Sprinklerung) bis zum Einsatz der Brandbekämpfung nach 11 Minuten eine Wärmefreisetzungs-rate von

$Q_{max} = (t / t_\alpha)^2 = (660 / 200)^2 = 10{,}89$ MW. (6)

Die maximale Brandfläche beträgt

$A = Q_{max} / RHR_f = 21{,}78$ m². (7)

Der Durchmesser einer flächengleichen kreisförmigen Brandfläche ermittelt sich zu:

$D = 5{,}27$ m.

$z_0 = -1{,}02 \cdot 5{,}27 + 0{,}00524 \cdot (0{,}8 \cdot 10890000)^{2/5} = -1{,}95$ m. (8)

Es ergibt sich für die Temperatur in der Flammenachse (Plumecenterline) im vertikalen Abstand 5,25 m über dem Brandherd (Bild 5):

θ (t = 5 min) = 157°C,

θ (t = 7 min) = 236°C,

θ (t = 10 min) = 366°C,

θ (t = 11 min) = 412°C.

Mit $\rho_0 = 1{,}2$ kg/m³, $c_p = 1{,}007$ kJ/(kgK) und $g = 9{,}81$ m/s² ermittelt sich für z = 5,25 m (Geschosshöhe) nach dem Heskestad-Delichatsios-Modell in [4] die Temperatur T in einem radialen Abstand von r = 1,50 m von der Flammenachse zu:

θ (r = 1,50 m, t = 5 min) = 114°C,

θ (r = 1,50 m, t = 7 min) = 167°C,

θ (r = 1,50 m, t = 10 min) = 256°C,

θ (r = 1,50 m, t = 11 min) = 288°C.

Die kritische Temperatur von VSG-Glas ist abhängig von ihrem Einbauzustand und der Geschwindigkeit der Erwärmung. Nach [5] wurden kritische Temperaturen von mehr als 300 °C festgestellt. Bei einer langsamen Erwärmung durch aufsteigende Heißgase im Plume ist nicht mit einem Versagen der Verglasung bis zum Eintreffen der Feuerwehr zu rechnen.

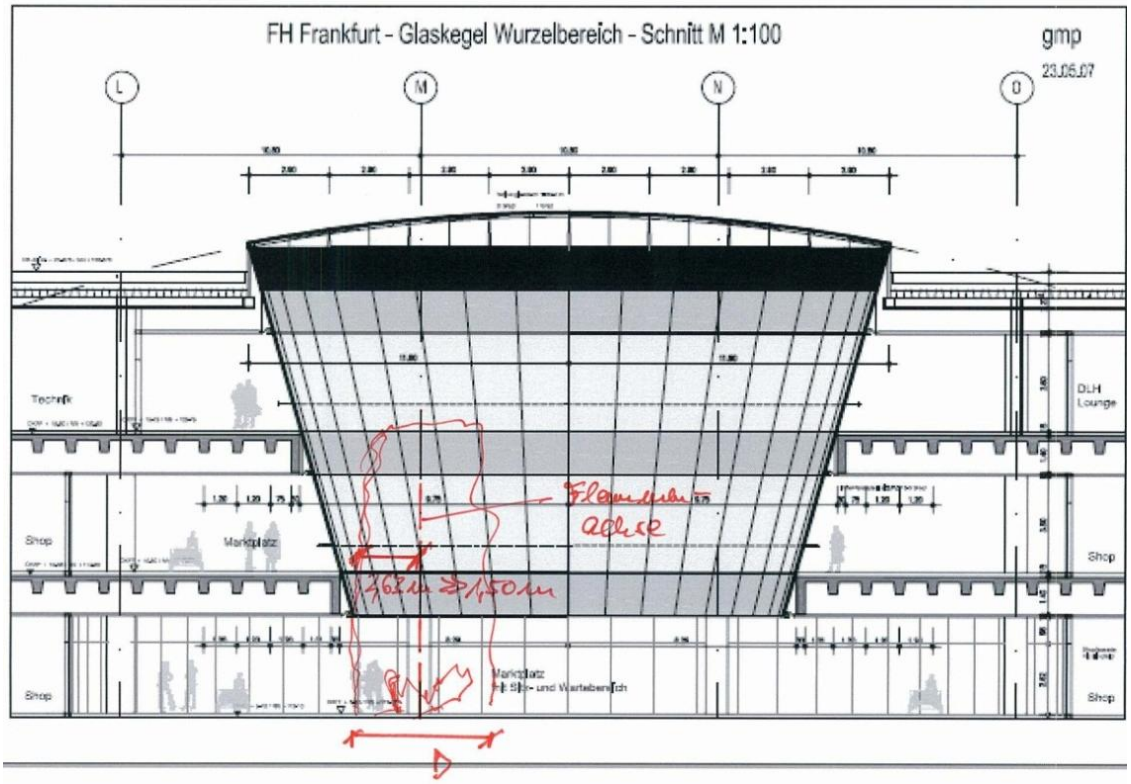


Bild 5 Aufsteigender Plume mit radialem Abstand im Lichtkegel

Brandabschnitte

Für das Gebäude ist aufgrund der großen Ausdehnung, seiner Nutzung und der geplanten anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen sowie der weitgehenden Verwendung von nichtbrennbaren Baustoffen eine Ausbildung größerer Brandabschnitte, als in der /HBO/ vorgesehen, unbedenklich. Im Wurzelbereich und im Aufweitungsbereich des Flugsteigs ergeben sich Brandabschnitte mit einer Größe von bis zu 8.000 m² pro Geschoss, die teilweise über offene Treppen in mehreren Geschossen in Verbindung stehen. Tore in Brandwänden werden in öffentlich zugänglichen Bereichen unter Berücksichtigung der vorhandenen vollflächigen Sprinklerung und der Verwendung von nichtbrennbaren Baustoffen in den Verkehrsbereichen grundsätzlich in der Qualität T 30 ausgeführt. Im Flugsteig werden in Verkehrs- und Gatebereichen Feuerschutzabschlüsse mit einer Breite von bis zu 20 m ausgeführt, für die Zustimmungen im Einzelfall beantragt wurden, da zugelassene Systeme nur bis 12 m Breite verfügbar waren. Sämtliche Brandschutztore und Türen in Brandwänden werden grundsätzlich so geplant, dass sie ausschließlich autark durch automatische Brandmelder der Kenngröße Rauch schließen und nicht automatisch über die BMA angesteuert werden.

Rauchableitung

Grundsätzlich ist im Rahmen des schutzzielorientierten Brandschutzkonzeptes in den für Fluggäste öffentlich zugänglichen Bereichen eine raucharme Schicht von mindestens 2,50 m in allen Ebenen stationär nachzuweisen. Ausgenommen sind einzelne Räume, z. B. öffentlich zugängliche Büroräume, Sanitärräume, Lager- und Technikräume sowie Küchen. Als öffentlich zugängliche Räume werden folgende Bereiche definiert:

- Verkehrsflächen (inkl. Gateflächen),
- Sicherheitskontrollbereiche,
- Ladeneinheiten, Gastronomie, Bars und Konzessionäre,
- Lounges und Wartebereiche,
- Gepäckausgabehalle.

Die Rauchableitung erfolgt über die Abluftkanäle der Humanlüftung. Auf diese Weise kann der große Platzbedarf für Lüftungskanäle minimiert und die flughafentypische hohe Installationsdichte im Zwischendeckenbereich verringert werden. In den Lüftungszentralen werden Brandgasventilatoren angeordnet, die über einen Bypass an das Lüftungskanalnetz angeschlossen sind. Die für die Rauchableitung genutzten Kanäle müssen aufgrund der anlagentechnischen Ausstattung des Gebäudes nicht als Entrauchungsleitungen ausgeführt werden. Lediglich, wenn die Kanäle den brandschutztechnisch abgetrennten Bereich verlassen, müssen sie feuerbeständig (L 90) bis zum jeweiligen Schacht bzw. zur Lüftungszentrale geführt werden. Die Funktion der Rauchableitung darf nicht durch Brandschutzklappen unterbrochen werden. Im Verlauf der Rauchabzugsanlage werden daher zugelassene motorgesteuerte Entrauchungsklappen oder kombinierte Brandschutz- und Entrauchungsklappen eingesetzt.

Der Nachweis der erforderlichen maschinellen Abluftleistung bzw. Größe der natürlichen Rauchabzugsöffnungen erfolgt für die Bereiche, in denen eine raucharme Schicht nachzuweisen ist nach DIN 18232-5, sofern die Rauchabschnitte 1.600 m² nicht überschreiten bzw. durch Rauchgas-simulationen mit einem CFD-Modell auf Grundlage der mit der Bauaufsichtsbehörde und Branddirektion abgestimmten Brandszenarien und Bemessungsbrände.

Brandszenarien und Bemessungsbrände

Für die Auslegung der Rauchableitung wurde gemäß vfdb-Leitfaden [4] folgender Bemessungsbrand zugrunde gelegt:

- mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit,
- quadratischer Anstieg der Wärmefreisetzungsrate,

- Bemessung der maximalen Wärmefreisetzungsrate aus maximalem Abstand (vertikal und horizontal) Brandherd-Sprinkler, Sprinklerauslösetemperatur 68 °C, Trägheitsindex Sprinkler RTI = 50 (s*m)0,5.

Die maximale Wärmefreisetzungsrate ermittelt sich in Anhängigkeit der Raumhöhe zu 1,65 MW. Für die Retailbereiche mit höheren Brandlasten wird ein Sicherheitsfaktor von 1,5 vereinbart, sodass die maximale Wärmefreisetzungsrate 2,48 MW beträgt.

Die Schutzzielkriterien, die durch die Simulation nachgewiesen werden müssen, werden gemäß [4] angesetzt.

Ergebnisse Rauchgassimulation

Im Flugsteig erfolgt die Rauchableitung linienförmig beidseitig parallel zu den Hauptträgern (Bild 6) mit einem Volumenstrom von 50.000 m³/h pro Achsfeld.

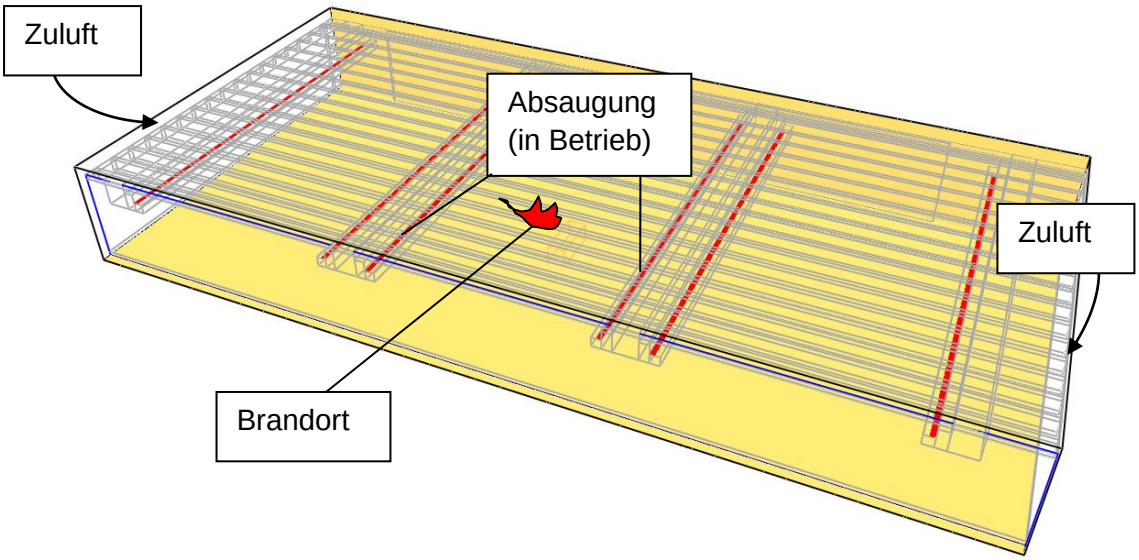


Bild 6 Linienförmige Rauchableitung im Flugsteig

Die Hauptträger bilden die Rauchschürzen. Mit CFD-Simulationen wurde nachgewiesen, dass im Brandfall die Rauchausbreitung auf das Achsfeld beschränkt bleibt. Bei einem Brandereignis direkt unter einem Hauptträger wird die Rauchableitung in den beiden benachbarten Achsfeldern mit insgesamt 70.000 m³/h angesteuert. Die Nachströmung erfolgt durch Nachströmöffnungen an der Nordfassade des Flugsteigs weit entfernt von der Brandstelle. Die Wirksamkeit der linienförmigen Rauchableitung im Flugsteig wurde durch Modellversuche im Maßstab 1:15 nachgewiesen [6].

Im Wurzel- und Aufweitungsbereich wurde die Rauchableitung klassisch über punktförmige Absaugstellen ausgeführt. Die Rauchabschnitte sind durch Rauchschutzvorhänge bzw. Rauchschürzen voneinander abgetrennt. Die Verkehrsfläche und die angrenzenden Retaileinheiten bilden einen zusammenge-

hörenden Rauchabschnitt. In Bild 7 ist beispielhaft die Ausbildung von Rauchabschnitten am Beispiel der Wurzel Ebene 02 gezeigt.

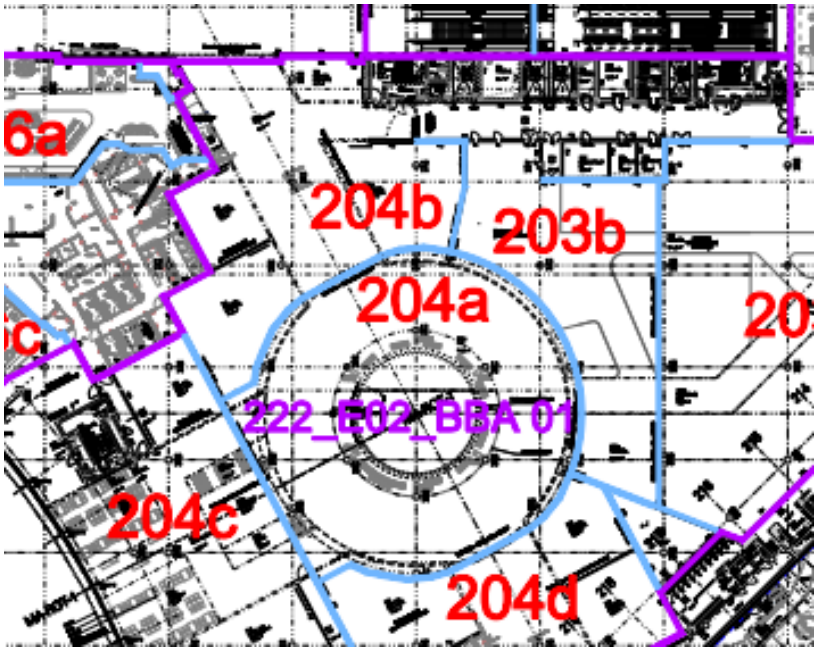


Bild 7 Anordnung der Rauchabschnitte in der Wurzel Ebene 02

Die Nachströmung erfolgt entweder mechanisch aus benachbarten Rauchabschnitten oder natürlich über die Fassade aus entfernt gelegenen Rauchabschnitten. Die Ausbildung der raucharmen Schicht wurde mit CFD-Simulationen nachgewiesen. Die Wirksamkeit der Rauchableitung in der Wurzel wurde durch einen Modellversuch im Maßstab 1:15 bestätigt (Bild 8) [6].

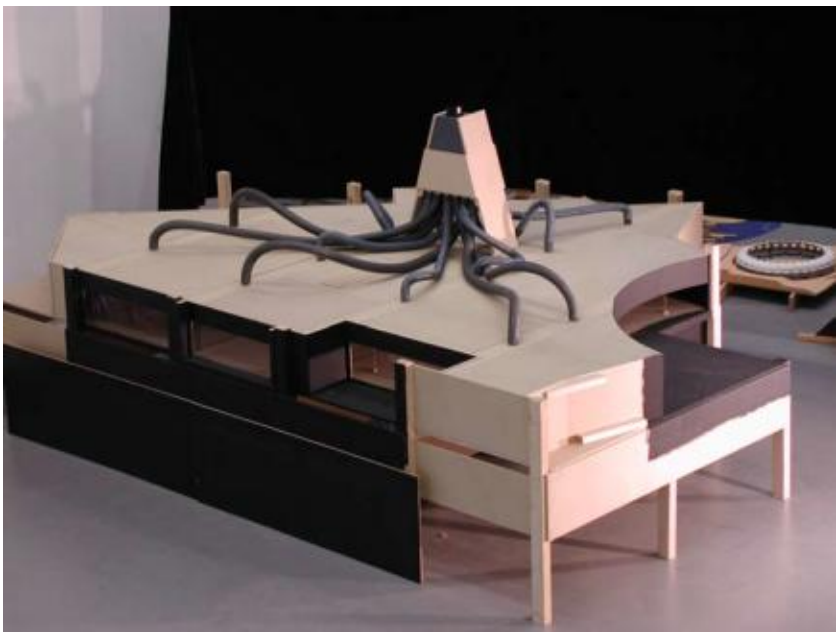


Bild 8 Aufbau Modellversuch für die Wurzel (aus [6])

Im Lichtkegel wird der Rauch mechanisch im Dachbereich abgeleitet. Die mechanische Rauchableitung wurde vom Bauherrn einer natürlichen Rauchableitung vorgezogen, um eine weitgehende Unabhängigkeit von Witterungseinflüssen wie Wind und Sonneneinstrahlung und der im Gebäude mutmaßlich vorhandenen Längsströmung zu haben. Bild 9 zeigt die Ausbildung der raucharmen Schicht im Lichtkegel bei einer Absaugung von 80.000 m³/h.

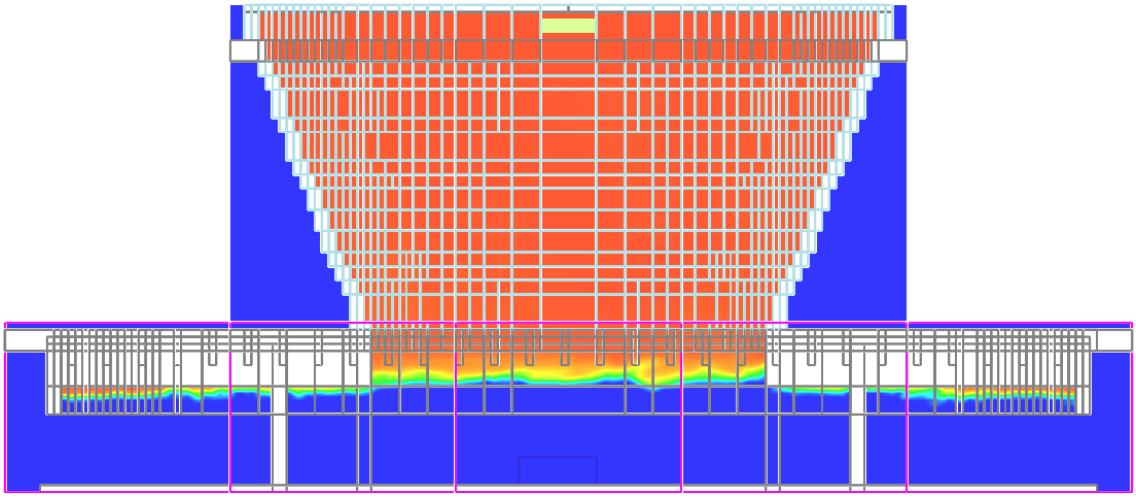


Bild 9 Ausbildung einer stationären raucharmen Schicht im Lichtkegel

Eine Besonderheit hinsichtlich der Rauchableitung bilden die Konzessionäre der Shops. Durch Anordnung von Rauchschürzen bis 2,80 m über OKFF und eines mindestens fünffachen Luftwechsels wird sichergestellt, dass der Rauch auch in kleinen Retaileinheiten zunächst innerhalb der Einheit verbleibt. Erst bei einem größeren Brandereignis kann es zu einem (planmäßigen) Überströmen von Rauch in die Verkehrsfläche kommen, mit der die Retaileinheit einen Rauchabschnitt bildet. Der Rauch breitet sich in dieser Fläche aus und wird im gesamten Rauchabschnitt abgeleitet, sodass sich eine raucharme Schicht von 2,50 m ausbildet.

REDUNDANZEN

Zur Sicherstellung der bauaufsichtlichen Schutzziele werden im Bauvorhaben „Hochbau A-Plus“ verstärkt anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen vorgesehen. Bauliche Brandschutzmaßnahmen werden aufgrund der erforderlichen Flexibilität und der flughafenspezifischen Anforderungen durch anlagentechnische Maßnahmen teilweise kompensiert. Aus diesem Grunde und aufgrund des hohen Sicherheitsbedürfnisses eines Flughafens kommt der Redundanz der anlagentechnischen Maßnahmen eine besondere Bedeutung zu. Die anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen werden sicherheitsstromversorgt und in Funktionserhalt verkabelt..

Die geplante Sprinkleranlage stellt als thermische Überwachung mit Aufschaltung zur Gebäudeleitzentrale und eigener Übertragungseinrichtung sowie eige-

nen Feuerwehrlaufkarten eine vollständige Redundanz zur Brandmeldeanlage dar. Durch die Anordnung von Multisensormeldern, die auf verschiedene Brandfolgegrößen reagieren (Rauch, Temperatur, ggf. Flammen), ist eine schnellstmögliche Detektion für unterschiedliche Brandszenarien sichergestellt. Weiterhin kann die Alarmierung der Feuerwehr über Handdruckknopfmelder sowie durch das anwesende Sicherheitspersonal über Telefon erfolgen. Die Sprinkleranlage wird hinsichtlich ihrer Pumpentechnik und Energieversorgung redundant geplant. Durch die Anordnung von Etagen-, Strecken- und Bereichsschiebern wird sichergestellt, dass im Wartungsfalle die Sprinkleranlage nur für lokal begrenzte Bereiche außer Betrieb genommen werden muss. In den Sprinkler(unter)zentralen werden für die Nassalarmventilstationen Bypassleitungen angeordnet, sodass auch bei Wartungs- und Reparaturarbeiten an der Alarmventilstation die Wasserversorgung der Sprinkleranlage gewährleistet ist.

Die Rauchableitung der öffentlich zugänglichen Bereiche, für die eine raucharme Schicht von mindestens 2,50 m nachgewiesen werden muss, wird grundsätzlich maschinell über Rauchgasventilatoren sichergestellt. Die Rauchableitung wird so geplant, dass im Flugsteig und in den Verkehrsbereichen der Wurzel für jeden Entrauchungsbereich mindestens drei Rauchgasventilatoren vorhanden sind, die jeweils höchstens 33 % der erforderlichen Entrauchungsmenge liefern. Bei Ausfall eines Ventilators wird somit eine Entrauchungsleistung von mindestens 67 % gewährleistet, sodass zumindest für einen begrenzten Zeitraum eine raucharme Schicht von mind. 2,50 m sichergestellt werden kann.

FAZIT

Mit dem Projekt „Hochbau A-Plus“ wird das Terminal 1 des größten deutschen Flughafens in Frankfurt/Main für die Gatebereiche der Airbus A 380 der Lufthansa erweitert. Das 185.000 m² große Projekt umfasst neben den Gatebereichen große Flächen für Konzessionäre, Lounges, Technikbereiche und Gepäckförderanlagen. Die vielfältige Nutzung sowie der Anschluss an den Bestand unter Fortführung des Flugbetriebes stellen für die Planer eine große Herausforderung dar. Eine besondere Bedeutung hatte auch die Brandschutzplanung, die für den ausgedehnten Gebäudeteil mit komplexen Nutzeranforderungen individuelle schutzzielorientierte Lösungen bieten muss. Im vorliegenden Beitrag werden die Eckpunkte des Brandschutzkonzeptes dargestellt. Zur Sicherstellung der bauaufsichtlichen Schutzziele müssen im Bauvorhaben „Hochbau A-Plus“ verstärkt anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen vorgesehen werden. In enger Abstimmung zwischen Planern, Bauherrn und Genehmigungsbehörden gelingt es, ein innovatives Brandschutzkonzept umzusetzen.

LITERATUR

[1] Brandschutzkonzept 06B407-G1 der hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH.

[2] Steckbrief A-Plus. Flyer der Fraport AG.

[3] DIN EN 1991-1-2 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2010.

[4] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, vfdb TB 04/01, 2. Auflage, Juni 2009, Hrsg. D. Hosser.

[5] Dobbernack, R.: Experimentelle Grundlagen zur Auslegung von Gebäuden für Naturbrandbeanspruchung. Heft 145, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. Braunschweiger Brandschutztage 1999.

[6] Flughafen Frankfurt – Entwicklung A-West, Frankfurt am Main. Experimentelle Untersuchung der Entrauchungswirksamkeit im Brandfall für ausgewählte Räumlichkeiten (Flugsteig und Wurzel Travel Value). Schlussbericht der Wacker Ingenieure, Birkenfeld, 02/2009.

SICHERHEIT FÜR EINEN NEUEN ZÜRCHER STADTTEIL – BRANDSCHUTZ BEI HOCHHAUSPROJEKTEN

Ralf Schnetgöke
Gruner AG, Zürich

EINLEITUNG

An attraktiver Zentrumslage von Zürich entsteht direkt neben dem Hauptbahnhof ein neuer Stadtteil: Die Europaallee. Geprägt durch eine moderne Architektur und durch einen großzügig gestalteten öffentlichen Raum wird auf diversen Baufeldern etappenweise ein Stadtteil von hoher Aufenthaltsqualität und einem vielfältigen Nutzungsmix – Dienstleistungen, Büros, Wohnen, Hotel- und Gastronomieangeboten, Detailhandel, Freizeit sowie Bildung – angeboten. Es entsteht eine zeitgemäße urbane Lebensqualität für über 6000 Arbeitsplätze, 400 Wohnungen und 160 Hotelbetten.

Bild 1 Übersicht der neuen Europaallee

In diesem Beitrag wird über den Brandschutz für das größte der Baufelder, das Baufeld A, berichtet. Auf diesem Baufeld entsteht ein Gebäudeensemble für die Pädagogische Hochschule Zürich (PHZH), ein Shopping Center sowie die Privatbank Clariden Leu. Rund 1800 Studierende und etwa 350 Lehrpersonen (mit Voll- oder Teilpensum) sind zurzeit an der PHZH tätig. Der Kanton Zürich nutzt die Gelegenheit, die heute auf mehrere Gebäude verteilte Fachhochschule verkehrstechnisch zu zentralisieren. Clariden Leu gehört zu den drei größten Anbietern von Private Banking-Dienstleistungen in der Schweiz. Im Jahr 2012 wird die Bank neben ihrem Hauptsitz repräsentative Büroräume an der Europaallee beziehen.

Es werden die Planungsphase mit der Konzepterstellung und Genehmigung sowie die laufende Ausführungsphase mit der konzeptkonformen Umsetzung der Brandschutzmassnahmen dargestellt.

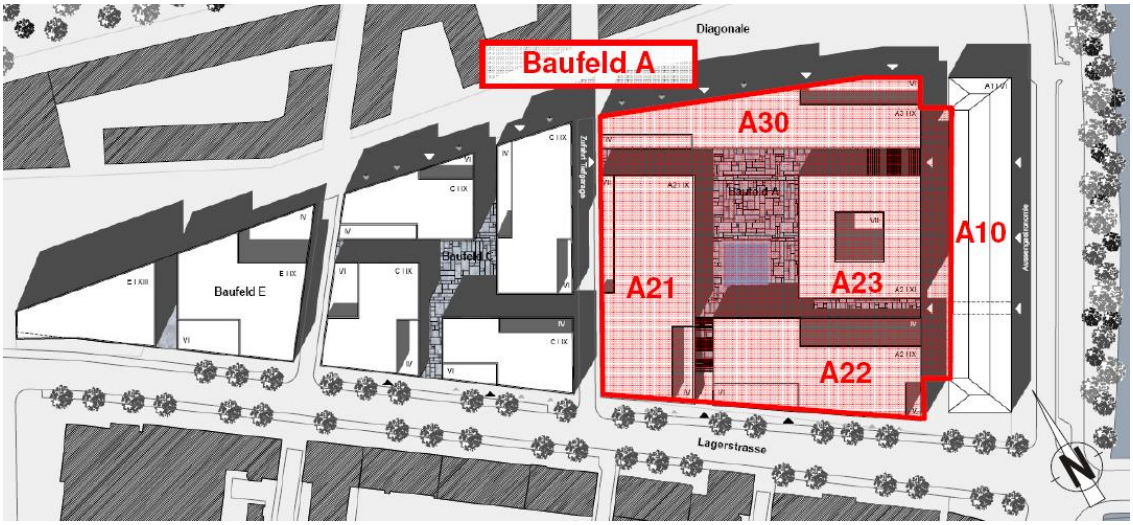


Bild 2 Gebäudeübersicht Baufeld A

EUROPAALLEE BAUFELD A – GEÄUDESTRUKTUR

Die oberirdischen vier Bauten A21, A22, A23 und A30 (alles Hochhäuser mit je sechs bis neun Vollgeschossen ab dem 2. Obergeschoss) umschließen einen gemeinsamen, oben offenen Hof, der über vier Zugänge öffentlich zugänglich ist. Der gemeinsame Sockeltrakt setzt sich aus zwei Untergeschossen sowie dem Erdgeschoss und dem 1. Obergeschoss mit Shopping Mall zusammen.

Bild 3 Innenhof der Pädagogischen Hochschule (Gebäude A23)

Das Gebäude A20 mit den Einzelbauten A21, A22 und A23 wird von der Pädagogischen Hochschule genutzt werden. Oberhalb des Sockels sind Schulungs-, Seminar- und Büroräume, Werkräume, Ateliers, Musik- und Theaterräume, Hörsäle, Sporthallen, Bibliothek, Mensa etc. geplant. Das Gebäude A30 wird als Bankgebäude genutzt. Im Sockelgeschoss befindet sich eine Shopping Mall mit Verkauf und Gastronomie (EG und 1. OG) sowie Tiefgarage, Anlieferung und Technikräumen (in den Untergeschossen).

SCHWEIZER BRANDSCHUTZVORSCHRIFTEN

Das System „Sichern und Versichern“ prägt den Brandschutz in der Schweiz. In 19 von 26 Kantonen gibt es ein Versicherungsmonopol. Die rund 2,1 Mio. Gebäude werden durch die betreffenden Kantonalen Gebäudeversicherungen versichert. Die Kantonalen Gebäudeversicherungen sind öffentlich-rechtliche Anstalten. Sie bestehen aus der Brandschutzbehörde, der Feuerversicherung sowie dem Feuerwehrinspektorat. Dadurch entsteht das System „Sichern und Versichern“ [1].

Um zu verhindern, dass in den einzelnen Kantonen die Feuersicherheit unterschiedlich streng gehandhabt wird, haben sich die kantonalen Brandschutzbehörden zur Vereinheitlichung der Vorschriften in der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF) zusammengeschlossen. Damit soll sichergestellt werden, dass der Staat seine Bürger überall gleich, nach bestem Wissen und dem neuesten Stand der Technik schützt.

Der Zweck der Schweizerischen Brandschutzvorschriften VKF ist der Schutz von Personen und Sachen vor den Gefahren und Auswirkungen von Bränden und Explosionen. Der Personenschutz steht im Vordergrund, der Schutz von Leib und Leben vor den Gefahren und Auswirkungen von Bränden und Explosionen ist das Hauptziel der Brandschutzvorschriften. Personen- und Sachwertschutz sind in den meisten Fällen eng miteinander verbunden. Ein guter / genügender Personenschutz wirkt sich in aller Regel auch positiv auf den Sachwertschutz aus und umgekehrt. Brandschutzmaßnahmen tragen auch dazu bei, das Gefahrenpotenzial für unsere Umwelt abzubauen [2].

Die aktuell gültigen schweizerischen Brandschutzvorschriften VKF wurden am 01.01.2005 in Kraft gesetzt (Tabelle 1).

In der Brandschutznorm sind die Schutzziele und grundsätzlichen Anforderungen an den Brandschutz angegeben. Die einzelnen Brandschutzrichtlinien präzisieren die spezifischen Anforderungen (Brandabschnitte, Tragwerk, Baustoffe, Flucht und Rettungswege, Löschanlagen, SPA, RWA etc.). In den Brandschutzarbeitshilfen werden die Anforderungen aus den Brandschutzrichtlinien nochmals maßgeschneidert auf spezielle Nutzungen (Beherbergungsbetriebe, Verkaufsgeschäfte, Hochhäuser etc.) zusammengestellt.

Tabelle 1 Übersicht und Struktur Vorschriftenwerk (nach [1])

Brandschutznorm [3] (Grundlagen)	Was ist zu tun?
Brandschutzrichtlinie [4] (21 Richtlinien)	Wie ist es zu tun?
Arbeitshilfen [5] (7 Arbeitshilfen)	Nutzungsorientierte Zusammenstellung (Vollzugshilfen) z. B. Hochhäuser
Brandschutzerläuterungen [6]	Ergänzungen zu speziellen Themen (Vollzugshilfen) z. B. Doppelfassaden

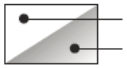
Beispielhaft sollen anhand der Brandschutzrichtlinie "Schutzabstände – Brandabschnitte" die Festlegung der notwendigen Anforderungen aufgezeigt werden. Die Anforderungen an den Feuerwiderstand und die Brennbarkeit tragender resp. brandabschnittsbildener Bauteile richten sich nach der Lage, Geschosszahl, Nutzung und Ausdehnung von Bauten oder Brandabschnitten. Es wird zwischen einem reinen baulichen- und kombinierten baulichen-/Sprinklerkonzept unterschieden. Die Tabelle 2 zeigt die Anforderungen an die Brandabschnittsbildung.

Hochhäuser sind darin nicht aufgeführt, da hier immer die Anforderung EI 90 aus nichtbrennbaren Baustoffen (nbb) ohne irgendwelche Möglichkeiten zur Reduktion besteht. Neben den normalen Nutzungen wie Wohn-, Büro- und Schulbauten sind in der Tabelle die Industrie und Gewerbebauten, Beherbergungsbetriebe, Räume mit großer Personenbelegung, Verkaufsgeschäfte und Parkhäuser aufgeführt. Diese Gebäude werden gemäß Verordnung über den vorbeugenden Brandschutz (VVB) [7] als Gebäude mit erhöhtem Brandrisiko angesehen, da hier Personen und Sachen auf Grund erschwerter Fluchtmöglichkeiten oder erschwertem Einsatz der Feuerwehr besonders gefährdet sind.

Neben den präskriptiven Anforderungen ermöglichen die schweizer Brandschutzvorschriften explizit schutzzielorientierte Maßnahmen. Anstelle der vorgeschriebenen Brandschutzmaßnahmen können alternativ andere Brandschutzmaßnahmen als Einzel- oder Konzeptlösung treten, soweit für das Einzelobjekt das Schutzziel gleichwertig erreicht wird.

Tabelle 2 Anforderungen an den Brandabschnitt (nach [4])

Anzahl Geschosse über Terrain / Nutzung	1 und oberstes Geschoss	2	3	4	5 – 6	7 – 8 ohne Hochhäuser
• Wohnbauten • Bürobauten • Schulbauten	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	**EI 30 (nbb)** / **EI 30** [2]	EI 60 (nbb) / **EI 60** [2] [3]	EI 60 (nbb)
• Industrie-/Gewerbebauten q bis 1000 MJ/m^2	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	**EI 30 (nbb)** / **EI 30** [2]	EI 60 (nbb) / **EI 60** [2] [3]	EI 60 (nbb)
• Industrie-/Gewerbebauten q über 1000 MJ/m^2 • Bauten unbekannter Nutzung	EI 30 (nbb) / EI 30	**EI 30 (nbb)** / **EI 30**	**EI 30 (nbb)** / **EI 30**	**EI 60 (nbb)**	**EI 60 (nbb)**	**EI 60 (nbb)**
• Beherbergungsbetriebe [a] z.B. Krankenhäuser	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)
• Beherbergungsbetriebe [b] z.B. Hotels	EI 30 (nbb) / EI 30	**EI 30 (nbb)** [4]	**EI 30 (nbb)** [4]	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)
• Bauten mit Räumen mit grosser Personenbelegung • Verkaufsgeschäfte [c]	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)	EI 60 (nbb)
• Parkhäuser • Einstellräume für Motorfahrzeuge	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	EI 30 (nbb) / EI 30	**EI 30 (nbb)** / **EI 30** [2]	EI 60 (nbb) od. EI 30 (nbb) [1] / **EI 60** [2] [3]	EI 60 (nbb) od. EI 30 (nbb) [1]



Brandabschnittsbildende Wände und Decken aus nicht brennbaren Baustoffen
Brandabschnittsbildende Wände und Decken aus brennbaren Baustoffen

Fett: Reduzierte Anforderungen bei Vorhandensein von Sprinkleranlagen

BRANDSCHUTZKONZEPT EUROPAALLEE BAUFELD A

Die unterschiedlichen Nutzungen und die Gebäudegröße der Europaallee Baufeld A führen unweigerlich zur Einstufung des Gebäudes als Gebäude mit erhöhtem Brandrisiko. Dieses wird deutlich in den hohen Brandschutzanforderungen. Es entstehen die Anforderungen aufgrund der Einstufung als Hochhaus, der Räume mit großer Personenbelegung (Versammlungsstätten mit mehr als 100 Personen), der Verkaufsgeschäfte etc..

Im Folgenden werden wesentliche sowie grundsätzliche Brandschutzmaßnahmen für den Gebäudekomplex dargestellt und darauf aufbauend anschließend schutzzielorientierte Konzeptlösungen erläutert. Wo es für den Gesamtzusammenhang notwendig ist, werden die präskriptiven Anforderungen kurz dargestellt. [8]

Baulicher Brandschutz

Grundsätzlich werden für Baustoffe und Bauteile Materialien mit Brandkennziffer 6.3 (nicht brennbar, nbb) verwendet. In gewissen Bereichen können brennbare Baustoffe eingesetzt werden. Diese müssen jedoch eine Brandkennziffer (BKZ) von mindestens 4.2 (mittelschwer brennbar, mittelstark rauchend) aufweisen. Eingesetzte Baustoffe und Bauteile dürfen im Brandfall weder brennend abtropfend noch giftige Gase entwickeln. Die verwendeten Materialien sind entweder nach den Vorgaben der VKF geprüft oder weisen – im Falle der Anforderung nichtbrennbar (BKZ 6 bzw. 6.3q) – alternativ ein Zertifikat mit der Qualität A bzw. A1 (= BKZ 6.3) resp. A2-s1.d0 (≈ BKZ 6.3q) nach EN 13501-1 / EN 1182 / EN 1716 / DIN 4102 resp. auch EN 13823 vor. Prüfungen der Kategorie B, C, D, etc. (nach EN, DIN, etc.) werden in Zürich nicht akzeptiert, da eine direkte Vergleichbarkeit der Zertifizierung von brennbaren Materialen nach den Vorschriften der VKF und ausländischen Vorschriften aufgrund der unterschiedlichen Prüfbedingungen nicht möglich ist.

Der Feuerwiderstand der Tragkonstruktionen des Gebäudekomplexes wird nach Ziffer 3.3 der VKF-Brandschutzrichtlinie "Tragwerke" [4] ausgelegt. Aufgrund der Einstufung als Hochhaus resultiert die Anforderung R 90 (nbb) an das Tragwerk. Das oberste Stockwerk kann ohne Feuerwiderstand erstellt werden. Für Tragwerke, die brandabschnittsbildend sind, gelten zusätzlich die Anforderungen an brandabschnittsbildende Bauteile.

Die Brandabschnittsbildung in Bauten und Anlagen richtet sich nach deren Bauart, Lage, Ausdehnung und Nutzung. In Brandabschnitte abzutrennen sind insbesondere aneinandergebaute und ausgedehnte Bauten und Anlagen, einzelne Geschosse, Korridore und Treppenanlagen, die als Flucht- und Rettungswege dienen, Vertikalverbindungen wie Aufzugs-, Lüftungs-, Installationsschächte, technische Räume, Räume unterschiedlicher Nutzung, insbesondere bei unterschiedlicher Brandgefahr [4]. Die Brandschutzabschlüsse (Türen, Revisionsöffnungen, Abschottungen etc.) in brandabschnittsbildenden Bauteilen müssen mindestens den Feuerwiderstand El 30 aufweisen.

Die einzelnen Nutzungen wie Hörsäle, Seminarräume, Sporthallen, Mensa einschließlich Küche, Bibliothek, Mall, Einstellhalle, Lager und Technikräume usw. sowie die einzelnen Fluchtwege (Korridore, Treppen, Schleusen) werden als eigene Brandabschnitte ausgebildet. Einzelne Nutzungen wie Bibliothek, Foyer etc. bilden geschossübergreifende Brandabschnitte. Die Mensaküche wird vom öffentlichen Mensabereich lediglich durch eine Rauchschürze abgetrennt. Weiter sind in dem Gebäude noch Kombi- und Großraumbüros. Die einzelnen Zellenbüros innerhalb des Großraumbüros können hier ohne Anforderung an den Feuerwiderstand ausführt werden.

Die Evakuierung des Gebäudes erfolgt über Korridore („notwendige Flure") und Sicherheitstreppenhäuser. Die Sicherheitstreppenhäuser werden bei diesem Gebäudekomplex aus Treppenhäusern mit einer Rauchschutzdruckanlage (RDA) ausgebildet. Bei Hochhäusern ist pro 600 m^2 eine Treppenanlage notwendig. Daraus resultieren bei einer Bruttogeschossfläche von 12.000 m^2 insgesamt 20 Sicherheitstreppenhäuser im gesamten Gebäudekomplex.

Mit den geplanten Notausgängen kann die zulässige Fluchtwegdistanz aus dem Raum von 20 resp. 35 m (ein resp. zwei Ausgänge aus dem Raum) bis in gesicherte Fluchtkorridore / Treppenanlagen oder ins Freie überall eingehalten werden. In den Kombi- und Großraumbüro werden die maximal zulässigen Fluchtwegdistanzen von 20 m aus den Zellenbüros und den Großraumbereichen von 20 m resp. 35 m eingehalten.

Im Gebäudekomplex sind mehrere Räume mit großer Personenbelegung vorhanden, die für die Ermittlung der Fluchtwegbreiten zu berücksichtigen sind. Dieses sind zum einen die Hörsäle sowie die Mensa, die Verkaufsfläche im EG sowie die Sporthallen. Die erforderliche Breite der Fluchtweg ergibt sich entsprechend der VKF- Brandschutzrichtlinie "Flucht- und Rettungswege".

- EG (Ausgangsgeschoss) 0.6 m pro 100 Personen
- OG 0.6 m pro 60 Personen
- UG 0.6 m pro 50 Personen

Die Grundlage zur Ermittlung der Fluchtwegbreite ist in Anlehnung an den Anhang der VKF- Brandschutzrichtlinie "Flucht- und Rettungswege" wie folgt festgelegt:

- Hörsäle 1.5 Personen / m² resp. Anzahl der vorhandenen Sitzplätze
- Sporthallen 1 Person / m² (Personenbelegung ist betrieblich sicherzustellen)
- Mensa 1 Person / m²
- Infozentrum 290 Personen insgesamt (230 Arbeitsplätze Mitarbeiter und Studenten (Bibliothek) zzgl. 25 % für Besucher)
- Verkauf EG 0.5 Personen / m^2

In allen oben aufgeführten Bereichen weisen die Fluchtwege von der Nutzung bis ins Freie – und zwar inkl. Tür-, Korridor- und Treppenhausbreiten – eine lichte Breite von mindestens 1,2 m oder ein höheres Vielfaches von 0,6 m (1,8 m, 2,4 m, 3,0 m, etc.) auf. In den weiteren Gebäuden bzw. Gebäudeteilen reichen aufgrund der vorgesehenen Nutzungen überall Türbreiten von 0,9 m im Lichten und Korridor- resp. Treppenbreiten von 1.2 m im Lichten.

Die Fassaden der Hochhäuser werden in allen Geschossen nicht brennbar ausgeführt. Sie werden durch geschosshohe Kastenfenster in Anlehnung an Doppelfassaden vom Typ A im Sinne der entsprechenden Brandschutzerläuterung [6] gebildet. Im Grundsatz resultieren hieraus und aufgrund des Sprinklervollschutzes folgende Anforderungen an die Brandabschnittsbildung im Doppelfassadenbereich: Geschosse / Räume, Segmentierung horizontal und vertikal: E 30 (nbb), Treppenhaus, Segmentierung vertikal: EI 60 (nbb).

Technischer Brandschutz

Das gesamte Gebäude wird brandmelderüberwacht. Je nach Gefahrenpotential resp. weiterer brandschutztechnischer Einrichtungen erfolgt eine Teil- oder Vollüberwachung. So werden der sogenannte Sockel (2. UG bis 1 OG; u. a. Einstellhalle und Mall) und eines der aufgehenden Gebäudeteile (Hochhausturm A23 mit Hörsälen, Mensa etc.) vollüberwacht. Hier gilt es unter anderem, die mechanischen Entrauchungsanlagen anzusteuern. In den aufgehenden Geschossen der weiteren Gebäudeteilen ist nur eine Überwachung der entrauchten Bereiche sowie der Fluchtwege zur Ansteuerung der Rauchschutzdruckanlage (RDA) notwendig.

Im gesamten Gebäude ist ein Sprinklervollschutz vorgesehen. Dadurch ist es möglich, auf eine massive, 0,90 m hohe Brüstung oder eine 1,50 m breite Kragplatte in EI 90-Qualität zur Vermeidung eines vertikalen Brandüberschlags zu verzichten. Weiter wird es dadurch auch möglich, mehrgeschossige Brandabschnitte auszubilden. Weitere Löscheinrichtungen sind Wasserlöschposten (für den Selbstschutz) und Innenhydranten (für den Feuerwehrangriff) sowie Handfeuerlöscher in Bereichen, in denen Wasser als Löschmittel nicht geeignet ist.

Je nach Personenbelegung, Geschosszahl, Bauart, Lage, Ausdehnung und Nutzung sind Gebäude oder Brandabschnitte mit ausreichend dimensionierten Rauch- und Wärmeabzugsanlagen auszurüsten. Aufgrund einer Personenbelegung von über 100 Personen (Räume mit großer Personenbelegung gemäß VKF) sind in diesem Gebäude die Mall, die Mensa, das Personalrestaurant der Bank, die Bibliothek, die Hörsäle, die Sporthallen sowie die geschossübergreifenden Foyers zu entrauchen. Aufgrund der Lage im UG und Größe von rund 7.200 m^2 ist ebenfalls in der Einstellhalle (Tiefgarage) eine Entrauchung notwendig. Gemäß den aktuellen behördlichen Vorgaben und den entsprechenden Randbedingungen [10], [11] kann eine Entrauchung durch natürliche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (NRWA), Entrauchung mit Brandlüftern der Feuer-

wehr (RWA mit BL) oder mit maschinellen Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (MRWA) realisiert werden. Daraus resultiert, dass in der Einstellhalle, den Hörsälen und einem der Foyers eine MRWA mit vorgegebenem Luftwechsel umgesetzt wird. Bei Räumen mit einer Personenbelegung von mehr als 1.000 Personen sind die für den Rauch- und Wärmeabzug erforderlichen Maßnahmen anhand spezieller Rauch- und Wärmeabzugskonzepte festzulegen [4], d. h. hier sind Entrauchungssimulationen notwendig. Das ist bei diesem Gebäudekomplex bei der Mall zu berücksichtigen. Alle weiteren notwendigen Entrauchungungen werden durch NRWA (teilweise mit Unterstützung der Nachströmung durch die Rauchschutzdruckanlage) sowie RWA mit BL realisiert.

Die innen liegenden Treppenhäuser in Hochhäusern sind als Sicherheitstreppenhäuser auszubilden und inkl. Zugangschleusen im Brandfall mit Überdruck zu belüften. Die Bemessung der hierfür und für die Feuerwehrlifte notwendigen Rauchschutzdruckanlagen (RDA) erfolgt auf Grundlage der SN/EN 12101-6 (2005) [12]. In Abstimmung mit der Brandschutzbehörde (hier: der Kantonalen Feuerpolizei) ist daraus die Gebäudeklasse D massgebend.

Abwehrender Brandschutz

Die Intervention der Feuerwehr erfolgt von innen über die Sicherheitstreppenhäuser oder Feuerwehraufzüge. Weiter stehen ausreichend Innenhydranten zur Verfügung. Aufgrund der Gebäudehöhe und -tiefe wird der Gebäudekomplex mit einer Gebäudefunkanlage ausrüstet, um einen raschen und zweckmäßigen Feuerwehreinsatz sicherzustellen. In der Stadt Zürich wird die Gebäudefunkanlage als digitale Anlage erstellt.

Für eine frühzeitige Alarmierung der anwesenden Personen wird der Gebäudekomplex im Bereich der Hochschule und Mall mit einer Beschallungsanlage in Anlehnung an die EN 60849 [13] ausgerüstet. Alle Fluchtwege, die Räume mit großer Personenbelegung sowie die Schulungsräume sind für die Installation mit entsprechenden Lautsprechern vorgesehen. Die Beschallungsanlage dient zum einen der Evakuierung im Brandfall / Ereignisfall aber auch für kritische Situationen wie AMOK-Übergriffe.

Bild 4 *Brandschutzplan für das Erdgeschoss (Illustration des Brandschutzkonzeptes)*

SCHUTZZIELORIENTIERTE KONZEPTLÖSUNGEN

Für die Mall einschließlich Verkaufsräumen wird ein nutzungsbezogener Nachweis einer ausreichenden Entrauchung mittels Ingenieurmethoden des Brandschutzes (Entrauchungssimulationen) erbracht. Im Brandabschnitt Mall/Verkauf stellen die einzelnen Verkaufsläden jeweils einen Entrauchungsabschnitt dar.

Unter anderem waren die Schutzzielparameter gemäß Tabelle 3 nachzuweisen.

Tabelle 3 Zeitabhängige Schutzzielparameter

Zeit [min.], ab Brandausbruch bis	Raucharme Schicht	Temperatur		Extinktionskoeffizient
		verrauchte Schicht	raucharme Schicht	raucharme Schicht
10 (ohne SPA oder sonstige Löschmassnah-men) resp. Auslösung Sprinkler	> 2.5 m über Boden und kein signifikanter Raucheintrag in die Mall	< ca. 200 °C (mit diesem Wert wird neben dem Personenschutz- vor Verbrennung aufgrund der Hitzestrahlung in der Rauchschicht auch ein Schutz vor Sekundärbränden und vor Flash-Over (im Bereich 500 – 600 °C) erreicht)	< ca. 50 °C	≤ 0,15 m^{-1}
30 (ohne SPA oder sonstige Löschmassnah-men)	> 1.5 m über Boden und kein signifikanter Raucheintrag in die Mall			

Die Schutzzielparameter sind im betrachteten Raum mit Ausnahme der unmittelbaren Nähe des Brandherdes einzuhalten. Unter „unmittelbarer Nähe des Brandherdes" wird im Zweifelsfall eine kreisförmige Fläche von 10 % der Gesamtraumfläche um den Brandmittelpunkt herum verstanden. Unter Raum wird der Brand- oder Entrauchungsabschnitt verstanden (die kleinere von beiden Flächen). Bei den Simulationen werden sowohl niedrigenergetische (Anstieg bis auf 150 kW innerhalb von 5 Minuten mit einem anschließenden konstanten Verlauf (steady state) über den Betrachtungszeitraum) sowie hochenergetische (500 kW/m^2 und schnelle Brandausbreitung) Brände berücksichtigt. Die Festlegung der Eingangsgrößen erfolgt nach [14].

Die ersten Brandsimulationen für die Verkaufsbereiche wurden mit natürlicher, einseitiger Nachströmung von der Mall ausgeführt. Eine Parameterstudie führte beim größen Entrauchungsabschnitt bei einer Entrauchungsleistung von 60.000 m^3/h zu ausreichenden Ergebnissen hinsichtlich Einhaltung der erforderlichen Schutzziele. Die Architekturplanung der weiteren Verkaufsläden erfolgt zur Zeit, sodass hier in Kürze die weiteren Brandsimulationsrechnungen durchgeführt werden können.

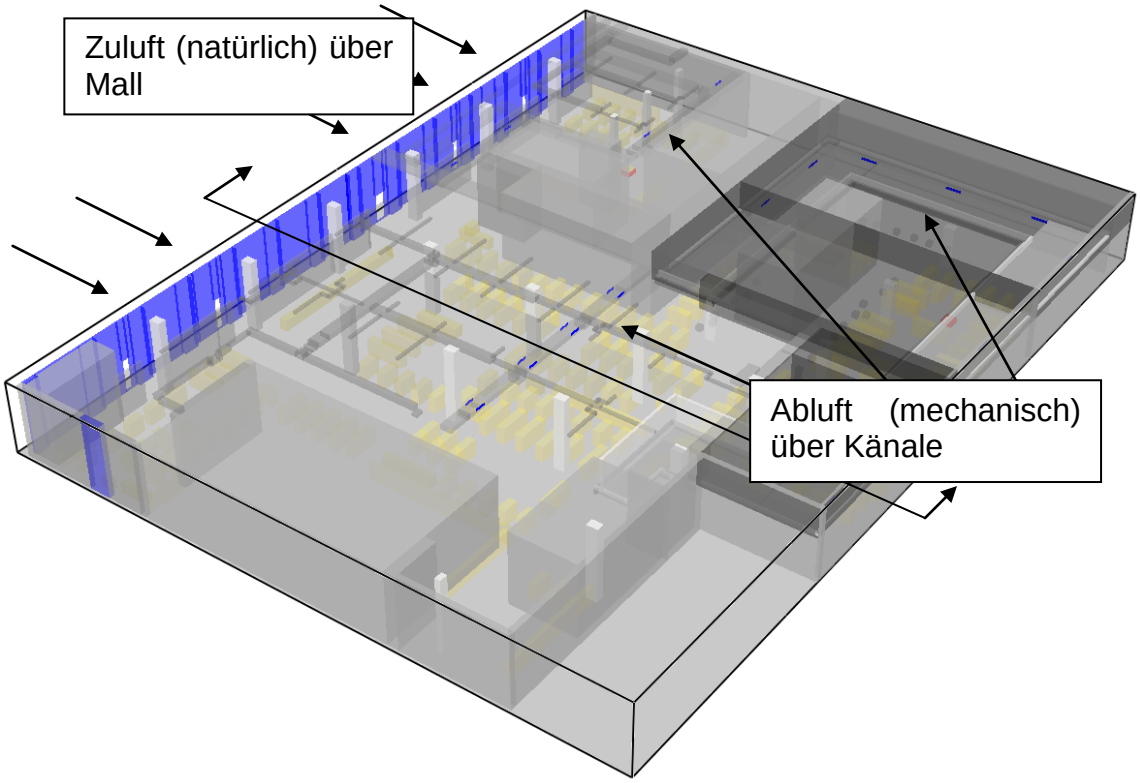


Bild 5 *Isometrie des grössten Entrauchungsabschnitts*

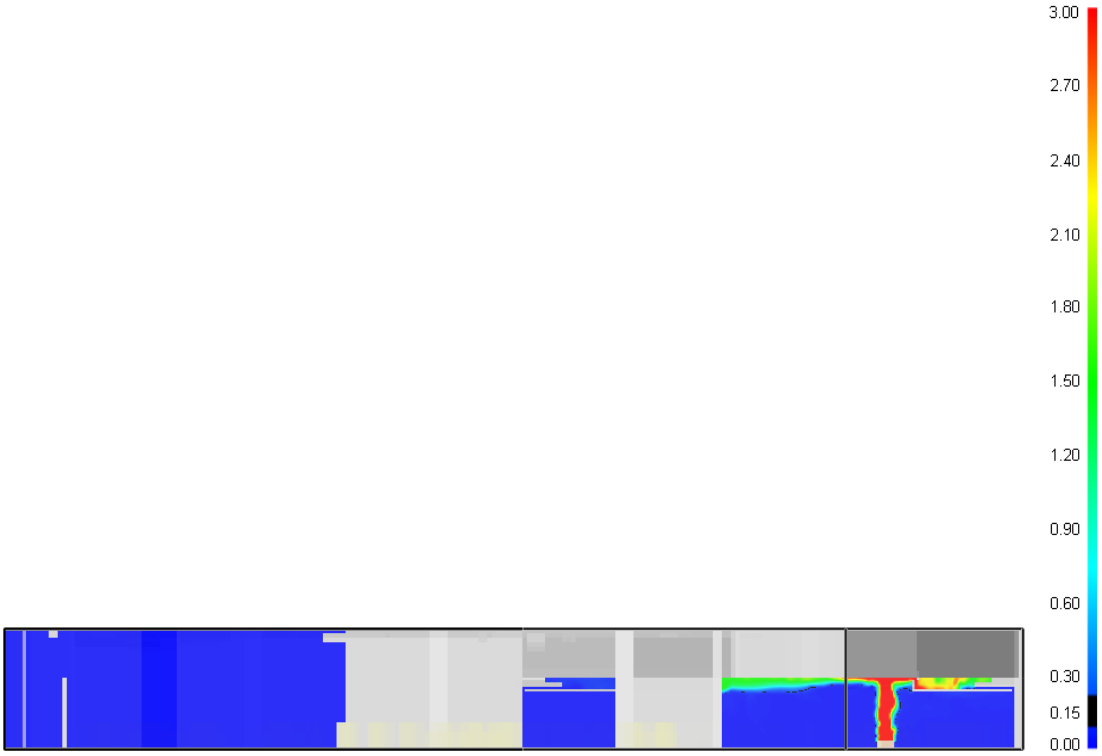


Bild 6 *Extinktionskoeffizient beim Niedrigenergiebrand nach 600 Sekunden (CFD Berechnung)*

Tragstruktur

Das bisherige Gebäude auf dem Baufeld A wurde nicht komplett zurückgebaut. Einzelne Gebäudeteile, vor allem in den Untergeschossen und ersten beiden Obergeschossen werden als bestehende Strukturen in das neue Bauwerk integriert. Das bisherige Gebäude auf dem Areal war das Postverteilzentrum der Stadt Zürich, stammte aus den 1970er Jahren und war kein Hochhaus. Die Betondeckung einzelner, nicht zurückgebauter Massivbauteile war nicht ausreichend, um eine Einstufung gemäss der SIA 262 (2003) [9] in R(EI) 90 (nbb) mittels Tabellenverfahren (= Nachweisstufe 1 nach Eurocode) vornehmen zu können. Durch eine Bemessung der Konstruktion unter Berücksichtigung der mechanischen Auslastung der Bewehrung und der tatsächlich vorhanden Temperatur in der Bewehrung (= Nachweisestufe 2 nach Eurocode) konnte in einzelnen Bereichen auf eine Ertüchtigung der vorhanden Konstruktion durch zusätzliche Putz oder Plattenbekleidung verzichtet werden.

Das oberste Stockwerk kann ohne Feuerwiderstand erstellt werden. Ein Versagen der Tragstruktur darf aber nicht dazu führen, dass die Integrität der Brandabschnittsbildung angrenzender Brandabschnitte (Fluchtwege, darunter liegende Geschosse) gefährdet wird. Diese Anforderung war besonders bei der Turnhalle zu berücksichtigen. Eine Sporthalle (eine sogenannte 3-fach Sporthalle) ist zuoberst im Gebäude A21 angeordnet. Das Dachtragwerk in diesem Bereich ist ein weitgespannter, ungeschützter Stahlrahmen. Hier wurden unterschiedliche Versagensmechanismen beurteilt, damit der Stahlrahmen ohne Feuerwiderstand ausgeführt werden kann.

UMSETZUNG DES KONZEPTES

Damit die geplanten Brandschutzmaßnahmen auch umgesetzt und somit wirksam werden, ist eine Qualitätssicherung Brandschutz während der Ausführungsphase unabdingbar.

Ziel der Qualitätssicherung Brandschutz ist nun die richtige Ausschreibung der Brandschutzmaßnahmen sowie die fachgerechte Umsetzung des Brandschutzkonzeptes bei der Ausführung. Dadurch soll erreicht werden, dass ein brandschutztechnisch mängelfreies Gebäude entsteht und die behördliche Bezugsbewilligung erteilt wird.

Die Qualitätssicherung Brandschutz ist sinnvoll und notwendig, da die technische Komplexität moderner Bauwerke stetig zunimmt und schutzzielorientierte Sonderlösungen umzusetzen sind. Eine weitere Notwendigkeit resultiert aus der häufiger werdenden behördlichen Auflage, eine Qualitätssicherung Brandschutz während der Ausführungsphase vorzusehen.

Bei komplexen Bauvorhaben erfolgt die Qualitätssicherung Brandschutz durch den Brandschutzingenieur. Das resultiert in vielen Kantonen aus den Auflagen im Bauentscheid wie das nachfolgende Beispiel aus der Stadt Zürich belegt:

„Aufgrund von Art. 11 der Brandschutznorm ist das Projekt von einem Brandschutzingenieur zu begleiten. Dieser bildet die Schnittstelle zur Feuerpolizei. Er ist für die Umsetzung des bewilligten Brandschutzkonzeptes verantwortlich. Anpassungen im Brandschutzkonzept werden durch ihn geprüft und in den Konzeptunterlagen nachgeführt. Er überwacht die Ausführung der baulichen und technischen Brandschutzmaßnahmen. Er überwacht und dokumentiert sämtliche Abnahmen des baulichen und technischen Brandschutzes und bestätigt der Feuerpolizei vor Bezug, dass das Projekt gemäß dem genehmigten Brandschutzkonzept ausgeführt wurde.“

Die Behörden ziehen sich in diesem Punkt immer weiter zurück und delegieren somit die Verantwortung für die Umsetzung der Brandschutzmassnahmen [15].

Die daraus resultierenden protokollierten Einzelbegehungen und periodischen stichpunktartigen Kontrollen dienen dazu, dass die Konformität mit den gültigen Normen und Richtlinien sowie die Übereinstimmung mit der Planung und dem bewilligtem Brandschutzkonzept gegeben ist sowie die Brandschutzauflagen erfüllt sind. Neben der baulichen Ausführung der Maßnahmen sind natürlich auch die Funktionssicherheit und das integrale Zusammenspiel der technischen Brandschutzeinrichtungen notwendig. Daher werden ergänzend die so genannten Integralen Tests durchgeführt und separat protokolliert. Das nachgeführte Brandschutzkonzept (Bericht und Pläne „as built“), die Dokumentation der Kontrollen vor Ort (einschließlich Mängelbeseitigung) sind wesentlich für die behördliche Bezugsfreigabe des Gebäudes [16].

Die Qualitätssicherung Brandschutz wird aktuell durchgeführt. Die Intensität der Qualitätssicherung wird permanent an den Baufortschritt angepasst, sodass ein eine weitgehend reibungslose Endabnahme im Herbst 2012 erfolgen kann.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der Stadt Zürich entsteht gerade ein neuer Stadtteil mit insgesamt acht Hochhäusern mit unterschiedlichsten Nutzungen. Ausgehend von einer kurzen Darstellung der schweizer Brandschutzvorschriften wird das Brandschutzkonzept des größten der Hochhäuser, das Bauvorhaben Europaallee Baufeld A20/A30 vorgestellt.

Aufgrund der Nutzung als Hochschule mit Hörsälen, Mensa, Sporthalle etc. sowie der Mall mit den Verkaufsgeschäften und der Banknutzung entsteht eine Vielzahl von brandschutztechnischen Anforderungen. Die konzeptionelle Umsetzung dieser Anforderung sowie die notwendigen schutzzielorientierten Konzeptlösungen werden aufgezeigt, mit denen ein ausreichender Personen- und Sachwertschutz erreicht wird.

Das Bauvorhaben befindet sich zurzeit in der Ausführungsphase. Die hier entstehenden Aufgaben für den Brandschutzingenieur hinsichtlich der Umsetzung des Brandschutzkonzeptes werden vorgestellt.

Neben dem Baufeld A, welches Ende 2012 bezogen werden soll, befindet sich das danebenliegende Baufeld C ebenfalls in der Ausführung. Die Ausführungsphase für das Baufeld E beginnt diesen Herbst. Beim Baufeld G beginnt im Herbst die Ausschreibung und das Baufeld H ist aktuell in der Entwurfsplanung. Die übrigen Baufelder B, D, F befinden sich in Wettbewerbsphase. Endgültig soll dieser neue moderne Stadtteil 2020 fertig gestellt sein.

LITERATUR

[1] Hess, E.: Neue Kompetenzordnung und flexiblere Brandschutzkonzepte mit den Neuen „Schweizerischen Brandschutz-vorschriften. In: Braunschweiger Brandschutz-Tage ´03: 11. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, 28.9. und 29.09.2005 in Braunschweig ; Kurzreferate. Braunschweig: iBMB, 2005, Heft 185.

[2] Neeracher, J.: Brandschutz in der Schweiz: Regelungsdichte versus Eigenverantwortung in BVPI Der Prüfingenieur 32 April 2008, Berlin.

[3] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner A (rot) daraus: Brandschutznorm, Bern, 01.01.2005.

[4] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner A (rot) daraus: Brandschutzrichtlinien, Bern, 01.01.2005.

[5] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner B (blau) daraus: Brandschutzarbeitshilfen, Bern, 01.01.2005.

[6] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen (VKF), Brandschutzvorschriften, Ordner B (blau) daraus: Brandschutzarbeitserläuterungen, Bern, 01.01.2005.

[7] Kanton Zürich, Erlass: Verordnung über den vorbeugenden Brandschutz (VVB), Zürich, 01.01.2005.

[8] Ernst, A., Schnetgöke, R.: Europaallee Baufeld A20/A30 – Brandschutz - konzept: Stand Baufreigabe. Zürich, 2009. (unveröffentlicht).

[9] SIA 262 (2003), Betonbau.

[10] Gebäudeversicherung Kanton Zürich, Kantonale Feuerpolizei, Merkblatt "RWA in Räumen mit grosser Personenbelegung", Zürich, Ausgabe 02.06.2009.

[11] Gebäudeversicherung Kanton Zürich, Kantonale Feuerpolizei, Merkblatt " Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) in Parkhäusern und Einstellräumen für Motorfahrzeuge", Zürich, Ausgabe 12.04.2006.

[12] SN/EN 12101-6: 2005, Rauch und Wärmefreihaltung - Teil 6: Festlegungen für Differenzdrucksysteme.

[13] SN/EN 60849 (1999), Elektroakustische Notfallwarnsysteme.

[14] Kasburg, J., Bucher, K., Eng, R., Mülli, L.: SSI-Spezial, Sonderausgabe zum Thema "Brandsimulationen im Hochbau" 1/09, CFD-Brandsimulationen im Hochbau, Aktuelle Auslegeordnung, Simulationsgrundlagen, Best Practice, SSI, Schweizerische Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater, Küsnacht, Januar 2009.

[15] 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.

[16] 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.

EIN HOTEL IN DEN TROPISCHEN REGENWALD – FORTSCHREIBUNG DES BRANDSCHUTZKONZEPTES FÜR DIE GRÖSSTE HALLE DER WELT

Udo Kirchner
HALFKANN + KIRCHNER, Erkelenz und Berlin

EINLEITUNG

Im Zusammenhang mit einem ambitionierten Transport- und Logistikkonzept unter Einsatz von Frachtluftschiffen entstand Ende der 1990er Jahre auf einem aufgelassenen Flugplatz im Spreewald etwa 80 km südlich von Berlin eine Werfthalle mit gewaltigen Ausmaßen. Als sich in der Umsetzung dieser Idee erhebliche Probleme einstellten, wurde für das fertig gestellte Hallengebäude eine neue Verwendung gesucht und mit dem Freizeit- und Badepark „Tropical Islands“ gefunden. Über dieses Projekt wurde anlässlich der Braunschweiger Brandschutz-Tage 2004 berichtet und als Fazit festgestellt - Zitat:

„Das Projekt ist auch ein ideales Beispiel dafür, in welch starkem Maße Brandschutzkonzepte an spezifischen Nutzungen angepasst werden müssen - und angepasst werden können. Dieser Aspekt wird für die berufliche Tätigkeit der Brandschutzingenieure gerade in Zeiten an Bedeutung zunehmen, in denen die ehemaligen Nutzungsabsichten aus wirtschaftlichen Gründen aufgegeben werden oder zum schonenden Umgang mit Ressourcen Bestandsimmobilien neuen Zwecken zugeführt werden.“

Diese Einschätzung bestätigte sich zwischenzeitlich für das Projekt als Vorhersehung. Während der weitere Ausbau der Nutzung in den Hallenrandbereichen noch in kontinuierlicher Fortschreibung und Konkretisierung des Brandschutz-Basiskonzeptes bearbeitet werden konnte, ergab sich Anfang des Jahres 2011 eine deutlich veränderte Bewertung aus der Nutzer-Absicht, innerhalb des Hallenraumes umfangreiche Übernachtungseinrichtungen mit Zwei-Bett- sowie Drei-Bett-Appartements in mehrgeschossigen Gebäuden einzuplanen.

Dieser Beitrag beschreibt die brandschutztechnische Bearbeitung im systematischen Vorgehen und den gefundenen Lösungen und vertieft insbesondere die hierbei verwendeten ingenieurmäßigen Nachweise.

GEBÄUDE UND NUTZUNG

Die Werfthalle besitzt eine maximalen Länge von ca. 360 m und eine maximale Breite von ca. 210 m und bei ovalem Grundriss eine Fläche von etwa 63.000 m² mit einer lichten Höhe von etwa 108 m. Sie gliedert sich in einen Halbzylinder, der über fünf Bogenbinder im Achsabstand von jeweils 35 m ausgeführt wurde, und beiderseits anschließende Halbkugeln, die ehemals durch öffenbare Schalentore gebildet wurden.

Die tragenden Bauteile sind in ungeschützter Stahlkonstruktion für den Bogenbinder als Viergurt-Fachwerk mit etwa 9 m Konstruktionshöhe zu beschreiben. Im Firstbereich befindet sich ein Längsträger, ebenfalls als Stahlfachwerk, in welchen über den sog. „Königszapfen“ die Lasten aus den Torschalen einleiten.

Die Umfassungsbauteile sind im halbzylindrischen Bereich aus dem Bestand der Werfthalle an der Nordseite als zweischalige wärmegedämmte und hinterlüftete Membran aus vinylbeschichtetem Polyester hergestellt und zur Südseite im Zuge des Projekt Tropical Islands durch transparente Folienelemente ausgetauscht. Zwischen den Obergurten der Bogenbinder und des Firstträgers sind jeweils 5 m breite Lichtband-Verglasungen ausgeführt, in welche auch die Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen als Lamellengeräte integriert wurden. Die Halbkugel-Schalen haben eine Blechverkleidung erhalten.

Bild 1 zeigt eine Luftaufnahme der seinerzeitigen Werfthalle zum Zeitpunkt der Errichtung.

Bild 1 Außenansicht der errichteten Werfthalle

Bereits für die Nutzung als Werfthalle wurden an beiden Längsseiten jeweils sog. Sockelbauten in Massivbauweise als Erdgeschoss-, Obergeschoss- und Galerieebene errichtet und an der Außenwand mit großflächigen Verglasungen gestaltet.

Bild 2 dokumentiert einerseirs den gewaltigen freien Luftraum der Werfthalle mit den seitlich anschließenden Sockelbauten unter Veranschaulichung der Proportionen einem LKW in Hallenmitte.

Bild 2 Innenansicht der errichteten Werfthalle

Für die Freizeit- und Veranstaltungsnutzung als „Tropical Islands“ wurde in Hallenmitte ein zweigeschossiges sog. Servicegebäude errichtet und mit einem Erdhügel auf insgesamt 12 m Höhe überschüttet, der als tropischer Regenwald auf etwa 9.300 m² Fläche vielfältige tropische Bäume und Pflanzen aufnimmt, die über eine etwa 1 km lange Behinderten gerechte Wegeführung erschlossen werden. An der Hallensüdseite ist ein tropisches Meer mit etwa 3.900 m² halbkreisförmiger Wasserfläche und einem Sandstrand sowie Liegeflächen auf unterschiedlichem Höhenniveau zu insgesamt etwa 11.000 m² Gesamtfläche gestaltet. An der Nordseite ist eine weitere Wasserfläche als sog. Lagune angeordnet.

Die zum Teil importierten und im originalen Baustil errichteten sog. tropischen Häuser wurden zwischenzeitlich zumeist für weitere Gastronomienutzung ausgebaut und durch vielfältige weitere Einbauten mit Versorgungsnutzung ergänzt.

Für die betriebliche Klimatisierung / Temperierung wird oberhalb der Sockelbauten über ein Kanalnetz und entsprechende Düsen Warmluft eingeblasen, welche in vier außerhalb des Gebäudes stehenden Heizanlagen erzeugt wird.

In kontinuierlichen weiteren Ausbauten ist an der Westseite ein großzügiger Umkleidebereich und angrenzend eine Sauna- und Wellnesslandschaft entstanden sowie an der Ostseite der Kinder-Sandstrand „Tropicano“ und ein Rutschenparadies mit gewaltiger Höhe.

Für Übernachtungszwecke entstanden sehr bald zur raschen Nutzung einzelne Zeltdörfer. Zur Komfortsteigerung wurden zunächst im Obergeschoss des nördlichen Sockelgebäudes Designer-Appartements eingerichtet und weiterhin sog. Lodges an verschiedenen Stellen verteilt im Hallenraum in individueller Gestaltung erbaut. Die Bilder 3 und 4 zeigen beispielhaft diese Lodges als erdgeschossige Holzhütte integriert in den tropischen Regenwald bzw. Einzelgebäude im Eingangsbereich und damit die Vielfalt der Bauweisen.

Bild 3 *Lodges im tropischen Regenwald*

Bild 4 *Lodges als Einzelgebäude*

GRUNDZÜGE DES BRANDSCHUTZKONZEPTES

In vereinfachender und verkürzter Darstellung wurde als Maßnahme des *anlagentechnischen* Brandschutzes das Gesamtobjekt geschützt durch eine automatische Löschanlage / Sprinkleranlage, wobei teilweise spezifische Einzellösungen gefunden werden mussten. So wurden beispielsweise auch Stroh bedeckte afrikanische Hütten mit Löschanlage ausgestattet sowie der komplette Saunabereich. Objektschutzanlagen wurden für die Küchenbereiche ausgeführt.

Darüber hinaus ist eine automatische Brandmeldeanlage als Vollschutz installiert, die beispielsweise auch die Zeltbauten überwacht. Der Einbau von Wandhydranten und die Vorhaltung von Handfeuerlöschern ist obligatorisch.

Als Maßnahme des *abwehrenden Brandschutzes* wurde insbesondere die Ausweisung von zwei jeweils in Nordsüdrichtung verlaufenden Feuerwehr-Durchfahrten mit insgesamt sieben Bewegungsflächen im Hallenraum vorgesehen und zur Löschwasserentnahme entsprechende Überflurhydranten installiert. Die weitere Löschwasserversorgung ist über Saugbrunnen außerhalb des Hallengebäudes gewährleistet. Es ist also festzuhalten, dass angesichts der gewaltigen Hallenausdehnung eine Brandbekämpfung im Inneneinsatz der Feuerwehr vorgesehen und vorbereitet ist. Fragen zur Löschwasserrückhaltung waren im Zusammenhang mit der Wasseraufbereitung und Schwimmbadtechnik zu überprüfen, ließen aber die Einhaltung der Freigrenzen der Löschwasser-Rückhalte-Richtlinien nachweisen.

Im Hinblick auf den *baulichen Brandschutz* wurde die feuerbeständige Trennung bzw. Kapselung in Technik- und Lagerräumen umgesetzt sowie für die Sockelgebäude und das Servicegebäude eine Auslegung der tragenden Bauteile in der Feuerwiderstandsklasse F 90-A vorgenommen. Für die teilweise zweigeschossigen Baukörper wurden auf feuerbeständige Geschossdecken geachtet, so dass eine vertikale Brandausbreitung ausschließlich außerhalb der Gebäude bzw. im übrigen Hallenraum zu berücksichtigen ist. In diesem Sinne erfolgte auch die konsequente Schottung von Leitungen und Leitungsanlagen.

Die Tragkonstruktion des Hallengebäudes konnte im Hinblick auf die vorgenannten Kompensationsmaßnahmen und die nachfolgend noch näher dargestellten ingenieurtechnischen Nachweise in ungeschützter Stahlkonstruktion begründet und zugelassen werden.

Auch für die in originaler oder landestypischer Bauweise errichteten „Tropical-Houses“ wurde auf Anforderungen an Feuerwiderstand unter Voraussetzung des konsequenten Einbaues von Löschanlage verzichtet, sofern diese nicht für Übernachtungszwecke herangezogen werden.

Die Einzel-Lodges sind in jeweils feuerhemmender Bauweise nachgewiesen.

Im Hinblick auf die Begrenzung von Brandlasten wurden nichtbrennbare Baustoffe, insbesondere bei der Wärmedämmung verwendet, in definierten Einzelelementen musste allerdings auch auf schwerentflammbare Materialien ausgewichen werden. Die brennbaren Baustoffe der Hallenhülle konnten zugelassen werden, da sie nicht im unmittelbaren Bereich von Anbauten, sondern erst oberhalb der Sockelgebäude vorliegen.

Einen wesentlichen Schwerpunkt des Brandschutzkonzeptes bildet die Sicherstellung der Flucht- und Rettungswege. Hier wurde ein System zur Personenzahlerfassung installiert, wobei die Einbuchung am Haupteingang erfolgt und die Auswertung über ein hausinternes EDV-System auch online für die Werkfeuerwehr zur Verfügung steht. Infolge dieser kontinuierlichen Erfassung und Auswertung konnte plausibel nachvollzogen werden, dass die Maximalzahl der gleichzeitig anwesenden Personen auch im weiteren kontinuierlichen Ausbau der Randbereiche nicht angestiegen ist, sondern der Basisplanung aus dem Jahr 2004 entspricht bzw. diese mit Sicherheitsreserven unterschreitet. In Anwendung des in der Versammlungsstättenverordnung vorgegebenen Ansatzes von 1,20 m Breite je 200 darauf angewiesene Personen und einer festgelegten Gesamtpersonenzahl von 8.200 Menschen ermittelt sich eine erforderliche Gesamtausgangsbreite von 49,20 m, welche einer vorhandenen Gesamtbreite der Türen und Tore von 60,70 m gegenüber steht. Insoweit werden die Zugangstore für die Feuerwehrdurchfahrten nicht als Fluchtweg-Ausgang genutzt, sondern stehen unabhängig zur Verfügung.

Besonderer Wert gelegt wurde auf die bereichsweise Nachweisführung der Personenströme und Ausgangsanordnung, welche in Bild 5 für die Situation im Jahre 2004 und im Bild 6 für die Situation im Jahr 2010 entsprechend dem jeweiligen Ausbauzustand veranschaulicht ist.

In Auswertung nach § 7 (1) VStättVO ergibt sich für eine lichte Hallenhöhe von 108 m und unter Berücksichtigung einer maximalen Aufschüttung von etwa 11,70 m nach folgender Gleichung als zulässige Fluchtweglänge:

$$\text{max. L} = 30\ \text{m} + \frac{108m - 11{,}7m - 5{,}0m}{2{,}50m} \cdot 5{,}0m = 212\ \text{m}$$

Dabei wird die formale Begrenzung auf 60 m wegen des besonderen Entrauchungskonzeptes zunächst nicht berücksichtigt.

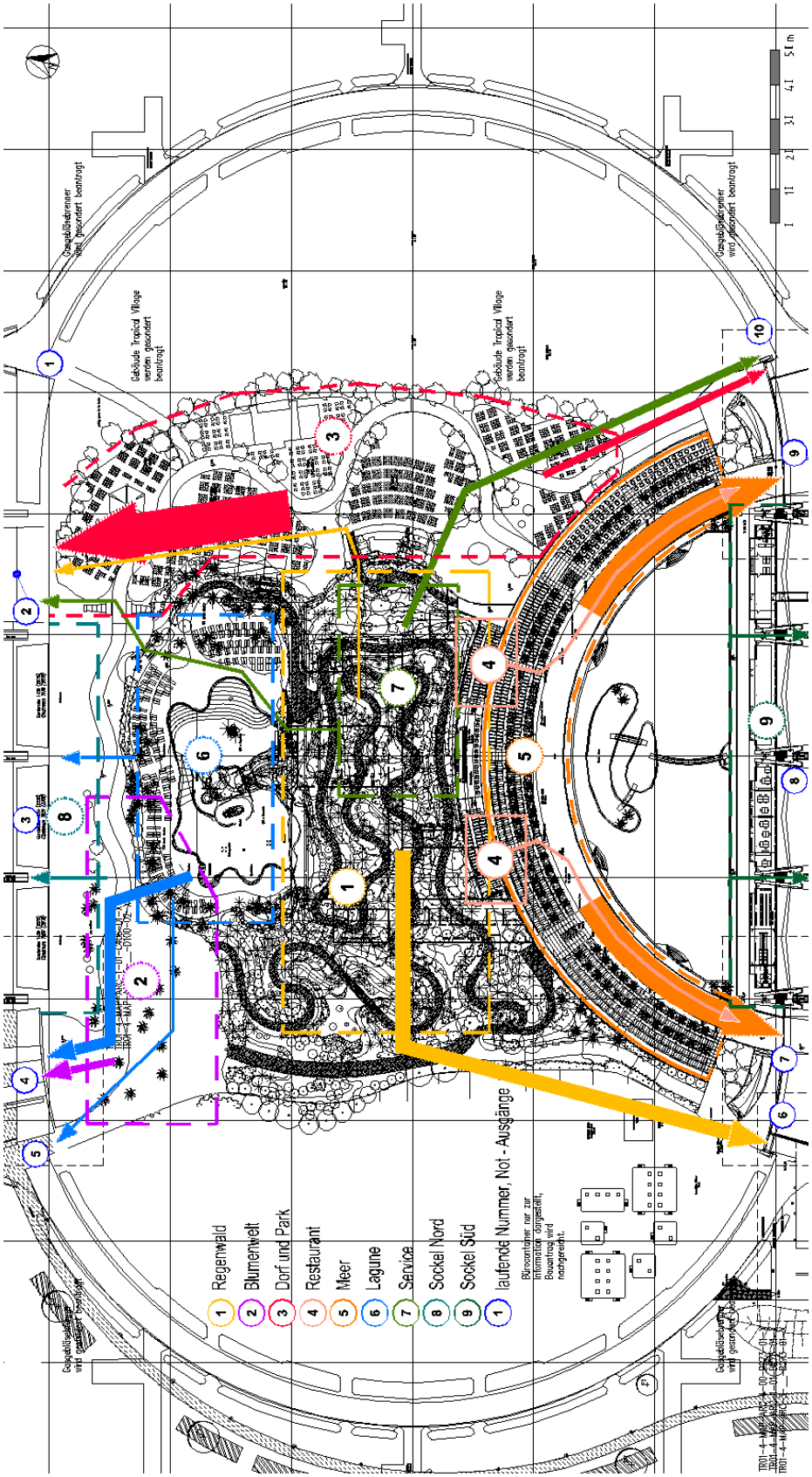


Bild 5 Ausgangsbreiten-Nachweis zum Stand 2004

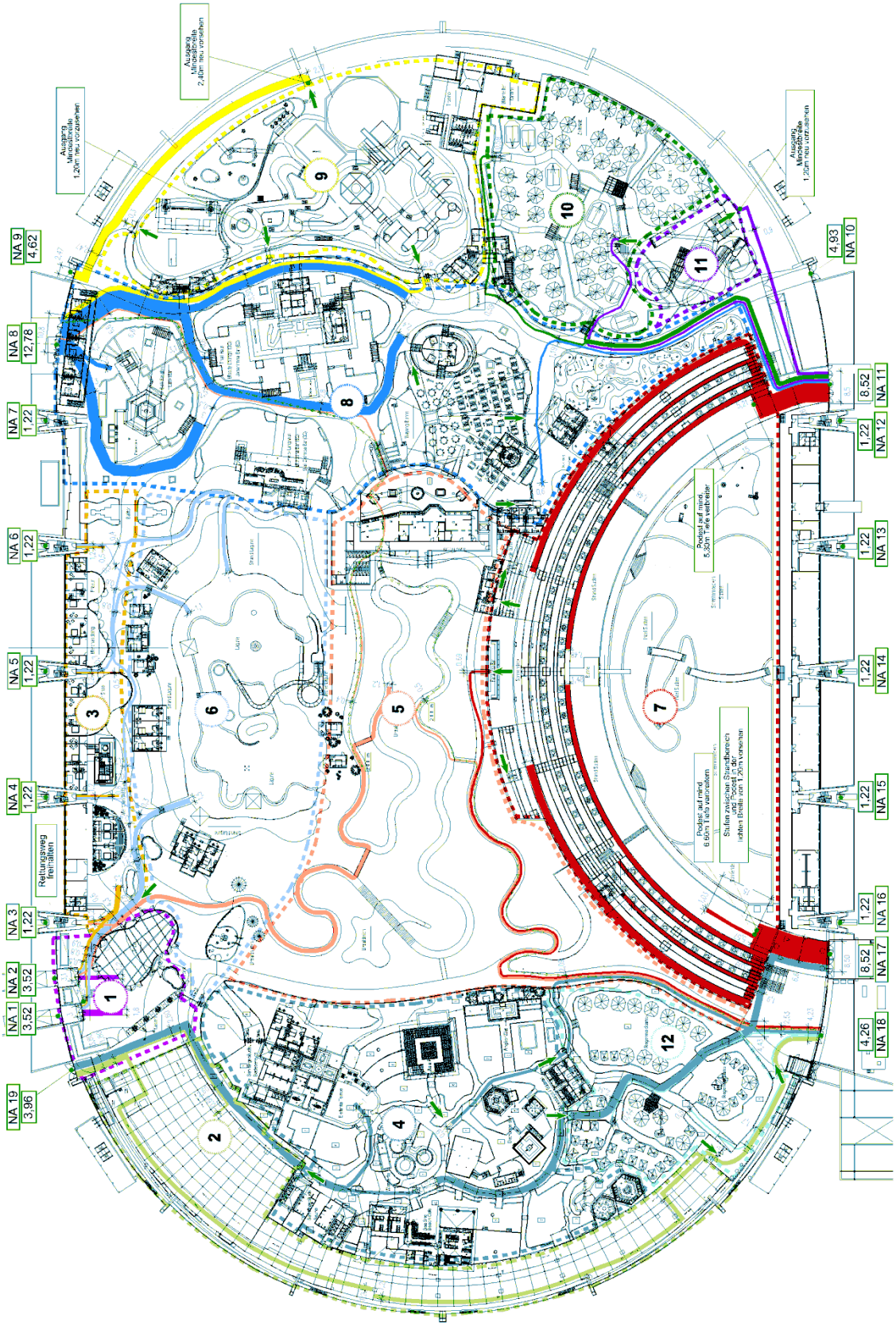


Bild 6 *Bereichsweise Ausgangsbreiten-Nachweis Stand 2010*

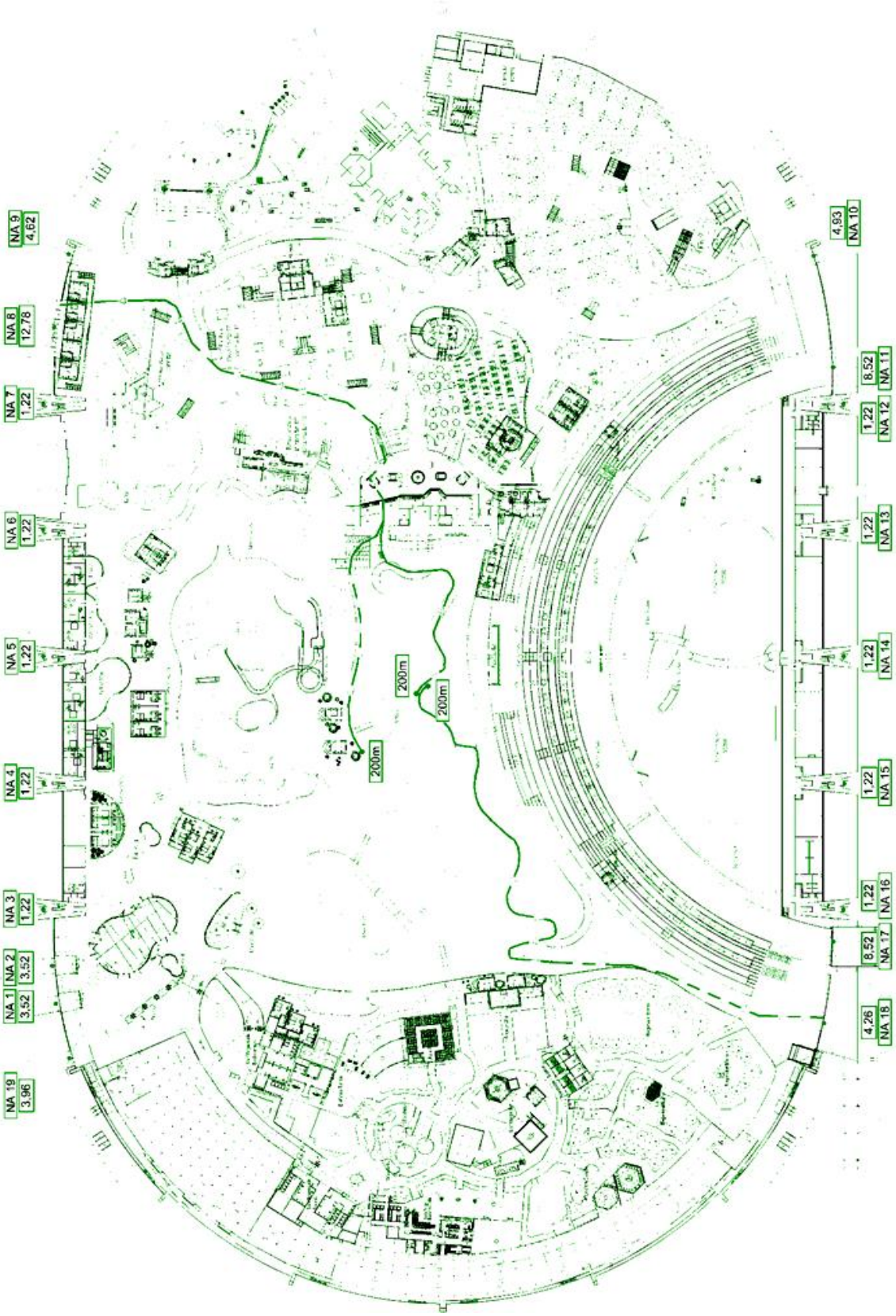


Bild 7 Nachweis der Fluchtweglänge, Stand 2010

FORTSCHREIBUNG DES BRANDSCHUTZKONZEPTES

Der beabsichtigte Bau weiterer Übernachtungs-Appartements betrifft ein zweigeschossiges Bauwerk an der Ostseite des Gebäudes vor dem Kinderklub „Tropino“ (nachfolgend Pos. 8 genannt) in einer Ausdehnung von ca. 80 m x 10 m mit insgesamt 24 Appartements und 72 Betten. Der Baukörper soll in einem Abstand von 2 - 3 m unmittelbar vor der Außenwand errichtet werden.

Des Weiteren ist an der Westseite oberhalb des Umkleidebereiches in einer Ausdehnung von etwa 52 m x 26 m auf drei weiteren Geschossen das sog. „Port Royal“ (nachfolgend Pos. 29 genannt) mit etwa 50 Appartements und entsprechend 150 Betten geplant.

Das Brandschutzkonzept für diese Gebäude muss in Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden zum einen die Mindestmaßnahmen der Beherbergungsstätten-Bauverordnung einhalten, da die Ausdehnung von 12 Beherbergungszimmern deutlich überschritten ist. In weiterer Zuordnung ist zu berücksichtigen, dass insgesamt jeweils mehr als 60 Gastbetten und auch mehr als 30 Gastbetten in einem Geschoss vorhanden sind - vgl. § 3 (1) BbgBeBauV. In der weiteren Differenzierung kann für die Lodges am „Tropino“ die Zuordnung mit nicht mehr als zwei oberirdischen Geschossen zu Grunde gelegt werden, während das „Port Royal“ weitere Obergeschosse aufweist.

Entsprechend dieser baurechtlichen Zuordnung werden die Maßnahmen des baulichen Brandschutzes stichpunktartig wie folgt umgesetzt.

- in Bauteilen und Geschossdecken, Pos. 8 feuerhemmend, Pos. 29 feuerbeständig F90-A;
- Trennwände zwischen den Beherbergungsräumen feuerhemmend nach § 5 (2) BbgBeBauV;
- Türen zu Beherbergungsräumen RS DIN 18095 nach § 7 (2) BbgBeBauV;
- Unterdecken und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen;
- sicherheitsbeleuchtete Piktogramme auf Abzweigen notwendiger Flure sowie Zugängen von Treppen und Treppenräumen;
- Schottungen von Leitungen und Leitungsanlagen bei Durchdringung von Geschossdecken und Trennwänden;
- akustische Alarmierungsanlagen gemäß § 9 (1) BbgBeBauV;
- Wandhydranten im Zugangsbereich der Treppenräume für Pos. 29.

Als wesentliche Maßnahmen und Kompensation im Zusammenhang mit der Anordnung innerhalb eines Hallengebäudes wird der Einbau einer Sprinkleranlage sowie einer automatischen Brandmeldeanlage als Vollschutz in allen Appartements vorgesehen.

Die Sicherstellung der Flucht- und Rettungswege erfolgt jeweils über zwei Treppenräume, die in entgegengesetzter Richtung angeordnet sind und einen unmittelbaren Ausgang auf Geländeniveau in das Freie besitzen, also unabhängig vom Hallenluftraum angeordnet sind. Gleichzeitig werden Stichflurlängen von maximal 10 m beachtet.

Über diese weitgehend konventionelle brandschutztechnische Bearbeitung hinaus, werden mit den beabsichtigten Gebäuden aber auch Besonderheiten des Brandschutzkonzeptes berührt: infolge der beabsichtigten Höhe werden teilweise Nachströmöffnungen der Rauch- und Wärmeabzugsanlage verdeckt, so dass sich die Querschnitte verändern. Des Weiteren ist als Modifizierung des Brandschutzkonzeptes seitens des Betreibers beabsichtigt, die Sammelplätze bei der Personenevakuierung zunächst innerhalb des Hallengebäudes auszuweisen, um auch bei ungünstiger Witterung die Menschen in Badekleidung mit Decken und Schuhwerk zu versorgen, bevor das Gebäude verlassen wird. Insgesamt resultiert also eine Situation, die ausschließlich auf Basis einer ingenieurmäßigen Risikobewertung bearbeitet werden kann.

AUSWERTUNG DER BRANDBELASTUNG

Als Basis für eine weitergehende ingenieurmäßige Bewertung wurde für den Gesamtbereich eine Brandlastrecherche in hilfsweiser Anwendung der DIN 18 230 Teil 1 durchgeführt. Hierzu wurden der Hallenbereich in insgesamt 13 Teilflächen gemäß der Darstellung in Bild 8 separiert und die Brandlasten im Detail erfasst. Dabei resultiert ein Großteil der Brandlasten aus Hölzern unterschiedlicher Art, Verarbeitung und Dichte, wobei für die Holzkonstruktionen an Lodges, Shops, Restaurants und entsprechend dem kompakten Gefüge eine Dichte von 650 kg/m³ angesetzt und der Abbrandfaktor m = 0,5 berücksichtigt wurde. Bei Reet- bzw. Strohdeckung wurde die Dichte zu 150 kg/m³ und der Abbrandfaktor m = 1,0 angesetzt. Für sonstige Holzbauteile wie Zaunanlagen etc. wurde je nach Verarbeitung und Konstruktion mit unterschiedlichen Abbrandfaktoren zwischen 0,5 und 1,0 gearbeitet.

Die Tropenbäume im Bereich des Regenwaldes wurden hinsichtlich ihrer Durchmesser in Gruppen unterteilt und unter vereinfachter Annahme einer exakten Zylinderform und einer überschlägigen Längenermittlung erfasst. Nach Literaturrecherche ist die Dichte mit 850 kg/m³, m = 0,5 anzusetzen. Darüber hinaus wurden Standardnutzungen wie Kantinen und Restaurant, Büro- und Verwaltungsflächen sowie die Einrichtung der Lodges (zusätzlich zur Baukonstruktion) mit flächenbezogenen Pauschalwerten angesetzt.

Die Brandlasterhebung wurde sowohl nach DIN 18 230 Fassung 1998 als auch nach DIN 18 230 Fassung 2010 durchgeführt. Bekanntermaßen besteht der wesentliche Unterschied darin, dass nach Neufassung Brandlasten an Anlagen und Einrichtungen, die von einer selbsttätigen Feuerlöschanlage geschützt werden, pauschal mit einer Mindestbrandbelastung von 15 kWh/m² bei der Ermittlung angesetzt werden dürfen.

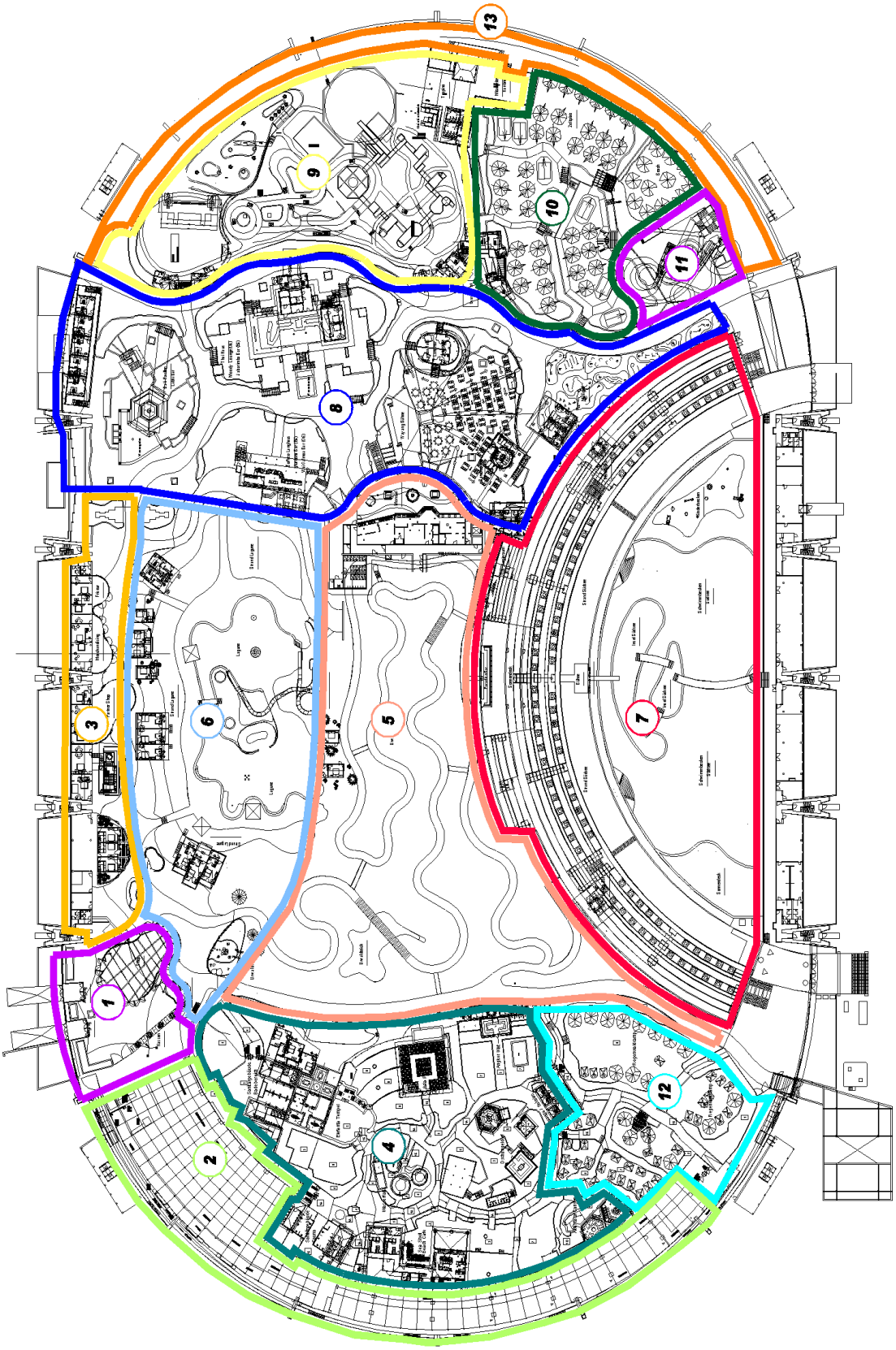


Bild 8: Teilbereiche der Brandlastrecherche

Bild 9 zeigt eine zusammenfassende Gegenüberstellung der für die einzelnen Bereiche ermittelten Brandlasten.

Zusammenfassung der Brandlastermittlung DIN 18 230 - Stand 1998 und DIN 18 230 - Stand 2010				
Bereich	Nutzung	bewertete Brandbelastung		
		DIN 18230-1998	DIN 18230-2010	Differenz
01	Eingang / Kassen	50,3 kWh/m²	35,3 kWh/m²	15,0 kWh/m²
02	Umkleiden	82,5 kWh/m²	82.5 kWh/m²	entfällt
03	Boulevard	189,4 kWh/m²	30,7 kWh/m²	158,7 kWh/m²
04	Sauna	70,3 kWh/m²	70,3 kWh/m²	entfällt
05	Regenwald	69,2 kWh/m²	64,1 kWh/m²	5,2 kWh/m²
06	Lagune	16,5 kWh/m²	7,8 kWh/m²	8,7 kWh/m²
07	Südsee	55,0 kWh/m²	54,1 kWh/m²	0,9 kWh/m²
08	Village	67,4 kWh/m²	26,5 kWh/m²	40,9 kWh/m²
09	Tropino	17,0 kWh/m²	15,5 kWh/m²	1,5 kWh/m²
10	Jugendzeltplatz	65,3 kWh/m²	65,3 kWh/m²	entfällt
11	Rutschen	34,0 kWh/m²	34,0 kWh/m²	entfällt
12	Regenwaldcamp	44,7 kWh/m²	44,7 kWh/m²	entfällt
13	Versorgungsgang Ostkurve	112,1 kWh/m²	59,2 kWh/m²	52,9 kWh/m²
Sonstiges	nicht zugeordnete Brandlasten	9,8 kWh/m²	9,8 kWh/m²	entfällt
Summe		**69,3 kWh/m²**	**54,8 kWh/m²**	**14,5 kWh/m²**

Bild 9 Zusammenfassung der Brandlastermittlung

Die in den Tabellen ausgewiesenen rechnerischen Brandbelastungen beziehen sich jeweils auf die gesamten Teilflächen, also einschließlich Verkehrswege und ggf. Wasserflächen. Auf die Darstellung der im Projekt ebenfalls ausgewerteten Punktbrandlasten wird an diesem Beitrag verzichtet.

NACHWEISE ZUR RAUCHFREIHALTUNG

Bereits mit dem seinerzeitigen Neubau als Werfthalle kam dem Nachweis der Rauchfreihaltung große Bedeutung zu, wobei in der seinerzeit geltende

Schutzziel-Angabe für den etwa 108 m hohen Hallenraum auch auf dem Niveau von etwa 80 m eine Rauchfreihaltung für Personen bei Montagearbeiten oder zu Wartungs- und Reparaturzwecken zu berücksichtigen war. Dies führte zu einer Dimensionierung mit einem gewaltigen Querschnitt von Abströmflächen, die im Firstbinder und den Bogenbindern angeordnet sind, sowie Nachströmflächen in den Glaslamellen oberhalb der Sockelbauten und innerhalb der Schalentore.

Für die Anlagenauslegung wurden umfangreiche Windkanaluntersuchungen im I.F.I. Aachen durchgeführt und im Ergebnis eine windrichtungsabhängige Steuerung in einer komplexen Matrix entwickelt. Bild 10 zeigt das Gebäudemodell im Windkanal des I.F.I.

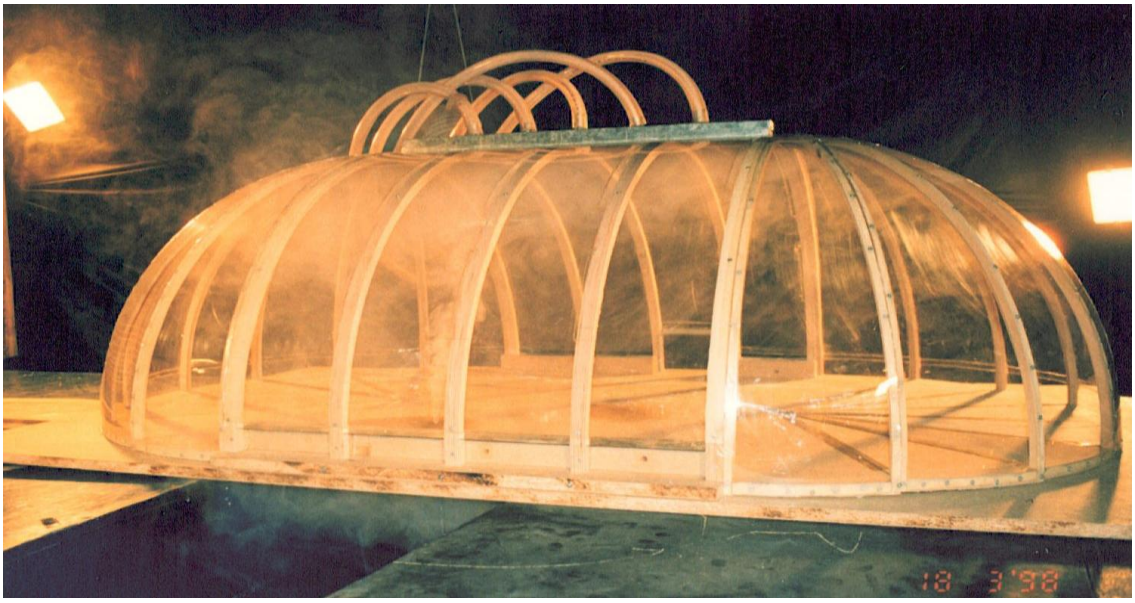


Bild 10 Modell im Windkanal I.F.I.

Mit der neuen Nutzung des Tropical Islands veränderten sich die Randbedingungen und bauaufsichtlichen Schutzziele, einerseits mit der erheblich größeren Besucherzahl und damit der gleichzeitigen Anwesenheit auch ortsunkundiger Personen, andererseits aber auch mit dem Umstand, dass als betriebsmäßig höchstes Aufenthaltsniveau die etwa 12 m hohe Aufschüttung in Hallenmitte, aber kein ständiger Aufenthalt im Hallenluftraum zu berücksichtigen ist.

Eine weitere Veränderung resultierte aus den modifizierten Klimabedingungen, die seinerzeit auf Basis einer gebäudetechnischen Simulation in Differenzierung eines sog. „Sommerfall“ gegenüber einem sog. „Winterfall“ ausgewertet wurden. Dabei wurden für die dargestellten Lüftungsszenarien in Abhängigkeit der vorgegebenen betrieblichen Lüftungs-Volumenströme mit Hilfe von Plumeformeln Brandszenarien mit einem 3,5 MW-Brand bzw. 25 MW-Brand ausgewertet, in dem Füllzeiten in Abhängigkeit der Rauchschichthöhen ausgewiesen sind.

Die Zusammenfassung dieser Näherungsberechnungen wurde in nachfolgender Grafik Bild 11 veranschaulicht.

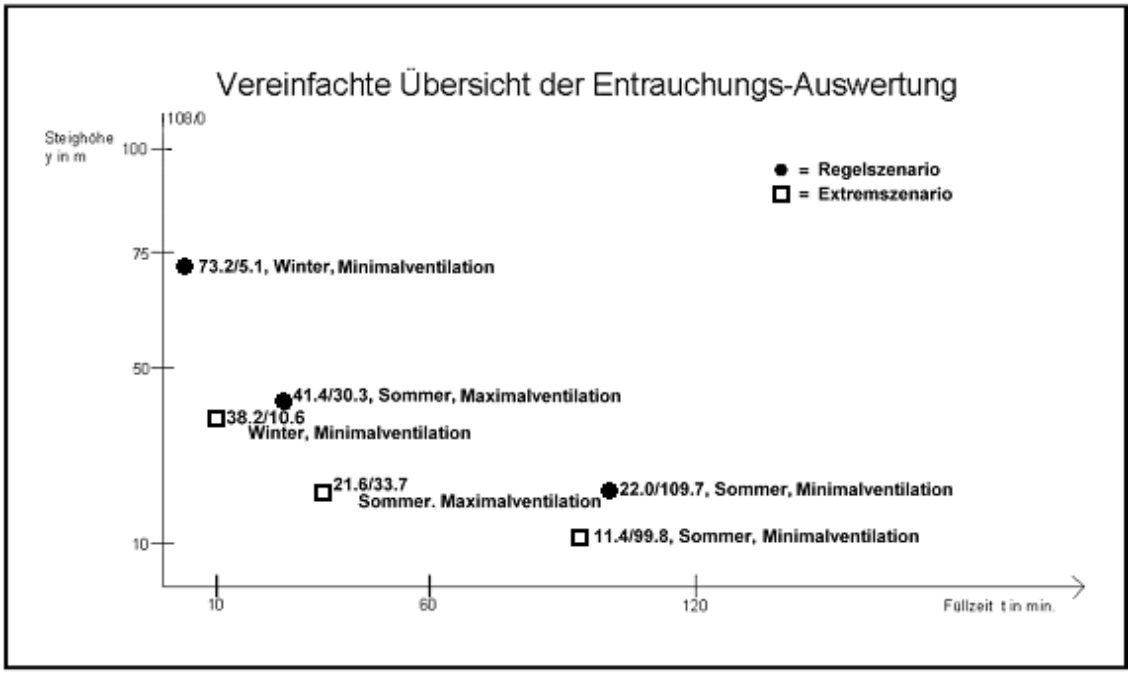


Bild 11 Zusammenstellung von Füllzeit und Unterkante der Rauchgasschicht

Im Fazit wurden für repräsentative Bemessungsszenarien eine erhebliche Höhe der raucharmen Schicht, für Extrem-Szenarien eine ausreichend große Füllzeit festgehalten und Sicherheitsreserven konstatiert. In diesem Zusammenhang konnten auch Bedenken gegen die Anordnung des Rutschenturmes als neues Bauteil größerer Höhe zurückgestellt werden.

Dieses Entrauchungskonzept mit einem frühzeitigen (windrichtungsabhängigen) Öffnen von Rauchabzugs- und Nachströmöffnungen führte in der betrieblichen Praxis jedoch zu Vorbehalten, insbesondere nach einer Fehlauslösung, die zur raschen Abkühlung des Hallenvolumens und einer Gefährdung der Bepflanzung führte. Aus gleichem Grund gestaltet sich eine kontinuierliche Prüfung und Wartung schwierig, da in diesem Fall nicht mehrere Auslösegruppen gleichzeitig geöffnet werden können.

Letztlich wurden aus der Erfahrung des Gebäudebetriebes die Randbedingungen der betrieblichen Lüftungstechnik modifiziert, sodass diese nicht vollständig den seinerzeitigen Berechnungsannahmen entsprechen und auch aus diesem Grund eine Anpassung / Fortschreibung erfordern.

KALIBRIERTE RAUCHVERSUCHE

Zur praktischen Überprüfung insbesondere von Szenarien des Entstehungsbrandes wurden am 21.12. und 22.12.2010 im Tropical Islands Dome kalibrierte Rauchversuche mit der patentierten Prüfapparatur „Smoke3“ durch das Büro Halfkann + Kirchner durchgeführt. Bei dieser Versuchsapparatur wird über drei Brennerringe die Luft erhitzt und eine konvektive Auftriebsströmung wie bei einem realen Brandgeschehen erzeugt.

Dem erhitzen Luftstrom wird ein Aerosolnebel oberhalb des letzten Brennerringes zugeführt. Es werden Aerosole mit langer Standzeit verwendet, sodass auch in dem deutlich über 120 °C erwärmten Auftriebsstrahl eine Zersetzung des Aerosolnebels nur in vertretbarem Maß stattfindet.

Bei der verwendeten Versuchseinheit wurden der Volumenstrom der erhitzten Luft und das zeitabhängige Temperaturfeld durch Messungen im iBMB Braunschweig kalibriert und somit verifiziert. Der simulierte Rauchgasvolumenstrom ist über Potenziometer regelbar. Die Brennerleistung innerhalb der Versuchseinheit, mit der der Luftstrom erhitzt wird, ist für jeden Brennerring über ein Druckregelventil einstellbar.

Die Versuche im Prüfinstitut wurden mit einer konvektiven Brennerleistung von ca. 210 kW gefahren. Der mit Aerosolnebel eingefärbte konvektive Luftstrom über der Versuchseinheit ist bei dieser Einstellung in 4 m Höhe mit mindestens 6 m³/s vorhanden. Die mittlere Temperatur des derart simulierten Rauchgas- / Luftgemisches beträgt dabei ca. 120 °C. Diese Daten entsprechen annähernd den Ergebnissen, die unter Berücksichtigung von Ähnlichkeitsgesetzen für ein reales Brandgeschehen mit einer Wärmeleistung von 1,5 MW auf einer Fläche von 3 m² anhand der Plumetheorie von Thomas und Hinkley anzusetzen sind.

Nachfolgend werden zwei Diagramme der im Prüfinstitut vermessenen Temperaturfelder (jeweils ein Quadrant oberhalb der Versuchseinheit) für unterschiedliche Messhöhen dargestellt.

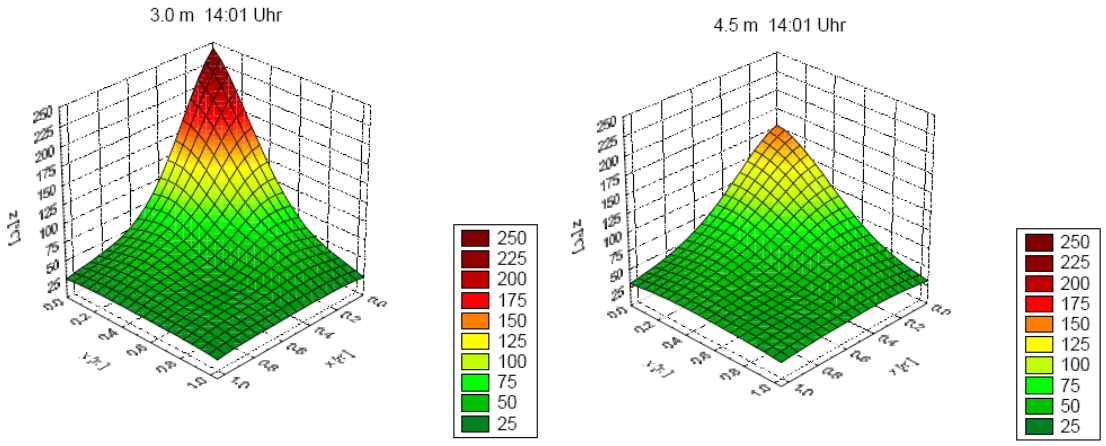


Bild 12 Temperaturverteilung oberhalb der Versuchseinheit bei Vermessung

Der Umstand, dass mit einer geringen Brennerleistung Wärmeströme von größeren Brandherden simuliert werden können, beruht darauf, dass die Energiefreisetzung bei der verwendeten Simulationseinheit nicht auf Bodenniveau wie bei einem realen Brand sondern in variablen Höhen über der Bodenfläche stattfindet. Somit werden die Verluste, die im Zuge der sonst üblichen Strahlformierung über einem realen Brand auftreten, vermieden.

Rauchversuche mit kalibrierten Versuchsapparaturen in der hier dargestellten Form stellen auch quantitativ ähnliche Rauchgasvolumenströme dar und sind somit zur direkten Bewertung von Rauchabzugsanlagen und Raumluftströmungen geeignet.

Im Objekt wurden die Rauchversuche an insgesamt fünf Standorten durchgeführt und zeigten zusammenfassend, dass in der untersuchten Brandentstehungsphase spezifische Strömungsvorgänge, welche ein thermikinduziertes Aufsteigen der Rauchgasströme negativ beeinträchtigen könnten, nicht zu erkennen sind.

Bild 13 Ort 1: Zwischen Jabarimba Bar und Jungle Lift

Bild 14 Ort 2: Wayang Bühne

Bild 15 Ort 3: Im Boulevard

Bild 16 Ort 4b: Borneo Langhaus

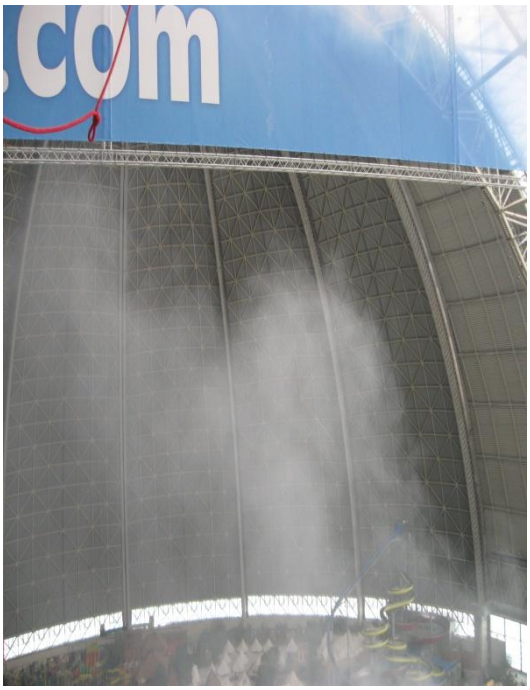


Bild 17 Ort 5: Regenwald

ORIENTIERENDE FELDMODELLSIMULATION

Um Erkenntnisse, insbesondere auch für fortschreitende Brandszenarien ergänzend zu dem Rauchversuch zu erhalten, wurden Feldmodellsimulationen mit der Programmsoftware FDS durchgeführt. Bekanntlich wurde diese speziell für die Berechnung von Bränden entwickelt und ermöglicht somit eine vergleichsweise einfache Simulation des Brandherdes. Die Gittergenerierung läuft automatisch, ermöglicht derzeit allerdings ausschließlich kubische Zellen, sodass spezielle Geometrien wie Schrägen und Rundungen treppenartig angenähert werden müssen. Das implementierte Turbolenzmodell erfordert eigentlich kleine Gitterzellen, was bei großen Modellen allerdings wiederum zu erheblichen Berechnungszeiten führt, sodass im speziellen Anwendungsfall einer zylindrischen bzw. kugelförmigen Geometrie mit gewaltigem Hallenvolumen ein bewusster Abwägungsprozess / Kompromiss in der Modellbildung vorzunehmen war.

Ausgewertet wurden Brandereignisse von 1,5 MW bzw. 25 MW im Bereich des Borneo-Langhauses entsprechend dem Ort 4 der durchgeführten Rauchversuche. Der Standort liegt am Übergang des zylindrischen in den halbkugelförmigen Teil der Halle und im Einfluss der betrieblichen Warmlufteinblasung und ist damit unter strömungstechnischen Aspekten von besonderem Interesse. Entsprechend dem modifizierten Brandschutzkonzept wird zunächst bei geschlossenen Rauchabzügen und Nachströmflächen das „Anfüllen“ des gewaltigen Hallenluftraumes mit Rauchgasen ausgewertet und erst nach der dreißigsten Minute das Öffnen vergleichsweise kleiner Rauchabzüge im Firstbereich vorgenommen.

Die Bilder 18 - 21 zeigen die Auswertung der Simulation jeweils zur 29. Minute vor Öffnen der Rauchabzüge und 31. Minute nach der Öffnung der Rauchabzüge.

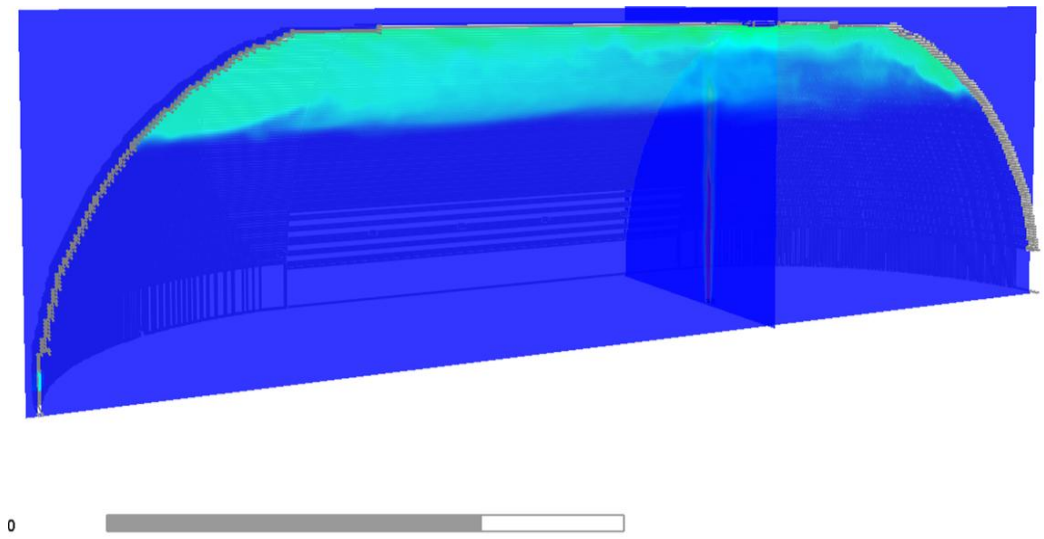


Bild 18 FDS-Simulation 1,5 MW, 29 min.

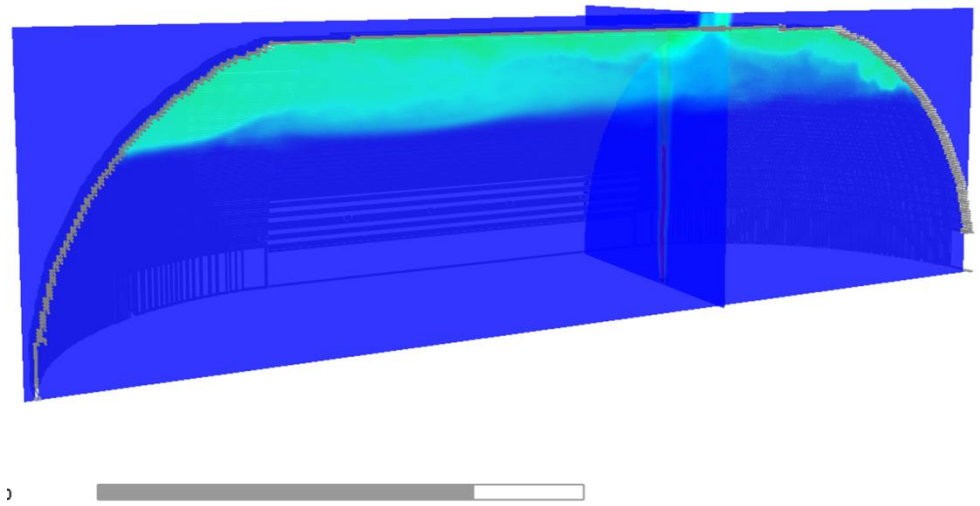


Bild 19 FDS-Simulation 1,5 MW, 31 min.

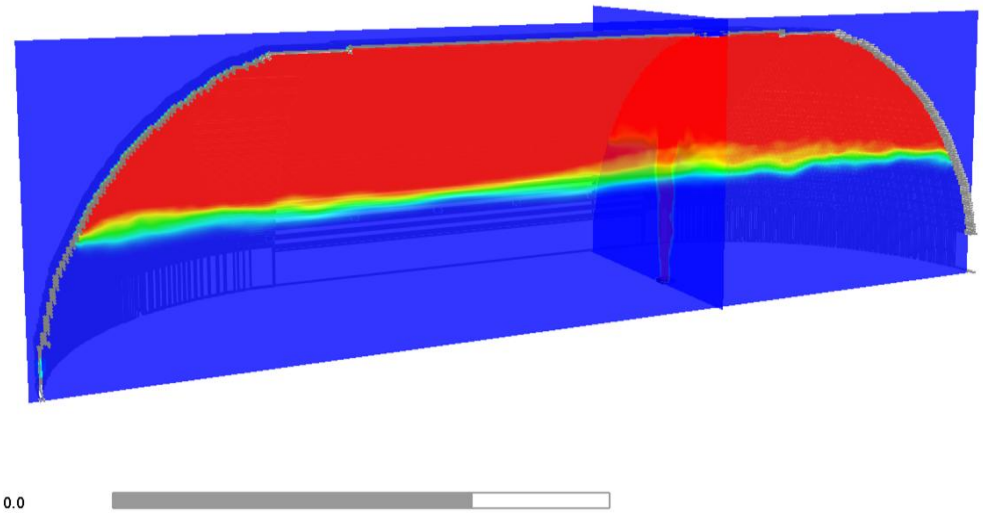


Bild 20 FDS-Simulation 25 MW, 29 min.

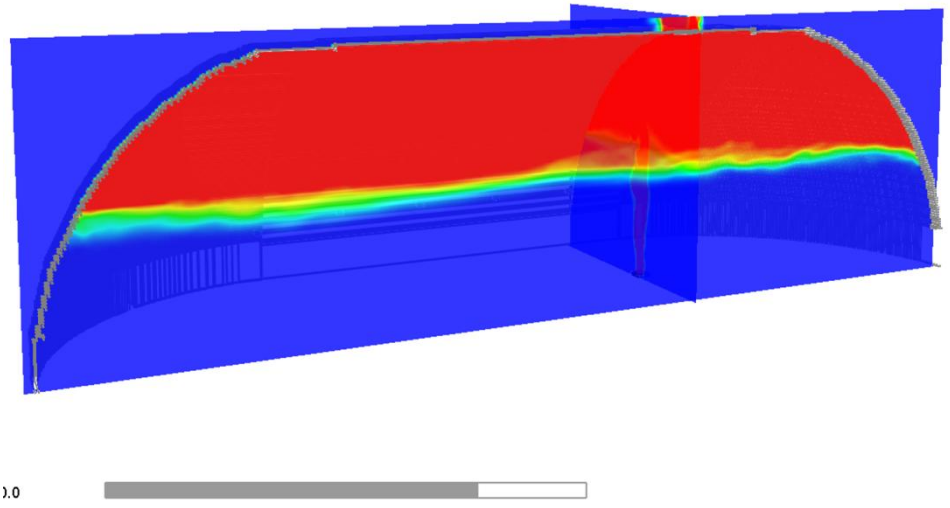


Bild 21 FDS-Simulation 25 MW, 31 min.

Im Ergebnis ergibt sich auch für das ausgedehnte Brandereignis eine vergleichsweise stabile Rauchschichtung in ausreichender Höhe. Für das energiearme Brandereignis werden keine wesentlichen Störungen durch die betriebliche Lüftung prognostiziert.

In einer genaueren Auswertung der Berechnungsergebnisse muss gerade diese Detailaussage allerdings hinterfragt werden, wie die Analyse der Geschwindigkeitsvektoren zeigt. In Bild 22 sind ein Querschnitt und ein Längsschnitt der Strömungsvektoren dargestellt wobei der Farbplott an unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeträgen kalibriert ist. Im Deckenbereich ist eine plausible Strömung auch unter Berücksichtigung eines Turbulenzmodelles abzulesen, die der prognostizierten Schichtenbildung entspricht. Im Randbereich zeigt allerdings insbesondere die Detailansicht im Bild 23, dass die durch die Warmluftgebläse induzierte Strömung nicht wie zu erwarten an der Außenwandhülle vorbeistreicht, sondern in der treppenförmigen Gittersimulation gleichsam abprallt und verwirbelt. Insoweit waren hier weitergehende, exaktere Auswertungen angezeigt.

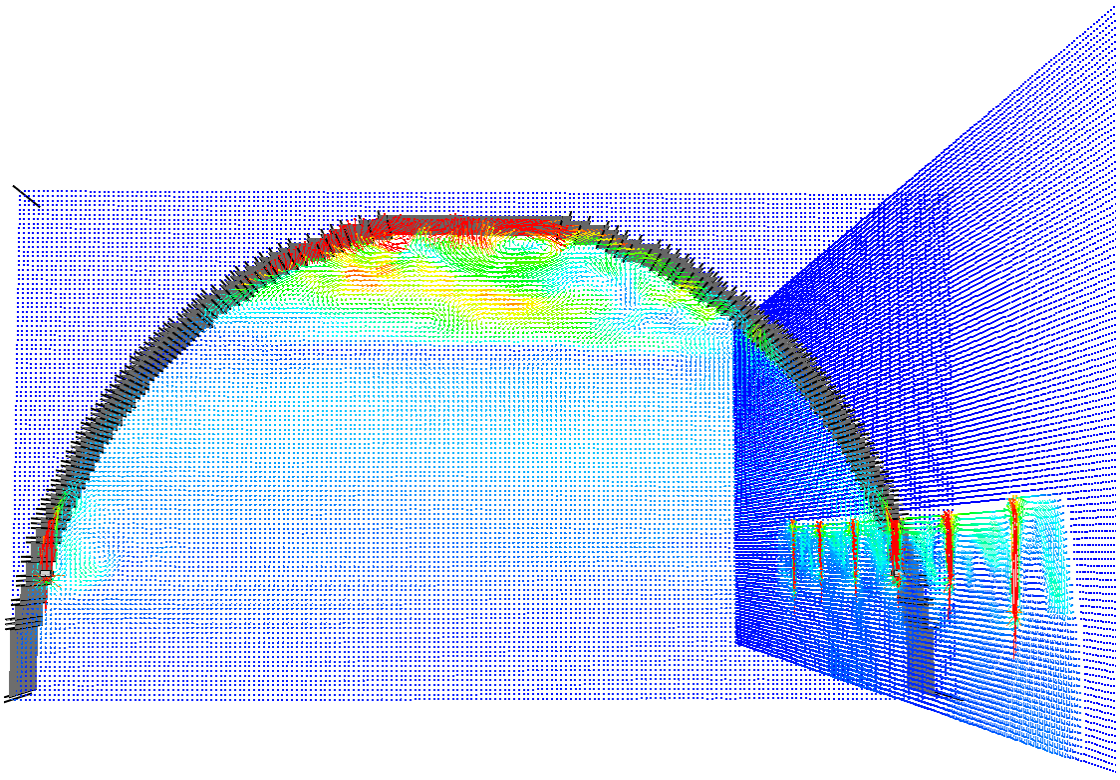


Bild 22 FDS-Simulation Geschwindigkeitsvektoren - Totale

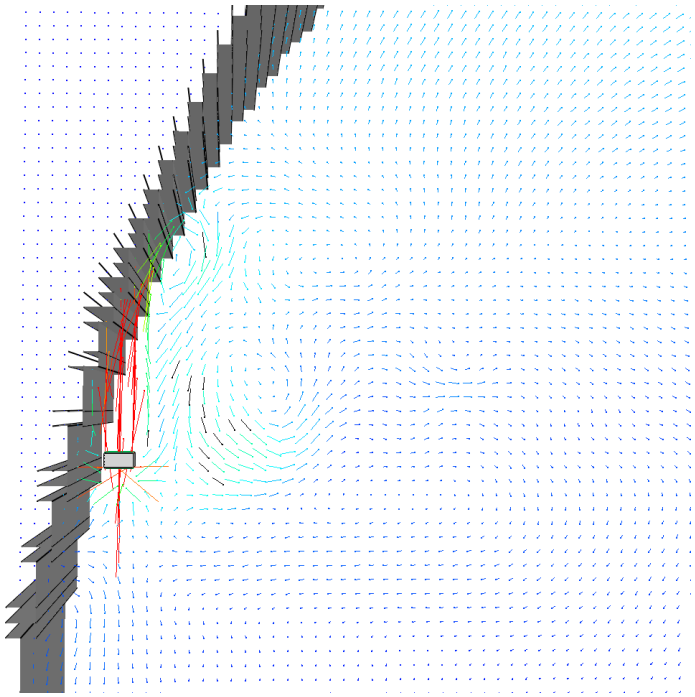


Bild 23: FDS-Simulation Geschwindigkeitsvektoren Ausschnitt Randbereich

WEITERGEHENDE STRÖMUNGSSIMULATION

Entsprechend der hohen Schutzzielanforderung im Beurteilungsobjekt muss im Brandschutzkonzept zuverlässig ausgeschlossen werden können, dass Rauchgase auch nicht durch lediglich lokale Einflüsse in Bereiche mit Personenaufenthalt getragen werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die rechnerische Simulation sowie die Detaillierung und Zuverlässigkeit ihrer Auswertung. Deswegen wurden für das Beurteilungsobjekt, insbesondere für Entstehungsbrandszenarien weitere Berechnungen mit der Programmsoftware CXF-Ansys durchgeführt, welche wegen der variableren Gitteradaption mit Hexaeder, Tetraeder und kubischen Zellen gerade in der Abbildung von Schrägen und Rundungen sowie der Definition verschiedener Zellgrößen innerhalb eines Gitters für die Anwendungsfall im konkreten Objekt Vorteile versprach. Des Wieteren ermöglichen die verschiedenen Turbulenzmodelle auch vergleichsweise große Zellen und lassen kürzere Berechnungszeiten auch für komplexe Geometrien und Modelle erwarten. Als weiterer Vorteil zeigt es sich, dass Auswertegrößen und Auswertebereiche ggf. erst nach Berechnung festgelegt werden müssen.

Gleichwohl zeigte sich in der konkreten Anwendung, dass die für vielfältige strömungstechnische Anwendungen entwickelte Software einen gewissen Aufwand in der Simulation des Brandherdes erfordert, andererseits aber auch die betrieblichen Lüftungsbedingungen realitätsnah einbinden kann. Darüber hinaus wurden sämtliche strömungsrelevanten Einbauten berücksichtigt, insbesondere die geplanten neuen Lodges. Bild 24 zeigt eine Isometrie des Gebäudemodells.

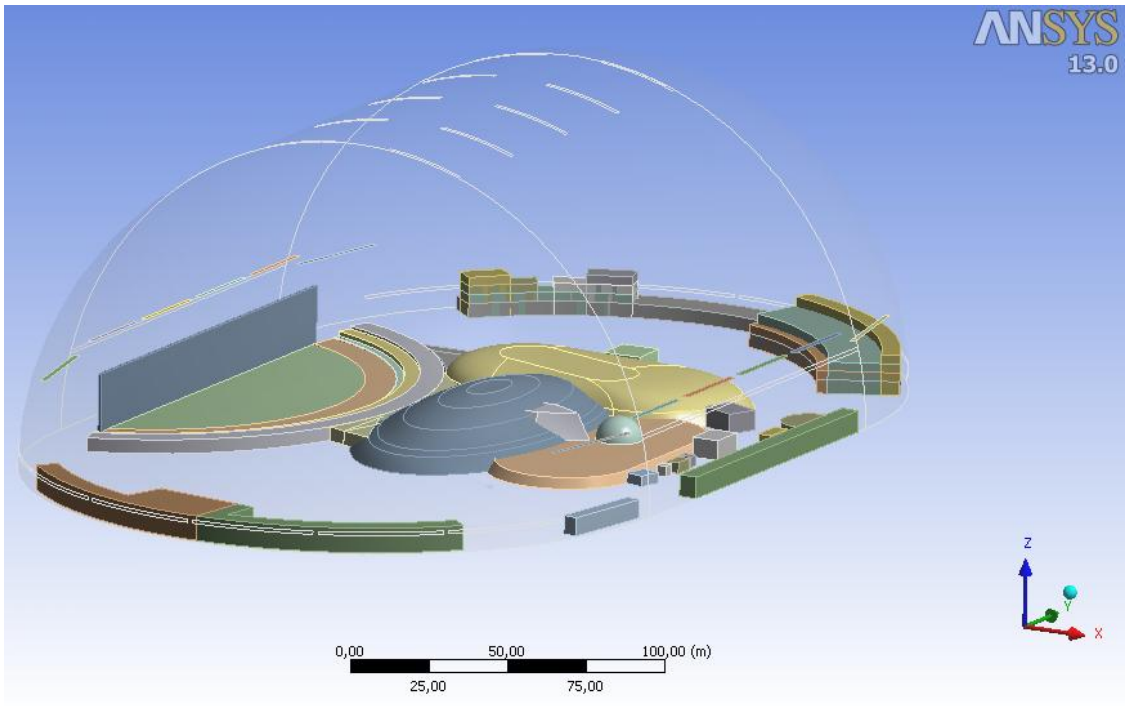


Bild 24 Gebäudemodell für ANSYS CFX

Für vorstehende Gebäudegeometrie wurde zunächst die betriebliche Lüftung simuliert und in sog. „Pathlines“ ausgewertet, welche die Strömungswege, beginnend an den Ausströmöffnungen der Lüftungsdüsen in das Raumvolumen, zeigen. Anhand der Skalierung werden dabei die Luftgeschwindigkeiten unterschieden, wobei die Farbe rot eine Geschwindigkeit von 0,5 m/s oder größer, hellgrün eine Geschwindigkeit von ca. 0,25 m/s und die blauen Farbtöne eine nochmals geringere Geschwindigkeit visualisieren, die üblicherweise nicht als störend empfunden wird.

In der Auswertung erkennt man die auch vor Ort spürbare nach unten gerichtete Luftströmung im Bereich der sog. „Königszapfen“ am Übergang vom Firstbinder zu den Schalentoren, welchen anhand der gelbgrünen Färbung eine Geschwindigkeit von etwa 0,20 m/s zugeordnet werden kann.

Es zeigt sich aber auch, dass außerhalb dieser Effekte keine weiteren Bereiche im Gebäude mit derart spezifischen Strömungsverhältnissen vorliegen und daher nicht näher untersucht werden müssen.

In der Simulation des 1,5 MW Brandes ist nunmehr auch der Einfluss der betrieblichen Warmluft-Einblasung zutreffend abgebildet, wie aus dem Querschnitt der Temperaturverteilung in Bild 26 ablesbar ist.

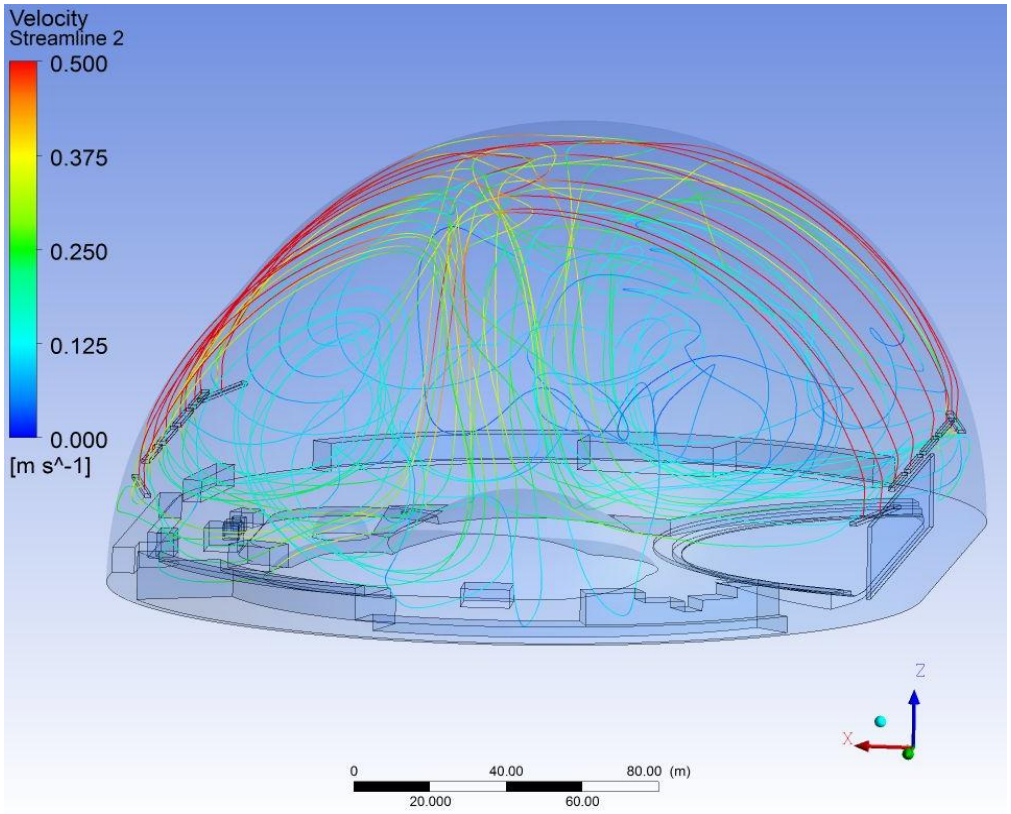


Bild 25 Pathlines der luftinduzierten Raumströmung

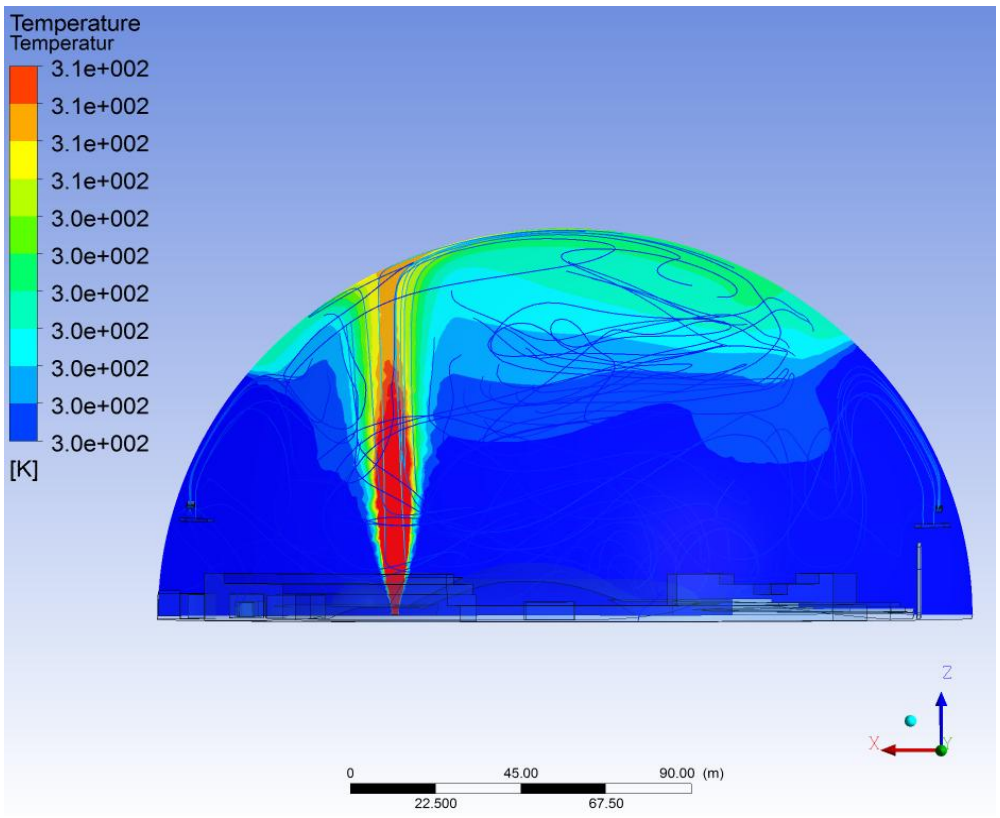


Bild 26 CFX-1,5 MW Temperaturauswertung

Mit dieser Plausibilitätsprüfung kann auch der zeitabhängige unmittelbare Verlauf der Rauchgaskonzentration als realistisch nachgebildet bewertet werden. Die Bilder 27 - 30 zeigen für die Zeitschritte von 5 - 20 min sehr differenzierte Verhältnisse für die Rauchgasverteilung im Einfluss der berücksichtigten äußeren Randbedingungen. Die Darstellung ist dabei bis zu einer Verdünnung von 5×10^{-4} entsprechend einer 2000fachen Verdünnung aufgelöst, also mehr als eine Zehnerpotenz geringer als die nach Literaturangaben „kritischen Werten". Vor allem belegt aber auch diese exaktere Auswertung, dass ein lokales Herabfallen von Rauchgasen nicht zu befürchten steht. Damit lässt sich auch nach dieser exakten ingenieurtechnischen Einschätzung eine Beeinträchtigung durch Rauchgase ausschließen.

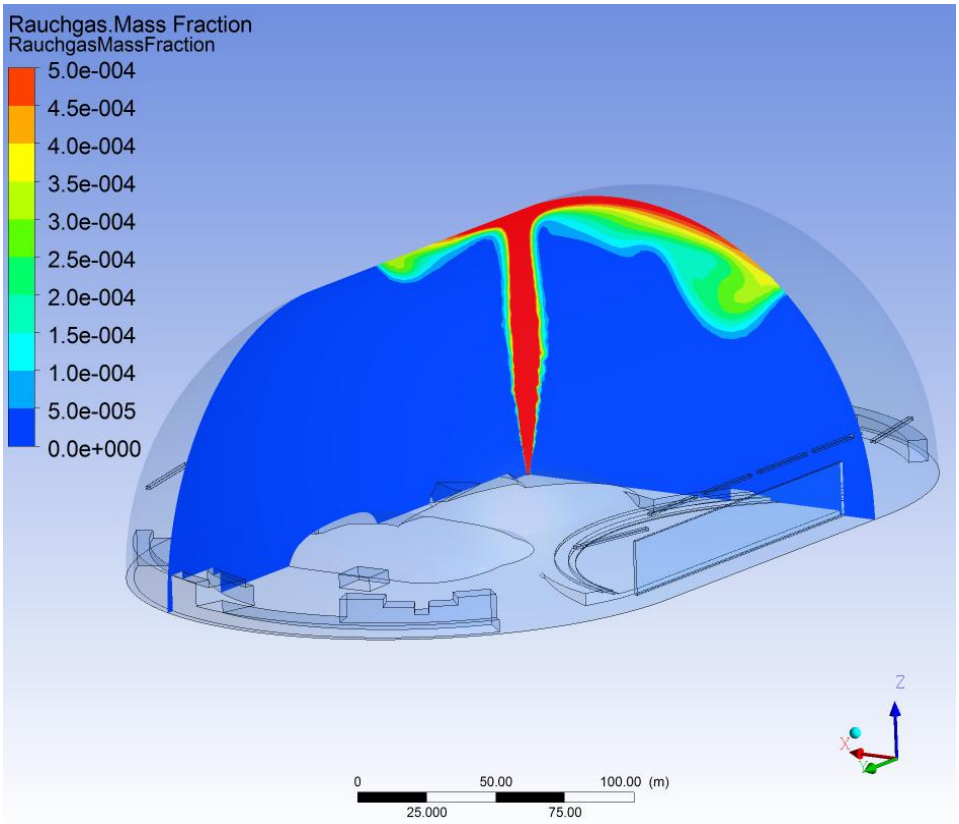


Bild 27 CFX Simulation 1,5 MW nach 5 min.

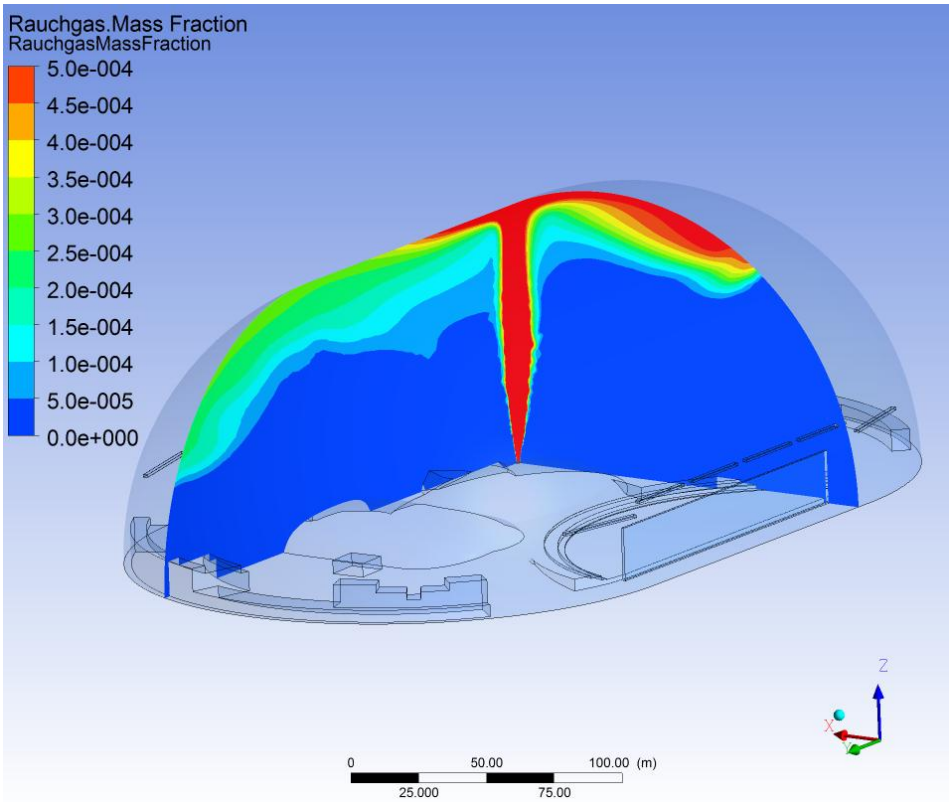


Bild 28 CFX Simulation 1,5 MW nach 10 min.

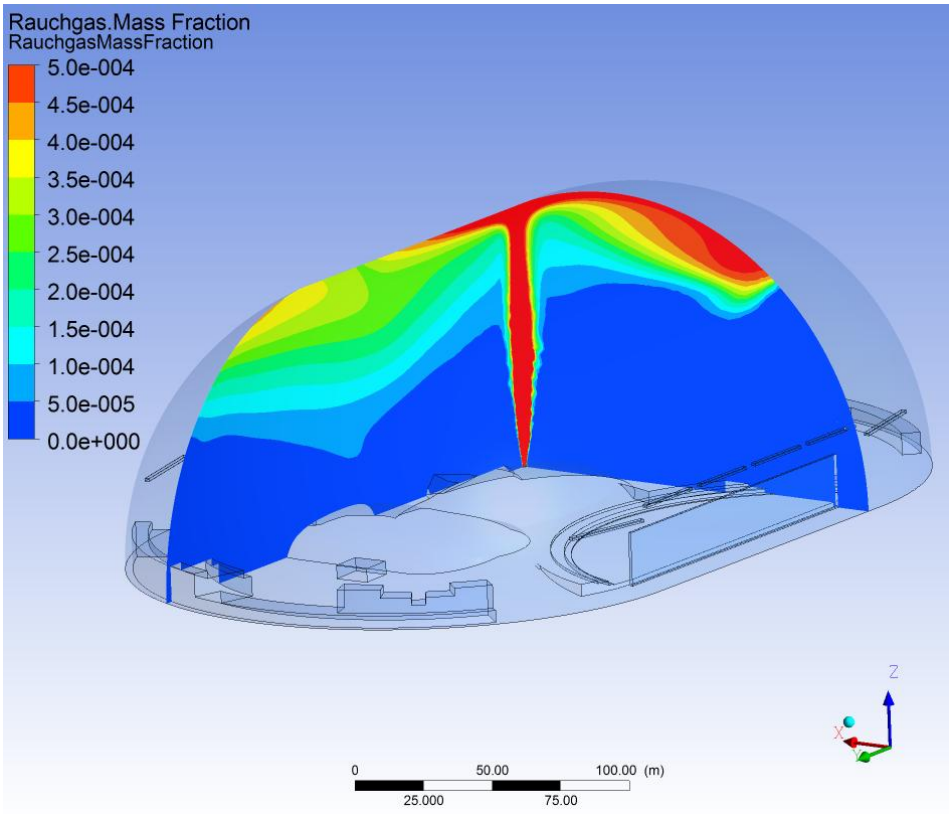


Bild 29 CFX Simulation 1,5 MW nach 15 min.

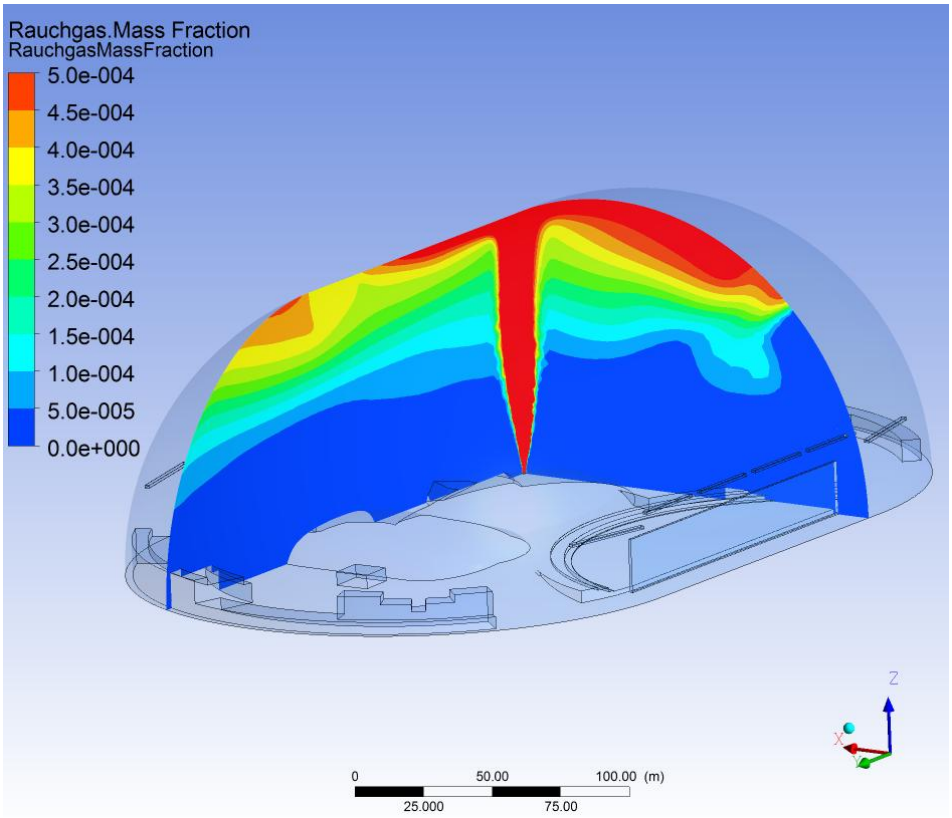


Bild 30 CFX Simulation 1,5 MW nach 20 min.

FAZIT

Die Fortschreibung von Brandschutzkonzepten erweist sich als wesentlicher Bestandteil der praktischen Tätigkeit von Brandschutzingenieuren. An vorstehendem, sicherlich im Hinblick auf Dimension und Nutzung eher außergewöhnlichen Beispiel wurde gezeigt, dass bei einem belastbaren Basiskonzept die Fortschreibungen sich zumeist auf eine Anpassung in Detail und Konkretisierung beschränken lassen, aber auch Umstände eintreten können, die eine ganzheitliche Überprüfung der früheren Risikoanalyse, Schutzzielbewertung und Lösungsansätze erforderlich machen. Im konkreten Objekt war eine solche Situation mit der Absicht gegeben, große Personenzahlen auch zum Zwecke der Übernachtung in mehrgeschossigen Gebäudebereichen innerhalb des Hallenraumes unterzubringen. Hieraus resultierten höhere Anforderungen, insbesondere an die Zuverlässigkeit der Rauchfreihaltung für einen längeren (Evakuierungs-) Zeitraum.

In einem ingenieurmäßigen Vorgehen mit einer Kombination von kalibrierten Rauchversuchen, Feldmodellsimulationen und vertiefenden Strömungsbetrachtungen konnte eine Lösung erarbeitet und hinterlegt werden, die das Brandschutzkonzept mit der notwendigen Zuverlässigkeit begründet.

GANZHEITLICHES BRANDSCHUTZKONZEPT ALS EIN SCHLÜSSEL-ELEMENT ZUM RISIKOMANAGEMENT

Mingyi Wang
Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. – GDV, Sach-Technische-Versicherung, Schadenverhütung, Statistik, Berlin

EINFÜHRUNG

Ein Brandschutzkonzept stellt eine Zusammenstellung von Brandschutzmaßnahmen dar, die objektspezifisch erforderlich sind, um die vorhandenen Brandgefahren gemäß den jeweils relevanten Schutzzielen und Schutzinteressen zu minimieren. Bauordnungsrechtlich wird im Zuge der Baugenehmigung ein Brandschutzkonzept insbesondere bei baulichen Anlagen besonderer Art und Nutzung gefordert. Notwendig ist dies entweder weil vom bestehenden Muster-Schutzkonzept in Form einer bauordnungsrechtlichen Verordnung oder Richtlinie objektspezifisch abgewichen werden muss oder weil kein bauordnungsrechtliches Muster-Schutzkonzept für die betreffende Nutzung oder Art besteht. Der Inhalt dieses Brandschutzkonzeptes ist bauordnungsrechtlich im Wesentlichen geregelt, u. a. durch die Bauvorlagenverordnung der Bundesländer. Mit diesem Brandschutzkonzept muss objektspezifisch nachgewiesen werden, dass bauordnungsrechtliche Schutzziele zum Personen-, Nachbar- und Umweltschutz erreicht sind. Hiervon kann andernfalls auch ausgegangen werden, wenn nutzungs- und artspezifisch die bauordnungsrechtlichen Brandschutzbestimmungen vollständig eingehalten sind.

Von Versicherern als Risikoträger wird ein Brandschutzkonzept ebenfalls empfohlen und bei der Beurteilung der vorhandenen und zu übernehmenden Risiken jeweils objektspezifisch bewertet. Hierbei sind weiterführende Schutzmaßnahmen in der Regel sinnvoll, um auch im Interesse des Versicherungsnehmers alle der mit bestehenden Brandgefahren verbundenen Risiken – nachfolgend kurz Brandrisiken − zu erfassen und weitestgehend zu beherrschen. Erfahrungsgemäß ist es in diesem Zusammenhang förderlich, dass die Grundsätze des Risikomanagements einschließlich der ganzheitlichen Betrachtung von Brandgefahren und -Schutzmaßnahmen bereits bei der ersten Brandschutzplanung im Zuge der Baugenehmigung berücksichtigt sind. Die nachfolgende Ausführung soll ein Beitrag zum vertieften Verständnis für die ganzheitliche Betrachtung leisten.

BRANDSCHUTZ UND RISIKOMANAGEMENT

Ein Brand kann erfahrungsgemäß nicht nur Leben, Gesundheit und natürliche Lebensgrundlagen, sondern auch Sach- und Vermögenswerte sowie die Existenz von Betrieben und Unternehmen ernsthaft gefährden. Demgemäß müssen Risiken, die mit einem Brand verbunden sind, beim betrieblichen und unternehmerischen Risikomanagement berücksichtigt werden.

Risikomanagement stellt nach *Wikipedia* ein systematisches Verfahren dar, welches insbesondere die Erfassung und Bewertung sowie Steuerung von festgestellten Risiken beinhaltet. Zum Risikomanagement stehen grundsätzlich folgende Strategien zur Verfügung, die in der Regel kombiniert eingesetzt werden:

- Risikovermeidung: Die Gefahren als Auslöser der Risiken werden mit Hilfe von Maßnahmen vorbeugend minimiert
- Risikominderung: Die Gefahren und die damit verbundenen Risiken werden mit Hilfe vorbeugender und abwehrender Maßnahmen auf ein akzeptables Maß reduziert
- Risikoabwälzung: Die Risiken werden teilweise oder vollständig an Dritte vertraglich übertragen, insbesondere in Form einer Versicherung
- Risikoakzeptanz: Das Restrisiko, das nach der Umsetzung der anderen Strategien noch verbleibt, muss akzeptiert und selbst getragen werden.

Zur Risikovermeidung und -minderung gehört es auch, gesetzliche Bestimmungen einzuhalten, u. a. mit Bezug auf mögliche Haftungsrisiken. Die umfassende Erfüllung gesetzlicher Bestimmungen bei der Ausübung betrieblicher und unternehmerischer Tätigkeit wird in der Praxis verstärkt unter dem Schlagwort “Compliance” zusammengefasst und in Betriebe und Unternehmen zunehmend thematisiert, nicht zuletzt auch infolge von einigen spektakulären Rechtsverfahren im In- und Ausland. Zur Risikovermeidung und -verminderung mit Bezug auf Brand sollen seitens des jeweiligen Betriebs und Unternehmens Brandschutzmaßnahmen ergriffen werden, ggf. auch mit Hilfe oder auf der Basis eines zu genehmigenden Brandschutzkonzeptes.

Bei der Risikoabwälzung in Form eines Versicherungsvertrags verpflichtet sich der Versicherer auf der Grundlage des Versicherungsvertragsgesetz und der individualrechtlichen Regelungen des Vertrags, bestimmte Risiken des Versicherungsnehmers oder eines Dritten durch eine Leistung abzusichern, die er bei Eintritt des vereinbarten Versicherungsfalles zu erbringen hat. Im Gegenzug dazu verpflichtet sich der Versicherungsnehmer, die vereinbarte Zahlung an den Versicherer − auch Prämie oder Beitrag genannt − zu leisten und ggf. sonstige Vertragsvereinbarungen, z. B. Obliegenheiten, einzuhalten.

Das wichtigste Instrument der Risikotransformation ist der Effekt des Risikoausgleichs im Kollektiv der gleichartig bedrohten Gefährdeten – auch Gefahrengemeinschaft genannt – und in der Zeit. Hierfür ist es erforderlich, die jeweils betreffenden Risiken beim Versicherungsnehmer zu identifizieren, zu analysieren und zu bewerten. Demgemäß werden bei Bedarf Vorschläge zur Risikovermeidung und -minderung sowie zur Schadensbegrenzung als Serviceleistung für den Versicherungsnehmer entwickelt. Mitunter bildet die Umsetzung dieser Maßnahmen auch die Voraussetzung für die dauerhafte Bereitstellung von Versicherungsschutz durch den Risikoträger.

Insbesondere für Gewerbe- und Industrieunternehmen müssen beim Bestehen einer Feuerversicherung alle Brandgefahren und damit verbundenen Risiken, Erfahrungen aus Vorschäden sowie vorhandene Brandschutzmaßnahmen in das Risikomanagement einbezogen werden. Dementsprechend betrachtet ein Brandschutzkonzept zum Risikomanagement in der Regel einen Bereich, der über die gesetzlichen Bestimmungen und Schutzziele hinaus reicht. Deshalb wird der Brandschutzstandard, der gemäß den gesetzlichen Bestimmungen bzw. mit dem genehmigten Brandschutzkonzept erreicht wird, vielfach als "Mindestschutz" bezeichnet.

Im Rahmen der Feuerversicherung wird gemäß den Allgemeinen Bedingungen der Feuerversicherung (AFB) stets davon ausgegangen, dass alle gesetzlichen, behördlichen und vertraglich vereinbarten Sicherheitsvorschriften bei dem jeweils zu versichernden Objekt eingehalten sind. Hierfür hat sich der Versicherungsnehmer vertraglich verpflichtet, was als Obliegenheit des Versicherungsnehmers vereinbart ist.

Ist die Versicherbarkeit individuell festgestellt, stehen Versicherer zum Risikomanagement im Zuge einer Feuerversicherung weitere Instrumente neben dem Brandschutzkonzept zur Verfügung, sofern. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang u. a. die vertragliche Eingrenzung der zu übernehmenden Risiken, die Vereinbarung eines Selbstbehaltes und die Höhe der Versicherungsprämie. Die Versicherbarkeit ist nach *von Fürstenwerth und Weiß* objektiv gegeben, wenn

- das versicherte Risiko und die zu erbringende Versicherungsleistung eindeutig beschrieben werden können,
- der Schadeneintritt unabhängig vom Willen der Versicherten und damit zufällig ist,
- die Versicherungsleistung auf Grund von statistischer Methoden kalkulierbar ist und
- ein Risikoausgleich im Kollektiv der Versicherten und/oder in der Zeit möglich ist.

Im Vergleich zum Brandschutznachweis gemäß dem Bauordnungsrecht ist der Handlungsspielraum beim Risikomanagement entsprechend größer durch den möglichen Ausgleich zwischen den verschiedenen Risikostrategien und Instrumenten zur Risikoabdeckung.

Dennoch stellt das Brandschutzkonzept ein Schlüsselelement zum Risikomanagement dar, weil der finanzielle Schadenersatz lediglich einen Teil der für Betriebe und Unternehmen wesentlichen Risiken abdecken kann und vertragliche Maßnahmen mit Blick auf typische Markteinflüsse Grenze gesetzt sind. Nicht zuletzt soll der Versicherungsschutz für eine möglichst große Gefahrengemeinschaft bezahlbar bleiben.

GANZHEITLICHES BRANDSCHUTZKONZEPT

In einem Brandschutzkonzept zum Management von Brandrisiken im Betrieb und Unternehmen, das die Versicherer im Zuge einer Feuerversicherung dem Versicherungsnehmer empfehlen, sollen alle

- Gefahren der Brandentstehung und Brandausbreitung (Feuer und Rauch) [1],
- möglichen Folgen eines Brandes als Risiken,
- gesetzlichen Schutzziele und,
- weiterführenden Schutzinteressen über die gesetzlichen Schutzziele hinaus

berücksichtigt werden. Ein derartig umfassendes Brandschutzkonzept wird als ganzheitliches Brandschutzkonzept bezeichnet. Die aufgeführten Parameter bilden hierbei die Grundlage zur Ableitung der jeweils erforderlichen Brandschutzmaßnahmen.

Die weiterführenden Schutzinteressen korrespondieren insbesondere mit Risiken, die beim betrieblichen und unternehmerischen Risikomanagement bedeutsam sind und im Rahmen einer Versicherung abgedeckt werden, z. B. Feuer- und Feuer-Ertragsausfall-Versicherung oder Umweltschadenversicherung. Zu nennen sind u. a. Betriebsunterbrechung, Aus- und Rückwirkungsschäden, Vertragsstrafen, Haftungen für Umweltschäden infolge eines Brandes, behördliche Auflagen für den Wiederaufbau, was ggf. auch die notwendige Anpassung an die aktuell geltenden Bestimmungen und Regeln der Brandschutztechnik einschließt. Diese Risiken gewinnen mit Bezug auf die Existenzsicherung von Betrieben und Unternehmen zunehmend an Bedeutung, auch im Zuge der Globalisierung.

In einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept müssen sich Brandschutzmaßnahmen gegenseitig ergänzen und aufeinander abgestimmt sein. Dies ist deshalb notwendig, weil alle Brandschutzmaßnahmen auf Grund ihrer jeweiligen Funktionsweise Anwendungsgrenzen aufweisen und einzelne Brandschutzmaßnahmen funktional gegenseitig beeinträchtigen können, etwa beim Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA). In der Praxis wird die Thematik bereits verstärkt wahrgenommen, was an der intensiveren Aufbereitung der Wechselwirkungen von Brandschutzmaßnahmen abzulesen ist, u. a. in VDI 3819 Blatt 2: Brandschutz in der Gebäudetechnik - Funktionen und Wechselwirkungen.

In einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept müssen zudem die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der festgelegten Brandschutzmaßnahmen einbezogen werden, um die ständige Funktionsbereitschaft aller im Brandschutzkonzept

---

[1] Die typischen Brandgefahren und damit verbundenen Risiken im Betrieb sind insbesondere in der GDV-Publikation “Technischer Leitfaden der Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung; Risiken, Schutzziele, Schutzkonzepte und Schutzmaßnahmen” (VdS 195) beschrieben und erläutert.

festgelegten Maßnahmen auch im betrieblichen Alltag sicherzustellen. Dieser Zustand kann erfahrungsgemäß erst durch zum Teil aufwendige Vorkehrungen der Qualitätssicherung bei Produkten und Systemen, bei der Planung, Installation bzw. Ausführung und beim Betrieb erreicht werden.

Die Empfehlung der Versicherer zur Aufstellung eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes ist u. a. auch darin begründet, dass z. B. die vielfältigen, nutzungs- bzw. artbedingten Gefahren der Brandentstehung in bauordnungsrechtlichen Bestimmungen lediglich allgemein geregelt sind. Aus der Sicht der Versicherer stellt hingegen die Vorbeugung der Brandentstehung, etwa mit Hilfe eines betrieblichen Schweißerlaubnisschein-Verfahrens, eine vorrangige und zudem bewährte Maßnahme zur Vermeidung und Begrenzung von Brandgefahren dar. Auch die Wartung und Instandsetzung von Brandschutzmaßnahmen sollen bauordnungsrechtlich in Eigenverantwortung des Bauherrn bzw. Betreibers durchgeführt werden und sind dementsprechend ebenfalls nur begrenzt geregelt.

Die umfassende Betrachtung im Zuge eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes ist demnach unerlässlich, um nicht nur im Zuge der Baugenehmigung den Brandschutznachweis zu erbringen, sondern die abgesteckten Ziele zum Risikomanagement mit zu erreichen. Liegt bei der Risikotransformation ggf. ein Brandschutzkonzept vor, das z. B. im Zuge der Baugenehmigung erstellt und umgesetzt ist, wird dieses analog bewertet.

BRANDSCHUTZNACHWEIS UND GANZHEITLICHES BRANDSCHUTZKONZEPT – DIFFERENZEN UND ÜBERSCHNEIDUNGEN

Zwischen dem Brandschutzkonzept und -nachweis im Zuge der Baugenehmigung auf der einen Seite und dem ganzheitlichen Brandschutzkonzept auf der anderen Seite bestehen vielfach sowohl Differenzen als auch Überschneidungen. Die Differenzen sind in erster Linie auf die Unterschiede zwischen gesetzlichen Schutzzielen und weiterführenden Schutzinteressen zurückzuführen. Die Überschneidungen bestehen vor allem dort, wo einzelne Schutzmaßnahmen nicht nur den gesetzlichen Schutzzielen, sondern auch weiterführenden Schutzinteressen dienen. Diese Zusammenhänge sollen anhand der nachfolgend aufgeführten Bewertungen einzelner Schutzmaßnahmen mit Bezug auf das Risikomanagement beispielhaft aufgezeigt werden.

Baulicher Brandschutz

In bauordnungsrechtlichen Brandschutzbestimmungen werden vielfach die erforderliche Feuerwiderstandsklasse von tragenden Bauteilen und die zulässige Abschnittsgröße art- und nutzungsspezifisch vorgegeben, z. B. in der Landesbauordnung. Sie können ggf. aber auch nach einem bauordnungsrechtlich vorgegebenen Verfahren ermittelt werden, z. B. gemäß der Industriebau-Richtlinie.

Das feuerwiderstandsfähige Tragwerk und die Abschnittsbildung durch feuerwiderstandsfähige Abtrennungen werden in der Risikobewertung der Versicherer ebenfalls erfasst und bewertet. Erfahrungsgemäß kann diese Maßnahme im Brandfall jeweils durch das Ermöglichen der wirksamen Brandbekämpfung der Feuerwehr und die Begrenzung der Brandausbreitung auch zur Schadenbegrenzung beitragen.

Die brandschutztechnische Bewertung der Baukonstruktion aus Sicht der Versicherer erfolgt insbesondere nach den sogenannten Bauartklassen (BAK). Dabei werden die Außenbauteile, z. B. nichttragende Außenwände, und die inneren Abtrennungen, z. B. Geschossdecken und das Tragwerk einschließlich des Dachtragwerks jeweils hinsichtlich der Feuerwiderstandsfähigkeit und des Brandverhaltens der verwendeten Baustoffe eingeordnet (siehe auch Tab. 1). Damit kann die Widerstandsfähigkeit eines Gebäudes gegen eine Brandeintragung von außen, gegen eine großräumige Brandausbreitung im Gebäude, sowie die Voraussetzung für eine wirksame Brandbekämpfung der Feuerwehr im Gebäude vereinfacht bewertet werden.

Beim feuerwiderstandsfähigen Tragwerk z. B. wird erfahrungsgemäß davon ausgegangen, dass eine klassifizierte Feuerwiderstandsdauer von mindestens 90 Minuten insbesondere bei Gewerbe- und Industriebetrieben sinnvoll ist, nicht zuletzt auf Grund der nutzungsbedingten Brandgefahren und Wertkonzentration. Dementsprechend wird die vorzugsweise Verwendung nichtbrennbarer Baustoffe – sofern bautechnisch vertretbar – ebenfalls von Versicherern befürwortet.

Tabelle 1 Beispiel der Bauartklassen für Gewerbe- und Industriebauten (VdS 0195)

<table>
<tr><th>BAK
Bauarten</th><th>1</th><th>2</th><th>3</th><th>4</th></tr>
<tr><td>Tragwerk</td><td rowspan="3">F 90-A</td><td rowspan="3">F 30-A</td><td rowspan="3">F30-B oder F 0-A</td><td rowspan="3">F 0-B</td></tr>
<tr><td>Dachtragwerk</td></tr>
<tr><td>Geschossdecken</td></tr>
<tr><td>Dachschalung</td><td>F 30-A</td><td colspan="2">F0-A einschließlich Dämmstoffe</td><td></td></tr>
<tr><td>Außenwand einschließlich Dämmstoffe</td><td>F 30-B oder F 0-A</td><td colspan="2">F 0-A</td><td>F 0-B</td></tr>
<tr><td>Bedachung</td><td>hart</td><td colspan="2">hart und Dachbahn aus Kunststoff</td><td>weich</td></tr>
</table>

Im Gegensatz zu bauordnungsrechtlichen Brandschutzbestimmungen wird bei der Risikobewertung der Versicherer die Flächengröße der feuerwiderstandsfähig voneinander abgetrennten Gebäudeabschnitte lediglich als eine Hilfsgröße herangezogen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit Bezug auf das Risikomanagement nicht die Fläche, sondern der Wert des Inhalts (Betriebsein-

richtung und Vorräte/Waren) im betreffenden Gebäudeabschnitt und dessen Bedeutung für die betrieblichen bzw. unternehmerischen Wertschöpfungsprozesse maßgeblich sind.

Eine Begrenzung der Abschnittsfläche wird demgemäß insbesondere dort empfohlen, wo eine schnelle und großflächige Brandausbreitung nutzungs- und/oder artbedingt zu erwarten ist. Nach einer aktuellen Auswertung der Großschadenstatistik steht der Totalschaden eines Gebäudeabschnittes im Brandfall insbesondere mit der Brandfläche im ursächlichen Zusammenhang, die bei der Einleitung der manuellen Brandbekämpfung erreicht bzw. überschritten ist.

Die bauordnungsrechtlichen Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Planung und Ausführung sowie Instandhaltung werden mit wenigen Ausnahmen, z. B. bei Komplextrennwänden, von Feuerversicherern akzeptiert.

Anlagentechnischer Brandschutz

In bauordnungsrechtlichen Brandschutzbestimmungen und demgemäß im Brandschutzkonzept sowie beim Brandschutznachweis im Zuge der Baugenehmigung gelten anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen vielfach als Kompensationsmaßnahmen, u. a. für unzureichende Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen, größere Abschnittsflächen oder auch längere Rettungswege.

Aus Sicht der Versicherer sind anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen insbesondere erforderlich, um die Brandgefahren und die damit verbundenen Risiken für Betriebe und Unternehmen zu minimieren und zu beherrschen. Dazu gehört neben dem Schutz von Räumen u. a. auch der Schutz von Maschinen und Einrichtungen als Einzelobjekt. Dementsprechend sind die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit der Brandschutzanlagen von besonderer Bedeutung.

Zur Sicherstellung der Wirksamkeit werden vielfach Brand- und Löschversuche im realen Maßstab durchgeführt. Mit diesen Versuchen wurde zuletzt u. a. die Grundlage zur Auslegung der Feuerlöschanlagen zum Schutz von Lager- und Produktionsbereichen mit Klein- und Großladungsträgern aus Kunststoffen entwickelt bzw. überprüft. Diese Behälter weisen material- und artbedingt ein kritisches Brandverhalten auf.

Die neuen Erkenntnisse und Erfahrungen der Versicherer sind bisher jedoch nicht immer umfassend in die anerkannten Regeln der Technik für die Planung und Installation anlagentechnische Schutzmaßnahmen eingeflossen. Diese technischen Regeln sind vielfach als Konkretisierung der bauordnungsrechtlichen Schutzziele und Bestimmungen konzipiert. In der DIN EN 12845 “Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen − Automatische Sprinkleranlagen − Planung, Installation und Instandhaltung” z. B. sind wichtige Parameter für die Auslegung und Anwendungsfälle nicht geregelt.

Zur Sicherstellung der ständigen Verfügbarkeit von Brandschutzanlagen und damit ihrer Zuverlässigkeit haben sich nachfolgende Maßnahmen in der Praxis bewährt, die sich als eine Maßnahmenkette von Produkten und Systemen, über die Planung und Installation bis hin zum Betrieb erstreckt:

- Prüfung und Anerkennung von Produkten und Systemen, ggf. einschließlich des zugehörigen Qualitätsmanagementsystems
- Standardisierung der Planungsgrundlagen
- Qualifizierung der Fachplaner und ausführenden Fachkräfte sowie Fachkräfte zur Instandhaltung
- Abnahmeprüfung betriebsfertig installierter Anlagen und wiederkehrende Prüfungen der betreffenden Anlagen im Betrieb durch einen Sachverständigen

Diese Maßnahmen zur Qualitätssicherung, die inzwischen u. a. im informativen Anhang der DIN 18230-1 “Brandschutz im Industriebau” aufgeführt sind, sind bauordnungsrechtlich nur begrenzt geregelt.

Auf Grund der begrenzten Regelung über die Wirksamkeit und Zuverlässigkeit von Brandschutzanlagen in bauordnungsrechtlichen Bestimmungen setzen die Versicherer bei ihrer Risikobewertung und -übernahme weiterhin auf die eigenen, bewährten Qualitätsmerkmale und deren Einhaltung.

Betrieblicher und organisatorischer Brandschutz

Organisatorische Brandschutzmaßnahmen sind in bauordnungsrechtlichen Bestimmungen begrenzt geregelt. Die wenigen Ausnahmen der diesbezüglichen Bestimmungen, etwa die Bestellung eines Brandschutzbeauftragten und die Erstellung einer Brandschutzordnung, sind allgemein formuliert. An der Stelle sieht der Gesetzgeber insbesondere den Betreiber in der Eigenverantwortung, die im Zuge der verstärkten Deregulierung auch im Baurecht immer mehr eingefordert wird.

Aus Sicht der Versicherer stellen die betrieblichen und organisatorischen Brandschutzmaßnahmen ein unverzichtbares Element eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes dar. Sie können einerseits die betrieblichen Gefahren der Brandentstehung und -ausbreitung durch die Vermeidung von Zündquellen und Begrenzung der Brandlast sowie frühzeitige Bekämpfung von Entstehungsbränden wirksam minimieren. Zu nennen sind z. B. die betrieblichen Regeln zum Verbot des offenen Feuers, Begrenzung der zur Produktion bereitzustellenden Materialien auf Tagesbedarf und Ausbildung von Betriebsangehörigen zu Brandschutzhelfern. Sie können darüber hinaus die zuverlässige Verfügbarkeit der Brandschutzmaßnahmen im Betrieb sicherstellen. Durch eine regelmäßige Instandhaltung kann erfahrungsgemäß sowohl die ständige Funktionsbereitschaft von Brandschutzanlagen aufrechterhalten, als auch die Gefahren der Brandentstehung in technischen Einrichtungen minimiert werden.

Die Wirksamkeit betrieblicher und organisatorischer Brandschutzmaßnahmen ist allerdings abhängig vom Faktor “Mensch” und kann im betrieblichen Alltag stark schwanken. Dementsprechend werden die betrieblichen und organisatorischen Vorkehrungen bei der ersten und wiederkehrenden Besichtigung der Versicherer vor Ort stets bewusst beobachtet, jeweils einzeln erfasst und bewertet [2].

Abwehrender Brandschutz

Weil Feuerwehren die wirksame Brandbekämpfung und damit die mögliche Schadensbegrenzung im Brandfall maßgeblich beeinflussen werden die Leistungsfähigkeit der örtlichen Feuerwehr und die zugehörige Infrastruktur bei der Risikobewertung der Feuerversicherer in Form der sogenannten Feuerwehrklassen berücksichtigt. Während im Zuge der Baugenehmigung die Verfügbarkeit von Rettungsgeräten für den zweiten Rettungsweg im Brandschutzkonzept und beim Brandschutznachweis besonders von Bedeutung ist, werden darüber hinaus folgende Leistungsmerkmale in der Feuerwehrklasse erfasst und bewertet:

- Verfügbare Personalstärke der Wehr
- Ausbildungsstand der Einsatzkräfte
- Anzahl und Ausstattung der Feuerwachen und Fahrzeuge
- Ausrüstung mit Atemschutzgeräten
- Örtliche Löschwasserversorgung
- Örtliche Alarmierungssysteme
- Sonstige örtliche Gegebenheiten, die den Feuerwehreinsatz ggf. beeinflussen können, z. B. Bahnübergänge.

Die Einstufung in die Feuerwehrklassen ist freiwillig und erfolgt auf Antrag der jeweils betreffenden Gemeinde. Die zugeordnete Feuerwehrklasse geht erfahrungsgemäß positiv in die Risikobewertung im Zuge einer Industrie-Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung ein. Sie wird zudem vielfach auch als ein positiver Standortfaktor für die Ansiedlung von Gewerbe- und Industriebetrieben angenommen.

Gesamtbewertung

Bei der versicherungstechnischen Bewertung im Zuge einer Feuerversicherung werden die vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzmaßnahmen jeweils

---

[2] In der Publikation “Brandschutz-Management; Leitfaden für die Verantwortlichen im Betrieb und Unternehmen” (VdS 2009) z. B. sind wesentliche Aspekte der betrieblichen Brandschutzorganisation und des betrieblichen Management von Brandrisiken für die Praxis aufbereitet.

hinsichtlich der Schutzfunktion und des effektiven Beitrags zum Risikomanagement gewichtet. Dementsprechend werden selbsttätige und ortsfeste Feuerlöschanlagen bevorzugt berücksichtigt, weil sie Brände im Entstehungsstadium auch außerhalb der Betriebszeit erkennen, melden und bekämpfen. Insbesondere für Industriebetriebe haben sich diese Löschanlagen in der Vergangenheit als eine gute Schutzmaßnahme in der Praxis bewährt - nicht zuletzt auch durch die umfassenden Maßnahmen zur Qualitätssicherung.

Ein mögliches Ausreizen der Schutzfunktionen durch die Kombination von verschiedenen Schutzmaßnahmen, die bei der Brandschutzplanung in der Praxis vielfach angestrebt wird, z. B. auch aus Kostengründen, wird bei der Risikobewertung der Versicherer nicht vorgenommen. Vielmehr gehen die höchsten Gewichtungen der einzelnen Schutzmaßnahmen bis zu einem wirtschaftlich vertretbaren Grad additiv in die versicherungstechnische Gesamtwertung ein. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass beim Risikomanagement nicht von “best case”, sondern von “worst case” ausgegangen werden muss. Die Notwendigkeit derartiger Bewertungen wird insbesondere durch die Tatsache verdeutlicht, dass trotz der vorbeugenden Maßnahmen Brände immer entstehen und auch Schutzmaßnahmen versagen können.

EMPFEHLUNGEN ALS KONKRETE HILFESTELLUNG FÜR DIE PRAXIS

Ergänzend zu gesetzlichen und behördlichen Bestimmungen haben Versicherer vielfältige Empfehlungen als konkrete Hilfestellung für die Praxis erarbeitet, um Versicherungsnehmer und die anderen interessierten Kreise beim Risikomanagement zu unterstützen. Diese Publikationen werden über VdS Schadenverhütungs-Verlag veröffentlicht und zum Download kostenfrei bereit gestellt (www.vds-industrial.de). Alle Empfehlungen werden zudem mit der Entwicklung der Technologie und nach Schadenerfahrungen fortgeschrieben.

In der Praxis werden Versicherer in der Regel dennoch mit einem Brandschutzkonzept konfrontiert, das insbesondere mit Bezug auf bauordnungsrechtliche Schutzziele wirtschaftlich optimiert ist und deshalb zum Risikomanagement weitere Schutzmaßnahmen auf Empfehlungen der Versicherer erforderlich werden können. Das ist u. a. auch darauf zurückzuführen, dass der Versicherer − sofern er nicht über eine Bauleistungsversicherung eingebunden ist – in der Regel erst auf den Plan gerufen wird, wenn ein zu versicherndes Objekt bereits errichtet und zur Nutzung übergeben worden ist, (ggf. mit einem bauaufsichtlich genehmigten Brandschutzkonzept). Zugleich haben Brandschutzfachplaner leidglich den Auftrag, die Planung für die Baugenehmigung, Bauausführung und Bauüberwachung gemäß dem Bauordnungsrecht durchzuführen. In der Regel haben Sie keinen Zugang zu notwendigen Informationen zum Risikomanagement.

Erfahrungsgemäß kann ein nicht unerheblicher Anteil der Mehrkosten, die durch zeitlich versetzte Berücksichtigung der gesetzlichen Schutzziele und der weiterführenden Schutzinteressen bei der Brandschutzplanung entstehen,

durch eine umsichtige Erstkonzeption vielfach vermieden werden. Das ist z. B. der Fall, wenn bei der ersten Brandschutzplanung im Zuge der Baugenehmigung vorzugsweise solche Brandschutzmaßnahmen festgelegt werden, die auch den weiterführenden Schutzinteressen dienen können. Dadurch kann der Brandschutz mit Bezug auf das Risikomanagement sowohl technisch als auch wirtschaftlich insgesamt optimal gestaltet werden.

Aus diesen Gründen wurden seitens der Versicherer Empfehlungen für die Erstellung von ganzheitlichen Brandschutzkonzepten als praktische Hilfestellung aufbereitet. Diese wird in Form einer neuen GDV-Publikation “Erstellung von Brandschutzkonzept und Prüfung von Brandschutznachweis; Information und Hinweise zur Planung und Prüfung” (VdS 3547) veröffentlicht. Dabei sind erste Erfahrungen bei der bauaufsichtlichen Anerkennung der Brandschutz-Prüfingenieure eingeflossen, die Brandschutzexperten der Versicherer im jeweiligen Prüfungsausschuss der Länder gesammelt haben.

Zu den genannten Hinweisen und Empfehlungen gehört vor allem eine Checkliste mit den zugehörigen Erläuterungen. Darin sind die Brandschutzmaßnahmen besonders hervorgehoben, die sowohl gesetzlichen Schutzzielen als auch weiterführenden Schutzinteressen dienlich sind. Die Checkliste ist in folgende Abschnitte aufgeteilt:

- Allgemeine Angaben
- Betriebliche Randbedingungen auch mit Bezug auf das Risikomanagement
- Baulicher Brandschutz
- Flucht- und Rettungswege
- Anlagentechnische Maßnahmen
- Betriebliche/Organisatorische Maßnahmen
- Abwehrende Maßnahmen
- Nachweis und Dokumentation
- Maßnahmen zur Qualitätssicherung bei der Umsetzung
- Zwischen- und Schlußabnahme
- Weitere Hinweise für den Betrieb.

In der Erläuterung der Checkliste wird einerseits ausdrücklich auf die Verantwortungen für die ganzheitliche Brandschutzkonzeption hingewiesen und andererseits die notwendige Qualifikation, Erfahrungen und Fortbildung der Fachplaner thematisiert. Dies ist notwendig, weil Aspekte zum Risikomanagement auch in anerkannten Regeln der Technik zum Teil nicht bzw. nicht hinreichend behandelt sind. Darüber hinaus wird mit einem vergleichenden Rechenbeispiel die wirtschaftlichen Vorteile der ganzheitlichen Betrachtung für Bauherrn bzw. Betreiber verdeutlicht.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Brandgefahren stellen erfahrungsgemäß auch eine ernsthafte Bedrohung der Existenz von Betrieb und Unternehmen dar. Dementsprechend gelten Brandrisiken im Rahmen von betrieblichen und unternehmerischen Risikomanagement ebenfalls zu beherrschen. Zum betrieblichen und unternehmerischen Risikomanagement können in der Praxis unterschiedliche Strategien verfolgt werden, vielfach auch in Kombination. Zu nennen sind insbesondere die Risikovermeidung, Risikominderung und Risikoabwälzung. Mit Bezug auf Brandrisiken müssen demgemäß Brandschutzmaßnahmen ergriffen werden, ggf. auch auf der Basis des bauaufsichtlich genehmigten Brandschutzkonzeptes. In einem ganzheitlichen Brandschutzkonzept, das im Zuge der Risikobewertung von Versicherer empfohlen wird, sollen über die gesetzlichen Schutzziele und Bestimmungen hinaus, alle relevanten Brandgefahren, Risiken und Schutzinteressen berücksichtigt werden. Zur Risikoabdeckung durch eine Versicherung stehen weitere Instrumente darüber hinaus zur Verfügung. Dennoch stellt das ganzheitliche Brandschutzkonzept ein Schlüsselelement zum Risikomanagement dar, weil die typischen und wesentlichen Risiken in Betrieben und Unternehmen lediglich zum Teil durch monetäre sowie vertragliche Vereinbarungen abgedeckt werden können.

Um den umfassenden Brandschutz im Betrieb und Unternehmen zu erreichen, ist es hilfreich, wenn bereits bei der Brandschutzplanung im Zuge der Baugenehmigung die Grundsätze des Risikomanagements und den Ansatz der ganzheitlichen Betrachtung berücksichtigt werden. Hierfür sind seitens der Versicherer Empfehlungen als konkrete Hilfestellung für die Praxis bereit gestellt. Ergänzend dazu wird mit der bespielhaften Vorstellung und Erläuterung der ganzheitlichen Bewertung von Brandschutzmaßnahmen im Rahmen einer Feuer- und Feuer-Betriebsunterbrechungs-Versicherung um mehr Verständnis für ein ganzheitliches Brandschutzkonzept und Risikomanagement geworben.

LITERATUR

Gesetz über den Versicherungsvertrag (Versicherungsvertragsgesetz, VVG)

Frank v. Fürstenwerth, Alfons Weiß: Versicherungsalphabet (VA). Karlsruhe: Verlag Versicherungswirtschaft

Allgemeine Bedingungen für die Feuerversicherung (AFB 2010). Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, www.gdv.de

VdS Schadenverhütungs-Verlag, Köln, www.vds.de

- VdS 0195: Technischer Leitfaden der Feuer- und Feuerbetriebsunterbrechungs-Versicherung, Risiken, Schutzziele, Schutzkonzepte und Schutzmaßnahmen
- VdS 2009: Brandschutz-Management; Leitfaden für die Verantwortlichen im Betrieb und Unternehmen
- VdS 3547: Erstellung von Brandschutzkonzept und Prüfung von Brandschutznachweis; Information und Hinweise zur Planung und Prüfung

VDI 3819 Blatt 2: Brandschutz in der Gebäudetechnik - Funktionen und Wechselwirkungen. Berlin: Beuth-Verlag, www.beuth.de

SITZUNG 4

VON DER FORSCHUNG
IN DIE PRAXIS

Sitzungsleitung: J. Wesche, Leverkusen

BRANDSCHUTZTECHNISCH SICHERE VERWENDUNG VON HOLZ UND NACHWACHSENDEN ROHSTOFFEN IM MEHRGESCHOSSIGEN HOCHBAU

Michael Dehne
Dehne, Kruse Brandschutzingenieure GmbH & Co. KG, Gifhorn
Björn Kampmeier
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

EINLEITUNG

Vor dem Hintergrund des kaum gezügelten Ressourcenverbrauchs und der Klimadiskussion haben die positiven Eigenschaften des heimischen, nachwachsenden Baustoffs Holz zunehmend an Bedeutung gewonnen. Zudem eröffnen die Leicht- und Trockenbauweisen ein besonders zukunftsfähiges Entwicklungspotential für den mehrgeschossigen, verdichteten Wohnungsbau [1]. Die Bauordnungen der Länder bewerten jedoch die Holzbauweise hinsichtlich des Brandschutzes generell kritischer als die Massivbauweisen (Mauerwerks- und Stahlbetonbau) oder die Leichtbauweisen mit tragenden Bauteilen aus Stahl und zusätzlichen Brandschutzbekleidungen [2]. Durch die Anforderung „feuerbeständig“ für die tragenden und aussteifenden Bauteile in Gebäuden mit mehr als drei Vollgeschossen, wie die Landesbauordnungen bis 2002 ausnahmslos forderten, schloss das deutsche Baurecht in Verbindung mit der Bauregelliste und DIN 4102-2 [3] Holzkonstruktionen de facto aus, da bei feuerbeständiger Bauweise tragende Konstruktionen in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Bausteilen bestehen müssen. Die gesetzlichen Vorgaben ließen mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise nur dann ohne besondere Anforderungen zu, wenn es sich um Gebäude geringer Höhe handelte, d. h. der Fußboden keines Geschosses mit Aufenthaltsräumen mehr als 7 m über der Geländeoberfläche lag. [4]

In den 1990er Jahren wurden unter den Aspekten ökologisches Bauen, Denkmalschutz, Bestandsschutz, Modernisierung von Wohngebäuden und Schaffung von Wohnraum in Verbindung mit Gebäudeerweiterungen häufig Ausnahmen von den restriktiven Anforderungen der damals gültigen Bauordnungen zugelassen. Dazu musste jedoch immer im Einzelfall erneut nachgewiesen werden, dass kein erhöhtes Brandrisiko besteht oder das Risiko durch andere Maßnahmen kompensiert wird. Die Genehmigung war somit abhängig von vielen Randbedingungen, sodass eine Planungssicherheit im Vorfeld häufig nicht gegeben war.

Weit verbreitet waren Bedenken, dass ein Brandeintrag in die Tragkonstruktion erfolgt und zu einem verzögerten Tragwerksversagen bzw. zu einem Durchbrand in angrenzende Nutzungseinheiten führt. Zudem wurde befürchtet, dass im Gegensatz zu Massivbauteilen die raumabschließenden Bauteile in Holzbauweise keine ausreichende Rauch- und Gasdichtigkeit aufwiesen. Diesen

Bedenken wurde an der TU Braunschweig in einem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (DGfH) geförderten Forschungsvorhaben [5], [6] gezielt nachgegangen. Dabei wurde der Nachweis erbracht, dass das hohe brandschutztechnische Sicherheitsniveau auch bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise aufrecht erhalten werden kann, wenn geeignete konstruktive Maßnahmen ergriffen werden. Auf der Grundlage dieses Forschungsprojektes wurde 2004 die Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise - M-HFHHolzR kurz: Muster-Holzbaurichtlinie [7] veröffentlicht.

Ein Trend, der sich in der Praxis immer stärker abzeichnet, ist die Verwendung von brennbaren Dämmstoffen in mehrgeschossigen Holzbauten der Gebäudeklasse 4 (Bild 1), was eine Abweichung von den betreffenden Landesbauordnungen darstellt, wonach in hochfeuerhemmenden Bauteilen ausschließlich nichtbrennbare Mineralfaserdämmstoffe mit einem Schmelzpunkt von mind. 1.000 °C zu verwenden sind. Zudem setzt sich die Verwendung flächiger, massiver Holzbauteile zunehmend bei der Realisierung mehrgeschossiger Wohngebäude in der Praxis durch. Häufig ist auch unter Berücksichtigung dieser Abweichungen aus wirtschaftlichen Gründen eine Reduzierung der Brandschutzbekleidung erwünscht. Im Rahmenvon zwei am iBMB durchgeführten Forschungsprojekten [8], [9] wurden die notwendigen konstruktiven Randbedingungen erarbeitet, um das erforderliche brandschutztechnische Sicherheitsniveau bei der Verwendung von brennbaren Dämmstoffen aufrecht zu erhalten. Die Ergebnisse sind in einem Vorschlag zur Überarbeitung der Muster-Holzbaurichtlinie zusammengestellt worden [10].

Die einzelnen Stufen dieser Entwicklung waren häufig Thema der Braunschweiger Brandschutz-Tage [11] – [17]. Dieser Bericht fasst die einzelnen Entwicklungsstufen zusammen und zeigt anhand zweier Beispiele, wie die Erkenntnisse aus den Forschungsvorhaben inzwischen in der Praxis umgesetzt werden.

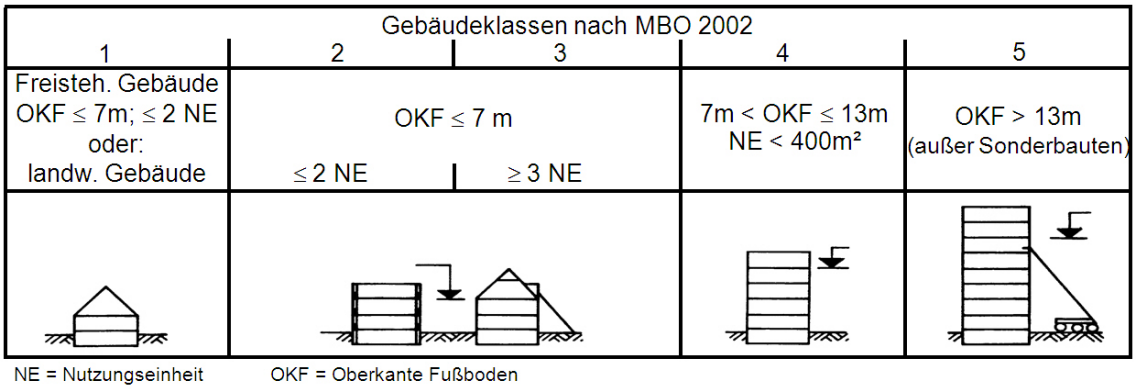


Bild 1 Einteilung der Gebäudeklassen nach MBO

ERARBEITUNG DER M-HFHHOLZR

Vor Einführung der Muster-Holzbaurichtlinie [7] wurden höhere Gebäude aus Holz nur im Einzelfall auf Basis von Gutachten genehmigt. Dies hatte zur Folge, dass die Ausführungen sehr variantenreich waren und die damit erreichte brandschutztechnische Sicherheit nur schwer von den zuständigen Bauaufsichtsbehörden einschätzbar war. Um eine einheitliche Beurteilung zu ermöglichen, wurde die Muster-Holzbaurichtlinie erarbeitet. In dieser Richtlinie werden Anforderungen an die Konstruktion gestellt, bei deren Einhaltung die Brandsicherheit nachweislich mit der von Massivbauten aus Beton oder Mauerwerk vergleichbar ist. Damit sollte erreicht werden, dass die Vielfalt des mehrgeschossigen Holzbaus möglichst wenig eingeschränkt wird, aber dennoch das allgemein akzeptierte Sicherheitsniveau im Brandschutz erhalten bleibt.

Die Muster-Holzbaurichtlinie bezieht sich auf mehrgeschossige Holzgebäude in der Gebäudeklasse 4. Dabei handelt es sich um Gebäude zwischen 7 m und 13 m Höhe mit Nutzungseinheiten von nicht mehr als 400 m² (Bild 1). Für die tragenden und aussteifenden Bauteile wird in dieser Gebäudeklasse eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten (hochfeuerhemmend) gefordert. Wenn die Bauteile beim Holztafelbau im Vergleich zu Mauerwerk oder Beton aus Holz bestehen, sind zusätzliche Risiken aus brandschutztechnischer Sicht zu berücksichtigen. Hierzu gehört neben der zusätzlichen immobilen Brandlast die Gefahr von Hohlraumbränden innerhalb der Konstruktion, die nur schwer von der Feuerwehr zu bekämpfen sind. Zudem kann sich ein Entstehungsbrand durch die brennbaren Oberflächen schneller zum Vollbrand entwickeln. Auch besteht die Gefahr der Rauchausbreitung durch raumabschließende Bauteile.

Diesen Risiken soll durch die so genannte „brandschutztechnisch wirksame Bekleidung“ als entscheidende bauliche Kompensationsmaßnahme begegnet werden. Aufgabe dieser Bekleidung ist es, die Holzbauteile bei einem Vollbrand über die geforderte Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten vor einer Entzündung zu schützen. Die Brandschutzbekleidung muss dazu so dimensioniert werden, dass an der Oberfläche der Holzbauteile eine Temperatur von 270 °C im Mittel und 290 °C im Maximum nicht überschritten wird. Außerdem muss die Bekleidung raumabschließender Bauteile zur Vermeidung eines Rauchdurchtritts mindestens zweilagig mit versetzten Fugen ausgeführt werden. Die Hohlräume der Holztafelelemente müssen mit nichtbrennbarer Dämmung mit einem Schmelzpunkt > 1000 °C gefüllt werden.

Parallel zu dem Forschungsvorhaben [5], [6] wurde in Deutschland etwa ab dem Jahr 2000 im Zuge der Novellierung der Musterbauordnung durch die Fachkommission Bauaufsicht ein neues schutzzielorientiertes Brandschutzkonzept [18] erarbeitet. Das Konzept beinhaltet unter anderem eine Neuordnung der Gebäudeklassen mit Einführung einer zusätzlichen Gebäudeklasse 4: Gebäude mittlerer Höhe bis zu einer Fußbodenhöhe des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen von 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m² in einem Geschoss. In dieser Gebäudeklasse müssen die raumabschließenden, tragenden und aussteifenden Bauteile „hochfeuerhemmend“ eine

Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten aufweisen. Die Verwendung tragender und aussteifender Bauteile in Holzbauweise ist dann zulässig, wenn die brennbaren tragenden Teile durch eine nichtbrennbare „brandschutztechnisch wirksame Bekleidung“ (Brandschutzbekleidung) „gekapselt“ sind und wenn ausschließlich nichtbrennbare Dämmstoffe verwendet werden.

Brandschutztechnisch wirksame Bekleidung

Die Brandschutzbekleidung ist in dem neuen Brandschutzkonzept der Musterbauordnung [18] nicht näher definiert. Aufgabe der experimentellen Grundlagenuntersuchungen des Forschungsvorhabens [5], [6] war es daher unter anderem, die Anforderungen an diese Bekleidung festzulegen. Daneben sollten beispielhafte Konstruktionsvarianten entwickelt und deren Eignung durch Brandversuche nachgewiesen werden. Auf dieser Basis waren Leistungskriterien zu definieren, die zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen gemäß DIN 4102-2 [19] bzw. DIN EN 1363-1 [20] zu erfüllen sind.

Brandschutzbekleidungen von raumabschließenden, tragenden und/oder aussteifenden Bauteilen in Holzbauten der Gebäudeklasse 4 müssen gewährleisten, dass die Entzündungstemperatur an der Holzoberfläche während der Brandbeanspruchungsdauer nicht erreicht oder überschritten wird. Da dieses Leistungskriterium im Rahmen von Normbrandversuchen nach DIN 4102-2 [19] bzw. DIN EN 1363-1 [20] nicht überprüft werden kann, muss die Brandschutzbekleidung separat geprüft werden. Die europäische Regelung sieht hierfür eine Brandprüfung nach DIN EN 14135 [21] vor. Dabei wird auf der feuerabgewandten Seite der Brandschutzbekleidung eine Holzspanplatte angeordnet. Die Brandprüfung gilt als bestanden, wenn das Temperaturkriterium während der geforderten Zeitdauer von 60 Minuten eingehalten wurde und zusätzlich an keiner Stelle der Holzspanplatte eine Entzündung oder Verkohlung aufgetreten ist. Die Brandschutzbekleidung wird dann nach DIN EN 13501-2 als K 60 klassifiziert.

Um ein Holzbauteil als hochfeuerhemmendes Bauteil in der Gebäudeklasse 4 einsetzen zu können, sind demnach zwei Prüfungen erforderlich: die Brandprüfung nach DIN EN 1363-1 [20] und die Prüfung der Brandschutzbekleidung nach DIN EN 14135 [21]. Der Vorteil dieser Regelung besteht darin, dass der Anwendungsbereich von Holzbauteilen, für die bereits der Nachweis der Klasse REI 60 bzw. EI 60 erbracht wurde, mit relativ geringem Aufwand auf die Gebäudeklasse 4 erweitert werden kann, indem zusätzlich die Brandschutzbekleidung nachgewiesen wird. Die Bauteile werden auf der Grundlage der Ergebnisse aus den beiden Brandprüfungen als Bauteile der Klasse REI 60 $K_2$60 bzw. EI 60 $K_2$60 nach DIN EN 13501-2 [22] klassifiziert (hochfeuerhemmend).

Konstruktive Mindestanforderungen

Durch die intensive Beteiligung der Forschergruppe an der Erarbeitung der Muster-Richtlinie gelang es, Anforderungen an Holzbauteile zu formulieren, die sich direkt vom realen Brand- und Rauchdurchgangsverhalten ableiten lassen. Anhand einiger Beispiele soll verdeutlicht werden, wie die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens in den einzelnen Punkten der Richtlinie umgesetzt wurden und wie sich Holzkonstruktionen der neuen Gebäudeklasse 4 vom herkömmlichen Holzbau bei Gebäuden geringer Höhe unterscheiden.

Neben den wesentlich strengeren brandschutztechnischen Anforderungen an die Bekleidung der Bauteile und der Auflage, ausschließlich nichtbrennbare Faserdämmstoffe zu verwenden, bestehen die Unterschiede zum herkömmlichen Holzbau vor allem in der Fertigung der Bauteilanschlüsse und der Öffnungslaibungen für Einbauten [23]. In den Anschlussbereichen und Laibungen dürfen keine durchgängigen Fugen vorhanden sein, damit einem Brandeintrag in die Konstruktion und einer Rauchweiterleitung in andere Nutzungsbereiche vorgebeugt wird.

Das Forschungsvorhaben [5], [6] hat ergeben, dass die Art der Fugenausbildung einen erheblichen Einfluss auf den Rauchdurchgang entlang der Bauteilanschlussfugen hat. Verdeutlicht werden soll dies anhand eines Vergleichs des Transmissionsgrades bei zwei unterschiedlichen Eckausbildungen zwischen Wand und Decke. Auf versuchstechnische Details soll an dieser Stelle nicht vertieft eingegangen werden, für Einzelheiten wird zum Beispiel auf [22] verwiesen.

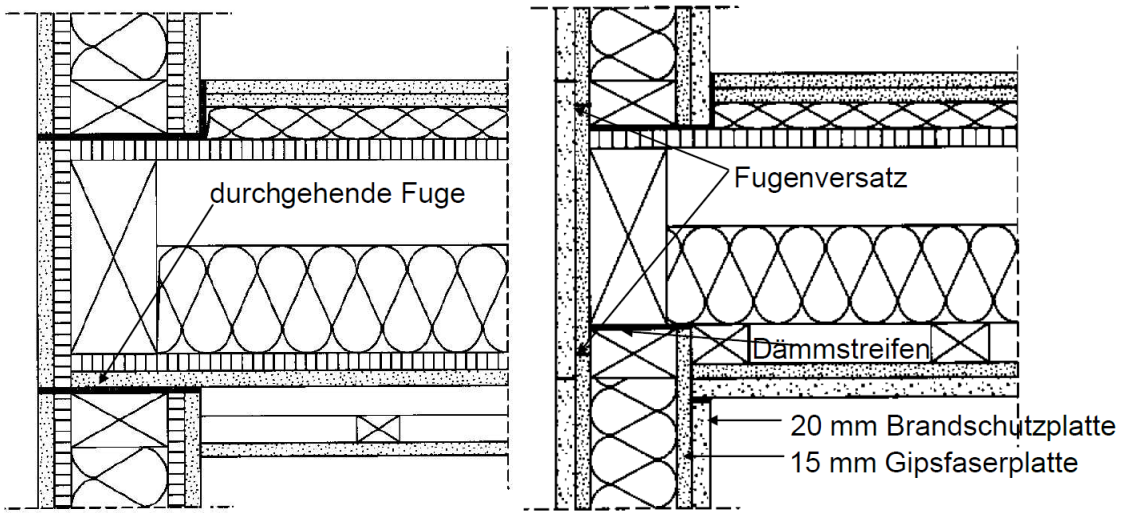


Bild 2 Anschlussdetail „Eckausbildung Wand/Decke “ ohne und mit Fugenversatz

Bei der links in Bild 2 dargestellten Anschlussvariante nahm ab etwa der 20. Versuchsminute der Rauchdurchgang deutlich zu, was sich anhand des abfallenden Transmissionsgrades (Bild 3, Kurvenverlauf „Fuge Wand/Decke I“) nachvollziehen lässt. Hier wurde die vom Fertigungsaufwand her einfachste Konstruktion mit einer durchgehenden horizontalen Fuge verwendet. Ganz anders verhält sich die in Bild 2 rechts dargestellte Anschlussvariante. Dort ist neben einer verbesserten Brandschutzbekleidung auch die Ausbildung der Fuge optimiert worden, und das Deckenbauteil wurde zugfest über Schrauben mit dem Wandbauteil verbunden. Die Bekleidung im Anschlussbereich wurde zwischen Wand und Decke mit versetzten Fugen montiert. Fertigungstechnisch ist diese Konstruktion etwas aufwändiger, zur Verringerung des Rauchdurchtritts aber umso vorteilhafter. Während der Versuchsdauer konnte in einem Messkanal entlang der Fuge mit dem Rauchdichtemessgerät keine Lichtschwächung gemessen werden. Der Transmissionsgrad blieb annähernd konstant bei 100 % (Bild 3, Kurvenverlauf „Fuge Wand/Decke II“). Auch der Durchgang von Brandgasen (CO, CO_2) fiel bei dieser Fugenausbildung äußerst gering aus [5].

Dieses Ergebnis war in der Muster-Richtlinie in Form einer Anforderung an die konstruktive Durchbildung der Anschlüsse von Wänden an Decken umzusetzen. Dabei sollte die Bauweise nicht auf eine einzige im Brandversuch positiv geprüfte Anschlussvariante beschränkt werden. Deshalb wurde auch nicht ausschließlich die geprüfte Konstruktion in der Richtlinie vorgeschrieben, zum Beispiel in Form einer Zeichnung. Um sowohl die Vielfalt der möglichen Konstruktionen zu erhalten als auch ein Maximum an Sicherheit gegenüber der Weiterleitung von Feuer und Rauch zu gewährleisten, waren jene konstruktiven Details herauszufinden, die für die Rauchweiterleitung entscheidend sind. Nur diese sollten in der Richtlinie vorgeschrieben werden. Im Falle des Anschlusses von Wänden an Decken sind dies drei Anforderungen:

- Im Anschlussbereich sind die Brandschutzbekleidungen der Bauteile mit Fugenversatz, Stufenfalz oder Nut- und Federverbindungen so auszubilden, dass keine durchgängigen Fugen entstehen.
- Bei Holzbalkendecken und Decken in Holztafelbauweise ist jeweils eine Schraubenverbindung im Bereich der Balken und in der Mitte der Verblockung auszuführen; der Abstand der Verbindungsmittel darf maximal 500 mm betragen, wobei die Einschraubtiefe zur Herstellung einer zugfesten Verbindung > 12 d_n sein muss.
- In der Fuge muss ein ca. 20 mm dicker Streifen aus Faserdämmstoffen nach DIN 18165-1 [25] (Schmelzpunkt > 1000°C) komprimiert eingebaut werden.

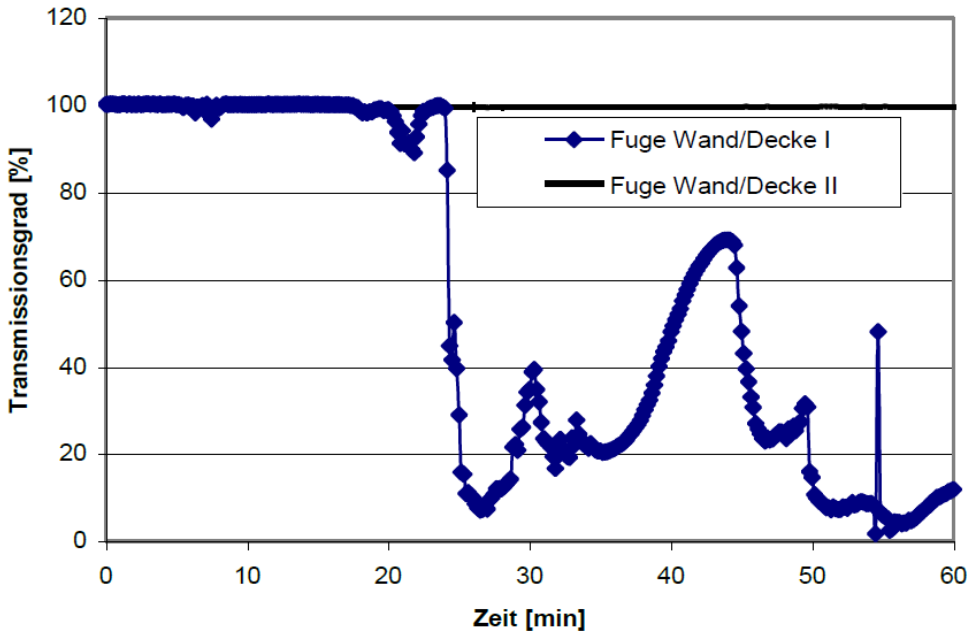


Bild 3 *Vergleich der Transmissionsgrade im Messkanal Fugenbereich; Versuche mit „Eckausbildungen Wand/Decke“ nach Bild 2*

Die Brandversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens haben auch gezeigt, dass Installationsführungen in Holzbauteilen einen potenziellen Schwachpunkt darstellen können, sofern keine geeigneten Maßnahmen getroffen werden. In Wandbauteilen traten auf der Rückseite von Hohlwanddosen Temperaturen von bis zu 600 °C auf, bei denen sich ein benachbartes Holztragglied entzünden kann [5]. Für den Einbau von Installationsführungen waren daher entsprechende konstruktive Mindestanforderungen so festzulegen, dass die Einleitung von Bränden in die Wand- und Deckenbauteile über Installationen und eine Brandweiterleitung innerhalb dieser Bauteile zuverlässig verhindert werden. Dies ist gewährleistet, wenn die nachfolgenden Anforderungen eingehalten werden:

- Installationen sind grundsätzlich in Schächten oder Kanälen, in Vorwandkonstruktionen oder Deckeninstallationsebenen zu führen.
- Kabelbündel sind innerhalb der Konstruktionen unzulässig.
- Einzelne Kabel dürfen innerhalb der Konstruktion geführt werden.
- Bis zu drei Kabel dürfen innerhalb der Konstruktionen geführt werden, wenn sie durch geeignete konstruktive Maßnahmen, z. B. die Führung in einem nichtbrennbaren Rohr, von der brennbaren Holzkonstruktion abgeschottet werden.
- Bei Durchführung der Kabel durch die Brandschutzbekleidung sind die verbleibenden Hohlräume mit nichtbrennbaren Baustoffen zu verspachteln.
- Hohlwanddosen zum Einbau von Steckdosen etc. dürfen nur im Bereich des mittleren Drittels zwischen zwei Holzständern eingebaut werden. Der Abstand zum nächsten Holzständer muss mindestens 150 mm betragen.

- Die Hohlwanddosen müssen gefachversetzt eingebaut werden. Sie sind innerhalb des Wandhohlraumes vollständig mit Faserdämmstoffen nach DIN 18165-1 [25] (Schmelzpunkt > 1000°C) zu umhüllen, wobei der Dämmstoff im Bereich der Hohlwanddosen auf eine Mindestdicke von 30 mm gestaucht werden darf.
- Im selben Gefach gegenüberliegende Hohlwanddosen dürfen nur angeordnet werden, wenn im Bereich der Hohlwanddosen eine Einkapselung über Kästen aus der Brandschutzbekleidung vorgesehen wird (Bild 4).

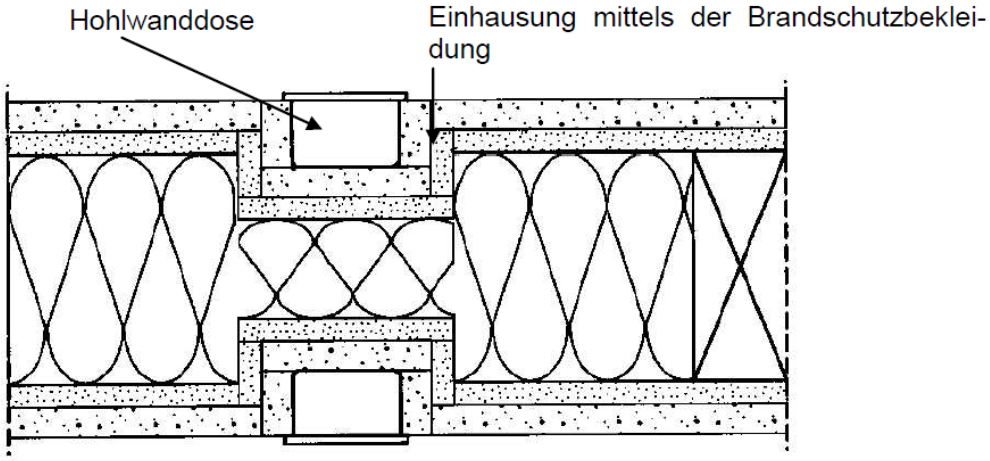


Bild 4 Einhausung bei gegenüberliegenden Hohlwanddosen

Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens flossen in die „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR)“ ein, die zusammen mit der Projektgruppe Brandschutz der Fachkommission Bauaufsicht erarbeitet wurde. Die dort aufgeführten konstruktiven Mindestanforderungen sollen bei mehrgeschossigen Holztragkonstruktionen der Gefahr einer Ausbreitung von Rauch und Brandgasen sowie des verdeckten Weiterbrandes innerhalb der Konstruktion wirksam vorbeugen.

FORSCHUNGSERGEBNISSE FÜR EINEN VORSCHLAG ZUR ÜBERARBEITUNG DER MUSTER-HOLZBAURICHTLINIE

Auf Grundlage der Muster-Holzbaurichtlinie sind zahlreiche Gebäude der Gebäudeklasse 4 errichtet worden. Es ist jedoch festzustellen, dass es dabei aus verschiedenen Gründen zu Abweichungen von der Richtlinie kam. In den meisten Fällen bestand die Abweichung in einer reduzierten Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung. Gründe hierfür waren zum einen wirtschaftliche Überlegungen und zum anderen der Wunsch nach schlankeren Konstruktionen. Aus ökologischer Sicht wurde häufig die Verwendung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holzwolle, Cellulose oder auch Schafwolle vom Bauherrn nachgefragt. Diese Produkte sind jedoch brennbar und daher zunächst nicht zugelassen. Vorteile hinsichtlich des Schallschutzes und des Last-

abtrages bietet auch die Holzmassivbauweise, die daher zunehmend im mehrgeschossigen Holzbau verlangt wird. Außerdem entspricht sie der Erwartung von Bewohnern eines Holzhauses, dass die ökologische Bauweise auch von außen erkennbar sein soll, insbesondere an den Oberflächen massiver, flächiger Holzbauteile. Das widerspricht jedoch den Anforderungen der Muster-Holzbaurichtlinie hinsichtlich einer nichtbrennbaren Bekleidung. [26], [27]

Um diese Abweichungen auf Basis wissenschaftlicher Untersuchungen beurteilen zu können, wurden am iBMB aus Brandversuchen und theoretischen Überlegungen Mindestanforderungen für die Konstruktionen abgeleitet. Mit Hilfe einer Risikoanalyse wurde untersucht, wie die mit der Reduktion der Leistungsfähigkeit der Brandschutzbekleidung einhergehende Erhöhung des Gesamtbrandrisikos im Rahmen von ganzheitlichen, zielorientierten Brandschutzkonzepten durch andere Maßnahmen kompensiert werden kann. Solche Brandschutzkonzepte wurden für den Holztafelbau sowohl mit nichtbrennbarer als auch mit brennbarer Dämmung, mit reduzierter Bekleidung sowie für die Holzmassivbauweise ohne Bekleidung erarbeitet. [31]

Bei der Anordnung einer $K_2$60- Brandschutzbekleidung werden die bauweisenspezifischen Brandrisiken sowohl beim Holztafelbau als auch, wie in [9] gezeigt, bei der Holzmassivbauweise vollständig kompensiert. Eine Reduzierung der Brandschutzbekleidung von 60 Minuten Entzündungsschutz auf 30 Minuten hat zur Folge, dass es im Brandfall zu einer Entzündung der Holzkonstruktion kommen kann. Zur Kompensation kann eine Brandmeldeanlage dienen, die für eine frühzeitige Alarmierung der Bewohner sorgt, sodass diese vor dem Versagen der Brandschutzbekleidung das Gebäude selbstständig verlassen können. Eine Brandmeldeanlage nach DIN VDE 0833 Teil 2 [28] und DIN 14675 [29] zieht die Anordnung erheblicher technischer Einrichtungen wie die Übertragungsanlage zur Feuerwehr oder die Brandmeldezentrale nach sich. Dieser technische und finanzielle Aufwand sollte daher nur für Sonderbauten mit einem höheren Risikopotenzial gefordert werden. Eine Alternative, um die Vorteile der automatischen Brandmeldung mit geringerem Aufwand für Wohngebäude nutzen zu können, bietet die Anordnung von Brandmeldern nach DIN 14676 [30]. Um die Funktionstüchtigkeit der Brandmelder zu gewährleisten, sollte jedoch eine regelmäßige Wartung durch eine Elektrofachkraft vorgesehen werden. Die Auslösung des automatischen Alarms führt auch ohne automatische Übertragung zur unverzüglichen Alarmierung der Feuerwehr durch Nutzer oder Passanten. Eine eventuell erforderliche Fremdrettung kann somit schnell erfolgen, ebenso die eigentliche Brandbekämpfung (Tabelle 1).

Tabelle 1 Übersicht der entwickelten Brandschutzkonzepte [10]

	Konzept				
	1	2	3	4	5
Bauweise	Holztafel- und Holzmassivbauweise		Holzmassivbauweise		
Qualität der Bauteile	REI 60 $K_2$60	REI 60 $K_2$30	REI 60 unbekleidet	REI60 unbekleidet	REI60 $K_2$30 / K0
Max. Größe der NE	< 400 m²	< 400 m²	< 400 m²	< 100 m²	< 200 m²
Autom. Brandmeldung	-/-	Ja	-/-	Ja	Ja
Klassifizierte Türen	-/-	-/-	-/-	Ja *	Ja *
Rettungswegsituation	-/-	-/-	-/-	Ja *	Ja *
Autom. Löschanlage	-/-	-/-	Ja	-/-	-/-

*) Alternativ zur Verbesserung der Wohnungseingangstüren kann die Rettungswegsituation durch Anordnung eines 2. baulichen Rettungsweges verbessert werden.

Da bei der Holzmassivbauweise die Gefahr unentdeckter Hohlraumbrände nicht besteht, ist sogar eine unbekleidete Ausführung denkbar. Dies führt jedoch zu einem erhöhten brandschutztechnischem Risiko, das in der Gefahr der raschen Brandausbreitung über brennbare Oberflächen in Verbindung mit der Umsetzung der zusätzlichen immobilen Brandlast begründet ist. Dies muss sinnvoll kompensiert werden und ist durch die Installation einer automatischen Löschanlage möglich. Die Löschanlage begrenzt dabei den Brand bereits in der Entstehungsphase, der letztendlich von der Feuerwehr gelöscht wird (Tabelle 1).

Wird auf eine Brandschutzbekleidung verzichtet und zur Kompensation keine automatische Löschanlage vorgesehen, muss im Brandfall die thermische Umsetzung der zusätzlichen immobilen Brandlast unterstellt werden. In [32] wurde dargelegt, dass die bewertete Brandlast eines Gebäudes in Holzmassivbauwiese ohne brandschutztechnische Bekleidung etwa um den Faktor 4 größer ist als die Brandlast eines Gebäudes aus Mauerwerk oder Beton (Bild 5). Diesem Sachverhalt muss durch eine Begrenzung der thermisch umsetzbaren Brandlast begegnet werden. Dies geschieht durch die Reduzierung der maximalen Größe der Nutzungseinheit und durch eine Beschränkung unbekleideter Bauteile auf Teilbereiche. Falls alle Bauteile (sowohl Wände als auch Decken) in massiver Holzbauweise und ohne Bekleidung ausgeführt werden sollen, muss die maximal zulässige Fläche einer Nutzungseinheit um etwa den Faktor 4 auf 100 m² Größe reduziert werden. Dies ist notwendig, damit die Gesamtbrandlast den allgemein üblichen Wert einer Nutzungseinheit von 400 m² mit nichtbrennbarer Konstruktion nicht überschreitet. Reduziert man den Anteil unbekleideter Holzbauteile, kann die maximal zulässige Fläche der Nutzungseinheit entsprechend vergrößert werden. Aus aktuellen Bauvorhaben weiß man, dass oftmals der Wunsch nach einer unbekleideten Deckenunterseite besteht. Auf der sicheren Seite liegend kann ein Flächenanteil der unbekleideten Deckenunterseiten von 50 % angenommen werden. Ist also höchstens die Hälfte der Konstruktionsoberflächen (ohne Fußboden) brennbar, sollte die Größe der Nutzungseinheiten auf maximal 200 m² beschränkt werden. Diese Größe ist im Allgemeinen für Wohnungen als ausreichend anzusehen.

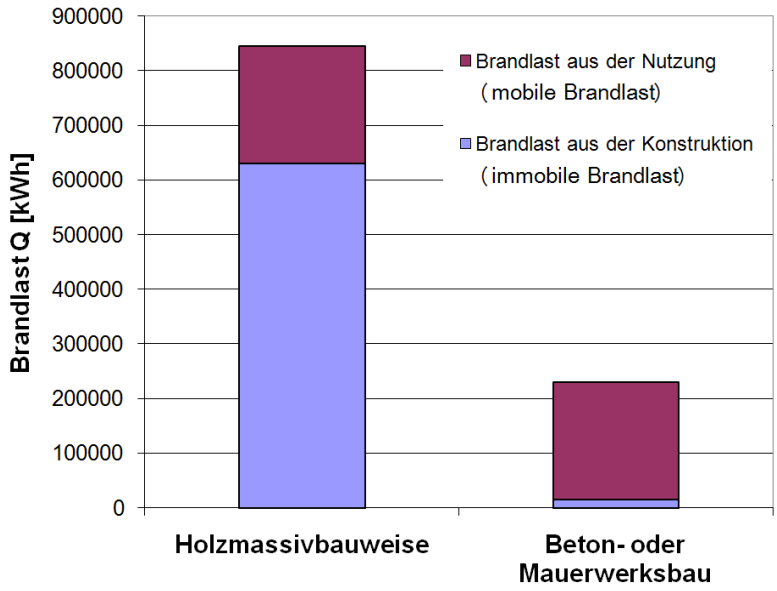


Bild 5 *Brandlastvergleich von Holzmassivbauweise mit Beton- und Mauerwerksbau*

Dennoch gilt weiter, dass bei unbekleideter Ausführung der Holzkonstruktion mit einer schnellen Brandausbreitung zu rechnen ist, sodass die Rettungswege frühzeitig blockiert sein können. Neben einer frühzeitigen Alarmierung der Bewohner durch eine automatische Brandmeldung muss daher die Rettungswegsituation insgesamt verbessert werden. Dies kann durch den Einbau von Rauchschutztüren zwischen der Nutzungseinheit und dem notwendigen Flur bzw. durch rauchdichte Brandschutztüren des Typs T 30-RS zwischen einer Nutzungseinheiten und dem Treppenhaus geschehen. Alternativ kann ein zweiter baulicher Rettungsweg beispielsweise über eine Außentreppe angeordnet werden, der bei einer Blockierung des ersten Rettungsweges durch Feuer und Rauch benutzbar wäre, sodass auf den Einbau von klassifizierten Wohnungseingangstüren verzichtet werden könnte (Tabelle 1).

Risikogerechte Bewertung der Kompensationsmaßnahmen

Die sicherheitstechnische Gleichwertigkeit der dargestellten Brandschutzkonzepte mit reduziertem Entzündungsschutz und entsprechenden Kompensationsmaßnahmen mit dem Standardbrandschutzkonzept der MBO ist bislang nur qualitativ diskutiert worden. Ein semi-quantitativer Nachweis wurde in [10] mit Hilfe einer Risikoindexmethode geführt. Die ursprünglich in Skandinavien entwickelte Methode zur Bewertung des Brandrisikos mehrgeschossiger Wohngebäude [33] wurde dazu an das deutsche Baurecht angepasst, und die einzelnen das Brandrisiko beeinflussenden Parameter wurden auf Grundlage einer Delphi-Umfrage unter Experten neu gewichtet. Insbesondere die Parameter zum Tragwerk mussten überarbeitet werden, um die Kapselbauweise zu berücksichtigen. Außerdem wurden so genannte Kompensationsgruppen einge-

führt, um so die Gleichwertigkeit von Maßnahmenkombinationen besser nachweisen zu können.

Mit der so modifizierten Indexmethode wurden die unterschiedlichen Holzbauweisen in einer vergleichenden Risikostudie bewertet. Dazu wurde zunächst als Vergleichswert das allgemein anerkannte Sicherheitsniveau der MBO anhand einer Bewertung eines mehrgeschossigen Gebäudes in REI 60 $K_2$60-Bauweise gemäß der Muster-Holzbaurichtlinie bestimmt. Alle Parameter entsprachen dabei den Mindestanforderungen der MBO. Anschließend wurden die zuvor erarbeiteten Konzepte auf die gleiche Weise bewertet. Darüber hinaus wurde auf die gleiche Weise der Risikovergleich innerhalb der Kompensationsgruppen durchgeführt. Dies bedeutet, dass neben den Parametern, die die Anforderungen der MBO nicht erfüllen, ausschließlich solche Parameter berücksichtigt werden, die auf Grundlage der qualitativen Risikoanalyse zur zielgerechten Kompensation geeignet sind. Je geringer dann der errechnete Risikoindex ist, desto sicherer ist das Gebäude.

Die Gegenüberstellung in Tabelle 2 zeigt, dass auch bei einer Ausführung der Holzbauteile mit einem reduzierten Entzündungsschutz unter Verwendung der vorgeschlagen Kompensationsmaßnahmen das in Deutschland allgemein akzeptierte brandschutztechnische Sicherheitsniveau in vollem Umfang erhalten bleibt.

Tabelle 2 Risikovergleich der entwickelten Brandschutzkonzepte

	Brandschutzkonzept				
	1 (MBO)	2	3	4	5
Qualität der Bauteile	REI 60 $K_2$60	REI 60 $K_2$30	REI 60 unbekleidet	REI 60 unbekleidet	REI 60 K30 / K0
Max. Größe der NE	< 400 m²	< 400 m²	< 400 m²	< 100 m²	< 200 m²
Autom. Brandmeldung	-/-	Ja	-/-	Ja	Ja
Klassifizierte Türen	-/-	-/-	-/-	Ja	Ja
Autom. Löschanlagen	-/-	-/-	Ja	-/-	-/-
Risikoindex	3,27	2,70	2,85	2,83	2,72

VIERGESCHOSSIGER ALLERGIKERGERECHTER WOHNUNGSBAU IN FREIBURG

Das 1. Projektbeispiel zeigt, wie die vorstehenden Überlegungen in der Praxis bei einem viergeschossigen Holztafelbau umgesetzt wurden. Auch im Sonderbau hat die mehrgeschossige Holzbauweise mittlerweile Einzug gehalten. Die Hauptschwierigkeit besteht aber darin, dass die meisten Sonderbauverordnungen gerade im mehrgeschossigen Bereich eine feuerbeständige Bauweise voraussetzen, die ein Bauteil in Holzbauweise per Definition nicht erfüllen

kann. Im Rahmen eines ganzheitlichen Brandschutzkonzeptes ist daher im Einzelfall nachzuweisen, dass die allgemeinen bauaufsichtlichen Schutzziele durch geeignete Kompensationsmaßnahmen erreicht werden. Grundlage hierfür bilden die dargestellten wissenschaftlichen Ergebnisse.

In Freiburg (Baden-Württemberg) wurde ein nach wohngesundheitlichen Aspekten geplantes Gebäude in Holztafelbauweise errichtet [34]. Die in Bild 6 dargestellte Wohnanlage besitzt rechteckige Abmessungen (ca. 27 m x 12 m), ist voll unterkellert und hat vier oberirdische Geschosse. Die Fußbodenhöhe des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen liegt bei ca. 9,10 m. Im Gebäude befinden sich insgesamt acht Nutzeinheiten (Wohnungen). Die vier obersten Wohnungen erstrecken sich jeweils über zwei Geschosse (Maisonettewohnungen). Auf dem teilweise verglasten und teilweise extensiv begrünten Flachdach befinden sich Terrassen, die von den Maisonettewohnungen über interne Treppen erschlossen werden.

Bild 6 4-geschossige Wohnanlage in Holzbauweise in Freiburg

Die Bewertung des Brandschutzes erfolgte auf Basis der einschlägigen Vorschriften des Landes Baden-Württemberg. Für die baurechtliche Einstufung des Gebäudes und die sich daraus ergebenden Anforderungen an den baulichen Brandschutz wurde zusätzlich die Muster-Holzbaurichtlinie (M-HFHHolzR) [7] herangezogen.

Die Besonderheit bezüglich des Brandschutzes liegt bei diesem Projekt in der Verwendung von brennbaren Dämmstoffen innerhalb der Wandkonstruktion. Es wurden Zellulosefasern in den Wänden eingesetzt. Innerhalb der Decken kam Mineralwolle zum Einsatz. Die zweilagige Brandschutzbekleidung aus Gipsfaserplatten muss so dimensioniert sein, dass sie neben der Entzündung der Holztragglieder und des Dämmstoffes auch die Pyrolyse der Zellulose ver-

hindert, die erfahrungsgemäß bereits eher einsetzt als bei einer Temperaturerhöhung von 250 K (Leistungskriterium der Brandschutzbekleidung).

Als weitere Abweichung wurde entgegen Ziffer 3.2 der M-HFHHolzR [7] die Kapselklasse der Brandschutzbekleidung von $K_2$60 auf $K_2$30 reduziert, was erheblich zur Wirtschaftlichkeit der Konstruktion beigetragen hat. Als eine von mehreren Kompensationsmaßnahmen für diese Abweichungen wurden flächendeckend Rauchmelder (in Küchen Wärmemelder) nach DIN 14675 [29] und DIN VDE 0833-2 [28] angeordnet. Auf eine Aufschaltung zur Feuerwehr wurde in Abstimmung mit dem Bauordnungsamt und der Berufsfeuerwehr Freiburg verzichtet.

Ein von der Anordnung der erforderlichen Feuerwehraufstellflächen bis zur Planung der einzelnen Rettungsfenster detailliert ausgearbeitetes Fluchtwegkonzept sorgt für eine sichere Evakuierung der Bewohner im Brandfall. Die Fluchtweglänge beträgt maximal 20 m, zulässig wären nach Landesbauordnung Baden-Württemberg (LBO) 35 m.

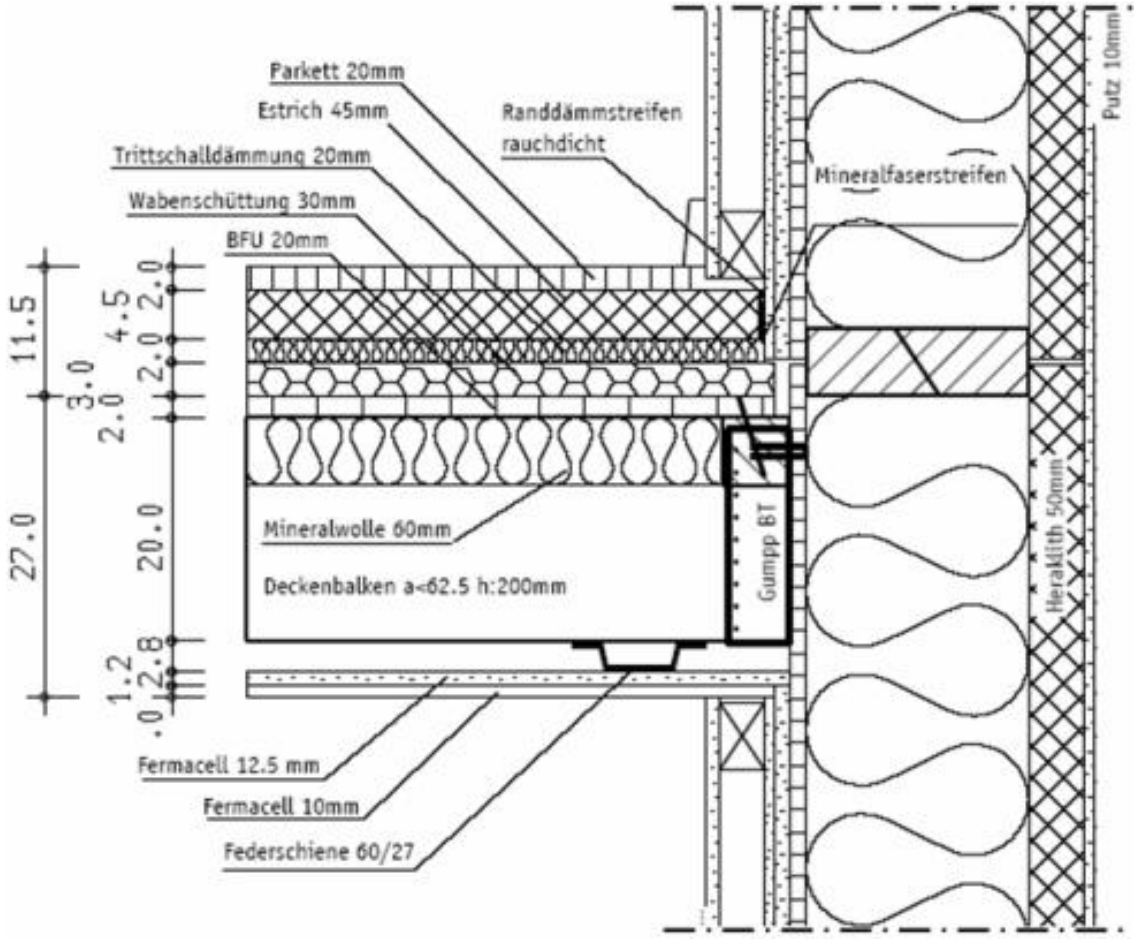


Bild 7 Anschluss Außenwand/Decke. Bildrechte: Zimmerei Grünspecht e. G.

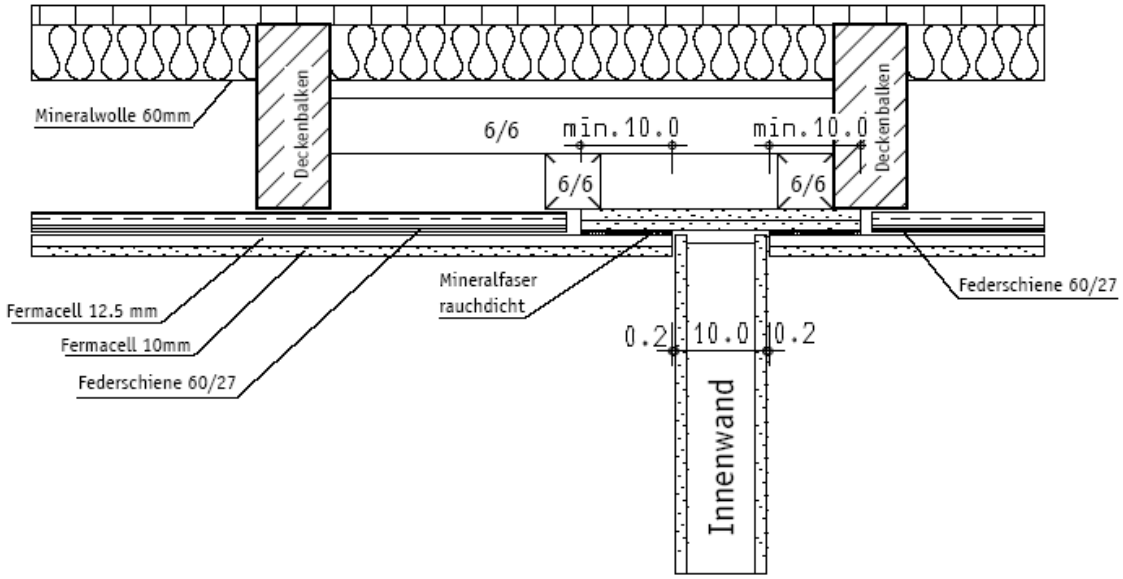


Bild 8 *Anschluss einer nicht tragenden, nicht raumabschließenden Innenwand an eine raumabschließende Decke. Bildrechte: Zimmerei Grünspecht e. G.*

Durch die hochfeuerhemmende Ausbildung der tragenden, aussteifenden und raumabschließenden Bauteile bleiben mögliche Brände 60 Minuten lang auf eine Nutzeinheit beschränkt. Die Feuerwehr findet daher bei ihrem Eintreffen ein beherrschbares Szenario vor. Darüber hinaus bieten die Anordnung einer Feuerwehrbewegungsfläche in direkter Nähe zum Treppenraum sowie zweier Hydranten in unmittelbarer Nähe zum Grundstück den Einsatzkräften gute Bedingungen für wirkungsvolle Löschmaßnahmen. Hierzu trägt auch bei, dass die notwendige Treppe sowie die Gebäudeabschlusswand in Massivbauweise (Stahlbeton) hergestellt wurden. Durch die Ausbildung der Bauteilanschlüsse gemäß den konstruktiven Anforderungen der M-HFHHolzR [7] wird eine Rauchweiterleitung in benachbarte Wohneinheiten wirksam behindert (Bild 7).

Beim Anschluss von nicht tragenden und nicht raumabschließenden Innenwänden an die hochfeuerhemmenden Decken wird durch konstruktive Maßnahmen ein Brandeintrag infolge Versagens der nicht klassifizierten Wände verhindert (Bild 8). Installationen wurden bei diesem Projekt durchgängig in Vorwandebenen verlegt, um eine Brandentstehung im Inneren der Tragkonstruktionsebene zu verhindern. Bei Verwendung von brennbaren Dämmstoffen dürfen grundsätzlich keine elektrischen Leitungen innerhalb der Dämmebene verlegt werden.

Die Kapselklasse $K_2$30 der Brandschutzbekleidung, bestehend aus einer 12,5 mm und einer 10 mm dicken Gipsfaserplatte, wurde durch einen Brandversuch in Anlehnung an die DIN EN 14135 [21] nachgewiesen. Die Prüfung erfolgte sowohl mit einem praxisgerecht hergestellten Wand- als auch mit einem Deckenelement jeweils im Kleinversuchsmaßstab mit einer Probekörpergröße von ca. 1,0 m x 1,0 m (Bild 9). Der geprüfte Wandaufbau ist in Bild 10 dargestellt, wobei der Brandversuch ohne Installationsebenen durchgeführt wurde,

die im Brandfall als zusätzliche Verschleißschicht dienen. Damit liegt die Prüfung gegenüber dem tatsächlichen Aufbau eher auf der sicheren Seite.

Bild 9 Probekörper im eingebauten Zustand in der Wand des Brandofens

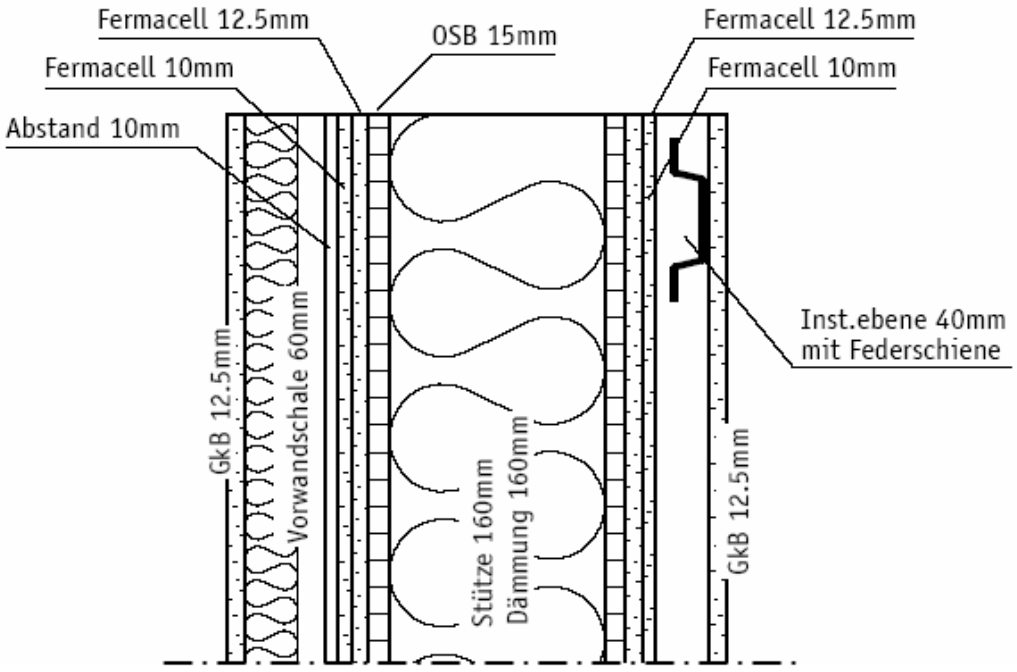


Bild 10 Aufbau der Wohnungstrennwände. Bildrechte: Zimmerei Grünspecht e. G.

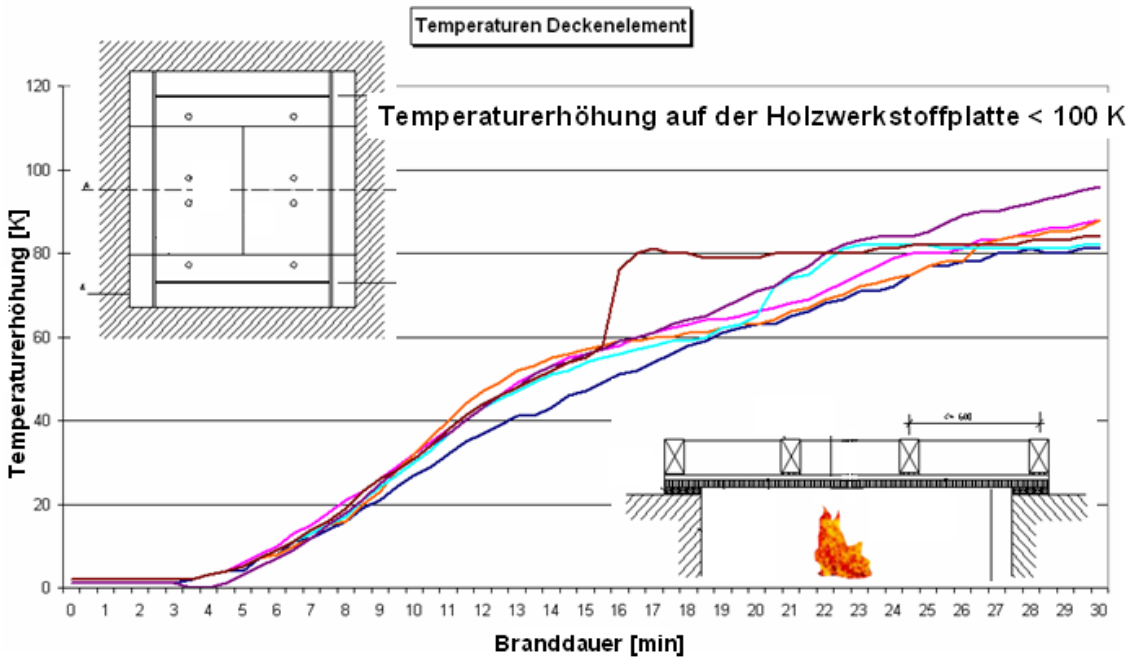


Bild 11 Temperaturverläufe hinter der Brandschutzbekleidung (Thermoelemente auf Holzwerkstoffplatte befestigt)

Die Ergebnisse des Brandversuches in Bild 11 zeigen, dass die gewählte Brandschutzbekleidung die Anforderungen der Kapselklasse $K_2$30 nach DIN EN 13501-2 [22] mit erheblichen Sicherheitsreserven erfüllt. Die Temperaturerhöhung auf der Indikatorplatte betrug nach 30 Minuten Brandbeanspruchung maximal ca. 95 K. Zulässig wären nach DIN EN 14135 im Mittel 250 K und im Maximum 270 K.

Auf der Holzwerkstoffplatte waren nach dem Brandversuch weder auf beim Decken- noch beim Wandelement Verkohlungen festzustellen (Bild 12). Selbst im Bereich der Schrauben, die aufgrund des Temperatureintrags infolge Wärmeleitung oftmals eine Schwachstelle darstellen, traten keinerlei Verkohlungen auf. Auch Verfärbungen, die nach DIN EN 14135 [21] toleriert werden, waren nicht feststellbar.

Aufgrund der geringen Temperaturen innerhalb der Wand kam es nicht zu einer Pyrolyse (Ausgasen) der Zellulosedämmung. Deren Rauchgaspotential trägt damit nachweislich für mindestens 30 Minuten nicht zum Brandgeschehen bei. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die konstruktiven Anforderungen der M-HFHHolzR [7] an Anschlüsse ausschließlich nichtbrennbare Dämmstoffe im Bauteilinneren voraussetzen. Unter diesen Randbedingungen wurden die der M-HFHHolzR zugrunde liegenden Brandversuche durchgeführt. Bei einem Ausgasen von Dämmstoffen innerhalb der Bauteile könnte ein Durchgang von Rauch und toxischen Gasen in benachbarte Nutzeinheiten nicht ausgeschlossen werden. Zu bemerken ist, dass das Kapselkriterium gemäß DIN EN 14135 [21] auf der Oberseite der Holzwerkstoffplatte abgeprüft wird, da diese aussteifend wirkt und damit zur Tragkonstruktion zählt. Wenn auch die Holzwerkstoff-

platte nicht Bestandteil der Brandschutzbekleidung ist, so schützt sie dennoch die Zellulosedämmung zusätzlich vor einer vorzeitigen Erwärmung und trägt außerdem zum Feuerwiderstand der Gesamtkonstruktion bei. Auch bei Wandaufbauten, die im vorliegenden Fall aus statischen Gründen ohne die Holzwerkstoffplatte auskommen, ist aufgrund der Temperaturen unterhalb von 100 °C auf der Rückseite der innen liegenden Gipsfaserplatte nicht von einer Pyrolyse der Zellulosedämmung auszugehen, diese setzt erst bei Temperaturen > 225 °C ein.

Bild 12 Zustand der Holzwerkstoffplatte hinter der Brandschutzbekleidung nach dem Brandversuch (30 Minuten Brandbeanspruchung gemäß ETK)

SIEBENGESCHOSSIGER SONDERBAU IN HOLZBAUWEISE

In der Christburger Straße in Berlin wird ein siebengeschossiges Gebäude in Holzbauweise errichtet. Damit wird die zulässige Fußbodenhöhe des obersten Aufenthaltsraums gegenüber der Gebäudeklasse 4 um zwei Geschosse überschritten, und zwar bis auf ca. 3 m unterhalb der Hochhausgrenze. Das Gebäude wird daher in die Gebäudeklasse 5 eingestuft (Bild 1). Die sich hierdurch ergebenden Abweichungen von der Berliner Bauordnung mussten mit einem Brandschutzkonzept begründet werden, das entsprechende Kompensationsmaßnahmen vorschreibt. Dabei war zu berücksichtigen, dass es sich um einen Sonderbau handelt. Die Geschossebenen werden dabei von der Garage über eine Mensa bis hin zu einer Pflegeeinrichtung unterschiedlich genutzt. Es handelt sich um eine Baulücke zwischen vorhandenen Gebäuden. Das unterkellerte Gebäude gliedert sich in ein siebengeschossiges Vorderhaus und ein fünfgeschossiges Hinterhaus. Der Baukörper weist bei einem rechteckigen Grundriss mit den maximalen Abmessungen von ca. 47,3 m x 13 m auf. Abgekoppelt vom Hauptbaukörper befinden sich die im freien Luftverbund ge-

planten Treppenanlagen mit Übergängen in Stahlbetonbauweise. Die Fußbodenhöhe des obersten Geschosses liegt im Vorderhaus bei ca. 19,5 m und im fünfgeschossigen Hinterhaus bei 13,2 m über dem Geländeniveau. Bild 13 zeigt die Lage des Gebäudes.

Im Rahmen dieses Beitrags wird ausschließlich auf die besonderen risikoerhöhenden Faktoren der Holzbauweise eingegangen. Die sich aus den diversen Nutzungen ergebenden Risiken (zum Beispiel erhöhte Personenanzahl in der Versammlungsstätte, nicht gehfähige Personen in der Pflegewohngruppe) können hier nicht vertieft behandelt werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die betreffenden Sonderbauverordnungen in Berlin nicht eingeführt sind. Es wurden daher die entsprechenden Muster verwendet. Demnach werden in der Versammlungsstätte im 1. Obergeschoss entsprechend den baurechtlichen Anforderungen natürliche Rauch- und Wärmeabzüge installiert. Zusätzlich wird in den als Sonderbau eingestuften Nutzungen des Gebäudes eine Sicherheitsbeleuchtung installiert.

Bild 13 *Lage des Objekts in Relation zu den benachbarten Gebäuden Bildrechte: Kaden Klingbeil Architekten*

Die folgenden Nutzungen sind im Gebäude vorgesehen:

- Kellergeschoss
  Tiefgarage, Technik- und Hausanschlussraum, Lager- und Abstellräume, Umkleideräume für Angestellte.

- Erdgeschoss
  Hebamme, Hort und Krippe (Kinderbetreuung).
- 1. Obergeschoss
  Mensa, Catering. Gastplätze für ca. 112 Personen (einschließlich Sitzplätze auf Terrasse). Im Rahmen von besonderen Veranstaltungen (Feiern) können auch mehr als 200 Personen anwesend sein.
- 2. Obergeschoss
  Arztpraxen: Kinderarzt, Gemeinschaftspraxis bestehend aus Physiotherapie, Logopädie und Ergotherapie.
- 3. Obergeschoss
  Wohngruppe für ältere Bewohner (Senioren). In erster Linie sind mobile Bewohner vorgesehen, die jedoch auch psychisch eingeschränkt sein können (demente Personen). Die Nutzung soll generell durch Bewohner aller Pflegestufen (Stufen I bis III) möglich sein, was in der brandschutztechnischen Konzeption zu berücksichtigen ist.
- 4. bis 6. Obergeschoss
  Wohnungen.

Ausführung der Konstruktion

Die grundsätzliche bauliche Anforderung an das Tragwerk ist eine feuerbeständige Ausführung. Diese kann in Holzbauweise per Definition nicht eingehalten werden, denn feuerbeständig heißt: „in den wesentlichen Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen“. Wohl aber kann mit Holz dieselbe Feuerwiderstandsdauer erreicht werden wie mit Mauerwerk oder Stahlbeton. Die Tragkonstruktion wurde über eine entsprechende Überdimensionierung der Holzquerschnitte so ausgelegt, dass sie eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten erreicht. Besondere Sorgfalt verlangte dabei die brandschutztechnische Ausbildung der Knoten und Anschlüsse. Hier mussten zum Teil Sonderlösungen entwickelt werden. Ein vorzeitiger Einsturz des Gebäudes im Brandfall ist durch die durchgängige F 90-Ausbildung des Tragwerks ausgeschlossen.

Die Kellerwände werden ebenso wie die Decke zum Erdgeschoss aus Stahlbeton bestehen. Die Stützen und die äußeren Brandwände sowie die Aufzugsschächte des Gebäudes werden ebenfalls aus Stahlbeton hergestellt, sodass in diesen Bereichen die Anforderung feuerbeständig eingehalten wird.

Die tragenden Außenwände des siebengeschossigen Vorderhauses werden in Holzmassivbauweise errichtet. Um einer erhöhten Brandlastdichte aufgrund der Verwendung brennbarer Baustoffe vorzubeugen, wurde eine Kapselung in $K_2$60-Qualität nach DIN EN 13501-2 [22] und gemäß den Konstruktionsvorschriften der M-HFHHolzR [7] vorgesehen. Die Bekleidung besteht innen aus zwei jeweils 18 mm dicken Gipsfaserplatten, die nach dem Abspachteln der Fugen sofort die malerfertige Ansicht bildet. Auf der Außenseite wurde eine Kapselung aus 1x 12,5 mm Gipsfaserplatte in Kombination mit einer 100 mm

Steinwolllamelle mit 8 mm mineralischem Putzsystem ausgeführt. Ein vorzeitiges Brennen der Tragkonstruktion ist also innerhalb der ersten 60 Minuten nicht möglich, sofern die Qualität der Bauausführung sichergestellt ist. Für 60 Minuten ist folglich eine Gleichwertigkeit zu einem Gebäude in Massivbauweise gegeben. Für Brandschutzbekleidungen zur Erfüllung der Kapselanforderung $K_2$60 liegen mittlerweise zum Teil bauaufsichtliche Verwendbarkeitsnachweise (allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis) vor. Wo dies nicht der Fall ist, kann mittels eines Kleinbrandversuches und auf Basis eines Gutachtens einer anerkannten Materialprüfanstalt eine objektbezogene Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden. Die tragenden Außenwände des fünfgeschossigen Hinterhauses erhalten dieselbe Kapselung, werden jedoch in Holztafelbauweise mit Mineralwolle-Volldämmung hergestellt.

Die Geschossdecken der oberirdischen Geschosse einschließlich der Dachdecke werden in Holzbetonverbundbauweise errichtet, mit einer 10 cm Ortbetonschicht und einer Brettschichtholzdicke von 14 cm. Bei Brandbeanspruchung von oben verhalten sich diese Decken aufgrund der oberseitigen Betonschicht ähnlich wie eine herkömmliche Stahlbetondecke. Anders als die Wandoberflächen wurden die Deckenunterseiten in Sichtholzqualität ausgeführt. In Küchenbereichen wird aufgrund des höheren Risikos der Brandentstehung die gleiche Brandschutzbekleidung aus 2 x 18 mm Gipsfaserplatte wie auf den Innenseiten der tragenden und raumabschließenden Wände gewählt. Die sonstigen Deckenunterseiten werden durch eine bauaufsichtlich zugelassene transparente Brandschutzbeschichtung geschützt, wodurch die Baustoffklasse von normalentflammbar zu schwerentflammbar gemäß DIN 4102-1 [35] verbessert wird.

Die Bedachung wird aus Bitumenschweißbahnen mit anschließendem Gründachaufbau bestehen. Nichttragende Trennwände werden als Metallständerwände mit Mineralwolledämmung und Gipskartonplatten aufgebaut.

Eine Abweichung vom Baurecht besteht im vorliegenden Fall in der Verwendung von brennbaren Baustoffen in den Außenwänden und den Geschossdecken. Durch die geplante zweilagige Bekleidung aus Gipsplatten (GF oder GKF) und Steinwolldämmplatten werden die Massivholzelemente und Holzständer der Außenwände für mindestens 60 Minuten gekapselt (Kapselklasse $K_2$60 nach DIN EN 13501-2 [22]), wodurch die Entzündung oder Pyrolyse für diesen Zeitraum nachweislich verhindert wird.

Als Kompensationsmaßnahme für die Abweichung vom Baurecht hinsichtlich der Verwendung von brennbaren Tragkonstruktionen in der Gebäudeklasse 5 wird eine flächendeckende automatische Brandmeldeanlage mit Aufschaltung zur Einsatzleitstelle der Feuerwehr nach EN 54, DIN 14675 und DIN VDE 0833 angeordnet. In Verbindung mit der automatischen Brandmeldeanlage kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb von 60 Minuten nach Brandbeginn ein Löschangriff der Berliner Feuerwehr erfolgt, sodass de facto kein wesentlicher Unterschied zu Stahl- oder Massivbauten besteht.

Das Problem der Rauchweiterleitung über Bauteilanschlüsse Wand/Wand und Wand/Decke wird beherrscht, indem die in der M-HFHHolzR [7] genannten konstruktiven Mindestanforderungen erfüllt werden.

Der Raumabschluss zwischen den Nutzungseinheiten wird überwiegend über die Geschossdecken realisiert, da mit Ausnahme des 2. Obergeschosses (drei Arztpraxen) jede Ebene eine eigene Nutzungseinheit bildet. Selbstverständlich ist auf die Rauchdichtigkeit zwischen den Brandabschnitten der Pflegeeinrichtung besonders zu achten.

Bild 14 zeigt das Zusammenfügen der vorgefertigten Elemente anhand eines anderen, ähnlich gelagerten Projektbeispiels.

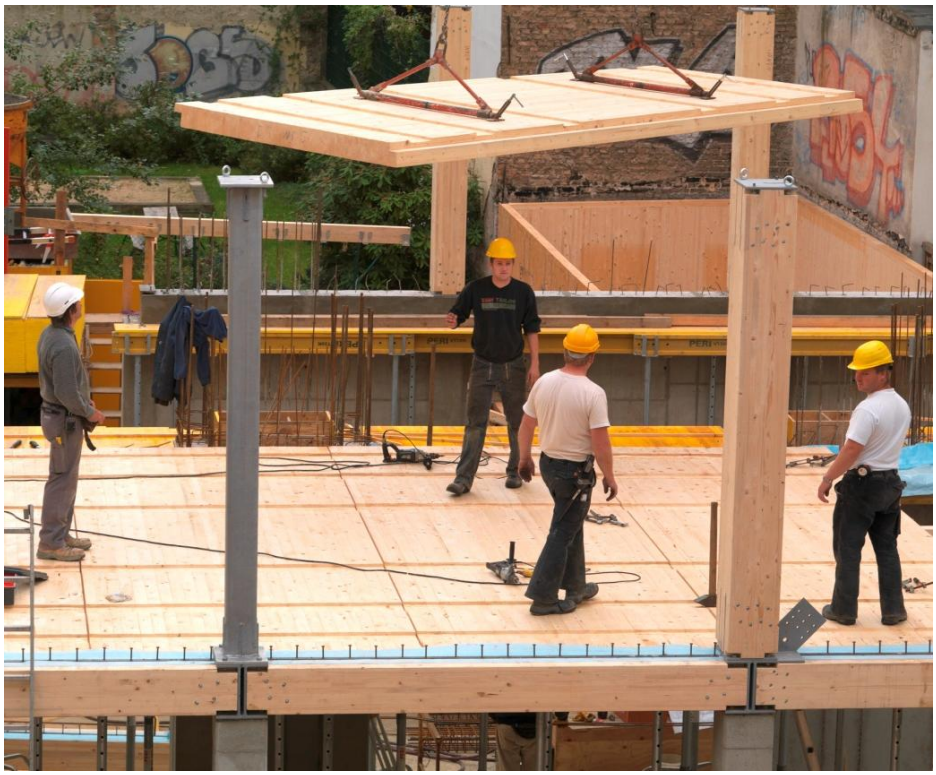


Bild 14 Aufbau der Holzmassivelemente (Foto: Kaden Klingbeil Architekten)

Rettungswegsituation

Eines der Grundprinzipien bei der brandschutztechnischen Konzeption von mehrgeschossigen Sonderbauten in Holzbauweise ist ein funktionierendes Flucht- und Rettungskonzept. Abweichungen vom Baurecht in Bezug auf die zulässigen Fluchtweglängen, die Anzahl der erforderlichen baulichen Rettungswege und die Ausgangsbreiten sind grundsätzlich nicht vorstellbar. Im Gegenteil, die gesetzlichen Anforderungen an die Flucht- und Rettungswege werden eher deutlich übertroffen, sodass dies als zusätzliche Kompensation für die durch die Holzbauweise entstehenden Abweichungen vom Baurecht verwendet werden kann.

Es hat sich hierbei als Vorteilhaft herausgestellt, die notwendigen Treppenräume in Massivbauweise (Stahlbeton) im freien Luftverbund zu errichten und sie vom Hauptgebäudekörper abzurücken (Bild 15). Ein Ausfall dieses Fluchtwegs ist damit in Analogie zu einem Sicherheitstreppenraum als äußerst unwahrscheinlich einzustufen. Selbst im Fall einer offen stehenden Tür einer brandbeaspruchten Nutzungseinheit können die Treppenanlagen somit nicht verrauchen.

Wenn die Übergänge und Brüstungen in Stahlbetonbauweise hergestellt werden und die Treppe einen ausreichenden Abstand vom Hauptgebäude hat (am besten 5 m), spricht auch nichts gegen eine Ausführung der notwendigen Treppen in Stahlbauweise, da eine nennenswerte thermische Beanspruchung der Treppen aufgrund des ausreichenden Abstand von einem möglichen Brandszenario ausgeschlossen werden kann.

Bild 15 *Anordnung der notwendigen Treppen im freien Luftverbund und abgerückt vom Gebäudekörper Bildrechte: Kaden Klingbeil Architekten*

Das Treppenhaus der vorderen Treppe wird einschließlich der Treppenläufe, der Übergänge und Brüstungen in Stahlbetonbauweise hergestellt. Die hintere Treppe zum Hof hin wird aus Stahl bestehen, die Übergänge und Brüstungen werden jedoch analog zum vorderen Treppenhaus ebenfalls aus Stahlbeton hergestellt. Für die Sicherstellung der schnellen und sicheren Flucht und Rettung der Personen wird im vorliegenden Fall zudem durch die schnelle Branddetektierung und Alarmierung der flächendeckenden automatischen BMA mit akustischer Alarmierung in Form von Hupen gesorgt.

Für die Versammlungsstätte und die Pflegenutzung wurden jeweils zwei notwendige Treppen in dieser Art und Weise vorgesehen. Bei der Pflegeeinrich-

tung musste zusätzlich das Prinzip der horizontalen Evakuierung umgesetzt werden, da sich eine Rettung der im Regelfall nicht gehfähigen Bewohner über Treppen schwierig gestaltet. Dazu sind im 3. Obergeschoss zwei Brandabschnitte vorgesehen. Das Personal kann die Bewohner im Falle eines Brandes mittels Evakuierungstüchern in den sicheren Brandabschnitt verlegen. Nur im äußersten Notfall ist eine vertikale Evakuierung der Bewohner über die Treppen durchzuführen, dann jedoch mit Hilfe der Feuerwehr, die durch die automatische Brandmeldeanlage mit Aufschaltung zur Einsatzleitstelle rechtzeitig vor Ort ist.

Bei der Wohnnutzung bestehen keine Bedenken gegen die Herstellung des 2. Rettungsweges über anleiterbare Fenster, zumal ein Ausfall des 1. Rettungsweges durch die abgerückte Lage vom Hauptgebäude sehr unwahrscheinlich ist.

Insgesamt hebt sich das Flucht- und Rettungskonzept des Gebäudes sehr stark vom Sicherheitslevel vieler Bestandsgebäude und Neubauten ab. Man denke dabei an die klassische Innenhofsituation bei zahlreichen Wohn- und Verwaltungsbauten in deutschen Großstädten in sechs- oder siebengeschossiger Bauweise: Der 1. Rettungswege ist oftmals brandschutztechnisch ungenügend ausgebildet (innen liegendes Holztreppenhaus, Türen zur Nutzung ohne Brand- und Rauchschutzqualität, häufig nicht einmal selbstschließende Türen). Der 2. Rettungsweg kann in den Innenhöfen meistens nicht über Leitern der Feuerwehr hergestellt werden, weil die Drehleiter entweder aufgrund von unzureichenden Abmessungen der Durchfahrten gar nicht zum Innenhof gelangen oder aufgrund von fehlenden Aufstellflächen nicht in Position gebracht werden kann. Es bleibt in der Konsequenz dann nur das Sprungkissen übrig! Einem siebengeschossigen Holzgebäude mit durchdachtem Flucht- und Rettungskonzept ist gegenüber einem gleich hohen Massivbau mit innen liegender Holztreppe und fehlendem 2. Rettungsweg aus brandschutztechnischer Sicht daher ganz klar der Vorzug zu geben.

Feuerwehr

Für die Feuerwehr werden gute Bedingungen für wirkungsvolle Rettungs- und Löschmaßnahmen geschaffen. Durch die Anordnung einer flächendeckenden automatischen Brandmeldeanlage der Kategorie 1 „Vollschutz“ nach DIN 14675 mit Aufschaltung zur Einsatzleitstelle erhält die Feuerwehr einen Zeitvorsprung und findet im Regelfall noch ein beherrschbares Szenario vor. Mögliche Brände bleiben zunächst auf eine Nutzungseinheit von weniger als 400 m² beschränkt. In diesem Zusammenhang wird auch ein gewaltfreier Zugang für die Feuerwehr über ein Feuerwehrschlüsseldepot Typ 3 (FSD 3) hergestellt. Die eigentliche Brandmelderzentrale wird im Kellergeschoss platziert. Um einen reibungslosen und schnellen Feuerwehreinsatz zu ermöglichen, wird an zentraler Stelle im Erdgeschoss ein so genanntes Feuerwehrinformations- und -bediensystem (FIBS) angeordnet. Darin werden ein Feuerwehranzeigetableau (FAT), ein Feuerwehrbedienfeld (FBF), der Hauptmelder und die Laufkarten unterge-

bracht. Zur Unterstützung der Löschmaßnahmen erhält der an der Christburger Straße gelegene Treppenraum eine trockene Steigleitung. In Verbindung mit einer ausreichenden Löschwasserversorgung (drei Hydranten befinden sich in unmittelbarer Umgebung des Grundstücks) ist ein schneller Löschangriff möglich. Ein erhöhtes Risiko, dass nicht durch die Berliner Bauordnung abgedeckt wäre, besteht damit im vorliegenden Fall nicht. Seitens der Feuerwehren wurde die Konzeption grundsätzlich mitgetragen und bestätigt [36].

Auf Grund der dargestellten Ausführung der beiden Treppen kann ein Ausfall als Angriffsweg für die Feuerwehr praktisch ausgeschlossen werden. Die Feuerwehr schätzt solche Treppenräume als sichere Angriffswege in die vom Brand betroffene Ebene. Der Löschangriff kann aus einem sicheren Bereich heraus auf Ebene des Brandes erfolgen, ohne dass eine Drehleiter erforderlich ist.

Installationsführung

Die Brandentstehung innerhalb der Konstruktion durch Installationen kann praktisch ausgeschlossen werden, da alle gebündelten Installationsbrandlasten in Vorwandebenen geführt werden (Bild 16). Die Brandweiterleitung über Installationen in andere Nutzeinheiten wird verhindert, indem geeignete Abschottungsmaßnahmen angeordnet werden.

Ein Hohlraumbrand ist damit nicht möglich, zumal die notwendige vertikale Installation des Gebäudes in Installationskernen aus Stahlbetonschächten verlegt wird. Die horizontale Installation erfolgt konsequent in Vorwandinstallationsebenen, in den Metallständerwänden oder in der Betonschicht des Holzbetonverbundelementes.

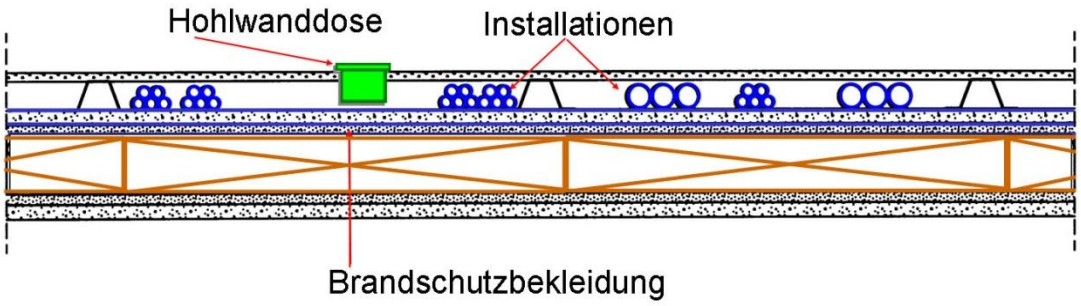


Bild 16 Prinzipielle Ausführung einer Vorwandinstallation

Fazit

Mit einer Fußbodenhöhe des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen von ca. 19 m wird bei dem vorgestellten Gebäude die in Berlin zulässige Höhe von Holzbauten um 6 m und damit um zwei Geschosse überschritten. Dennoch liegt im vorliegenden Fall kein unzulässig hohes Risiko vor. Die Rettungswegsituation ist deutlich besser als bei vielen Neu- und Bestandsbauten in Massivbauweise. Der Ausfall der im offenen Luftverbund liegenden Treppenräume aus

Stahlbeton kann praktisch ausgeschlossen werden. Davon profitiert auch die Feuerwehr, die zudem eine trockene Steigleitung für die rasche Vorbringung eines Löschangriffs erhält. Die flächendeckende Brandmeldeanlage sorgt zum einen für eine rasche Alarmierung der Personen und zum anderen ist hierdurch ein deutlich schnelleres Eingreifen der Feuerwehr möglich. Die Erhöhung der Brandlast durch die brennbare Konstruktion wird beherrscht, indem die Wände innen entsprechend mit Gipsfaserplatten (2 x 18 mm) und außen mit Steinwolllamellen eingekapselt werden. Für mindestens 60 Minuten beteiligen sich die betreffenden Bauteile somit nicht am Brandgeschehen. Die Decken erhalten im Küchenbereich ebenfalls eine Brandschutzbekleidung $K_2$60 und ansonsten eine Brandschutzbeschichtung, um bezüglich des vertikalen Brandüberschlags (Flammenaustritt aus dem Fenster) keine schlechteren Bedingungen zu schaffen als bei Massivbauten. Es sei an dieser Stelle auch angemerkt, dass bei allen Bauweisen zunächst das Mobiliar am Brand beteiligt ist. Die Anschlüsse werden streng nach den Vorgaben der M-HFHHolzR gefertigt, so dass auch die Rauchdichtigkeit nicht schlechter ist als bei Massivbauten. Vor allem jedoch kann der bei Holztafelbauten mögliche Hohlraumbrand, der von der Feuerwehr nur schwer bekämpft werden kann, im vorliegenden Fall gänzlich ausgeschlossen werden. Denn es werden zumindest im siebengeschossigen Vorderhaus ausschließlich massive Holz- bzw. Holzbetonverbundkonstruktionen verwendet.

Der Feuerwiderstand aller tragenden und raumabschließenden entspricht den Anforderungen der Berliner Bauordnung (F 90). Die Abweichung besteht einzig in der Verwendung von brennbaren Baustoffen.

ZUSAMMENFASSUNG

Theoretische und experimentelle Untersuchungen [5], [6] haben belegt, dass sich das brandschutztechnische Sicherheitsniveau auch im mehrgeschossigen Holzbau mit Gebäuden mit vier oder fünf Vollgeschossen (Gebäudeklasse 4 nach Musterbauordnung 2002) aufrechterhalten lässt. Die Risiken der Brand- und Rauchausbreitung durch raumabschließende Bauteile und des versteckten Weiterbrennens der tragenden Holzbauteile können beherrscht werden, wenn die entwickelten Konstruktionsprinzipien beachtet werden.

Um den Einsatz der Holzbauweise auch bei mehrgeschossigen Gebäuden der Gebäudeklasse 4 zu ermöglichen, ohne eine Gefährdung durch Ausbreitung von Rauch und Brandgasen sowie durch verdeckten Weiterbrand innerhalb der Konstruktion zu riskieren, wurden die im Forschungsvorhaben gesammelten Erkenntnisse bezüglich der Rauchdichtigkeit von Holzständerbauteilen und der Anforderungen an die Brandschutzbekleidung in die „Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR)“ [7] eingebracht, die zusammen mit der Projektgruppe Brandschutz der Fachkommission Bauaufsicht der ARGEBAU erarbeitet und 2004 veröffentlicht wurde.

Eine Vielzahl bislang errichteter Holzgebäude in der Gebäudeklasse 4 zeigt, dass die Vorgaben der Muster-Holzbaurichtlinie im Grundsatz umsetzbar sind, dass es aber dennoch häufig zu Abweichungen von den Anforderungen kommt. Die vorgestellten Forschungsergebnisse des iBMB zur Verwendung massiver, flächiger Holzbauteile und Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen stellen eine belastbare Grundlage dar, um das brandschutztechnische Sicherheitsniveau zuverlässig beurteilen zu können. Es wird vorgeschlagen, diese Erkenntnisse in eine Überarbeitung der Muster-Holzbaurichtlinie einzubringen [10]. Das wäre ein wichtiger Schritt zur bauaufsichtlichen Anerkennung schutzzielorientierter Brandschutzkonzepte als gleichwertige Lösung anstelle der aus unterschiedlichen Gründen nicht umsetzbaren materiellen Brandschutzanforderungen für Standardgebäude. Der Holzbau, der nicht nur aus ökologischer, sondern auch aus architektonischer und wirtschaftlicher Sicht eine hervorragende Alternative zu Mauerwerk und Beton bietet, bliebe damit auch im mehrgeschossigen Bauen der Gebäudeklasse 4 in seiner Vielfalt erhalten.

Anhand von zwei Projektbeispielen wurde gezeigt, wie das erforderliche Sicherheitsniveau auch bei der Ausweitung des Einsatzbereiches der mehrgeschossigen Holzbauweise durch Verwendung von brennbaren Dämmstoffen und die Anwendung bei Sonderbauten aufrecht erhalten werden kann. Letzteres sollte jedoch auch zukünftig über Abweichungen dem Holzbau zugänglich gemacht werden und nicht in den Anwendungsbereich der Muster-Holzbaurichtlinie aufgenommen werden.

LITERATUR

[1] Hosser, D.; Dehne, M.; Krolak, M.: Mehrgeschossiger Holzbau: brandsicher und wirtschaftlich, Holzzentralblatt 73 (2001), S. 946-947

[2] Wesche, J., Dehne, M.: Konzepte des baulichen Brandschutzes für mehrgeschossige Holzbauwerke, Bundesbaublatt 49 (2000) 7, S. 44-46

[3] DIN 4102 Teil 2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Bauteile: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; September 1977

[4] Hosser, D.; Kampmeier, B.: Bewertung des Brandverhaltens unbekleideter flächiger massiver Holzbauteile im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten im mehrgeschossigen Holzbau unter Berücksichtigung des geltenden na¬tionalen Sicherheitsniveaus sowie der DIN EN 1995-1-2. Abschlussbericht im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung, Braunschweig Juli 2008.

[5] Hosser, D.; Dehne, M.; Zehfuß, J.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise; Forschungsauftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung unter Beteiligung des iBMB/MPA der TU Braunschweig sowie der VHT Heusenstamm; Stufe 2: Experimentelle Grundlagenuntersuchungen; Abschlussbericht Juli 2000

[6] Hosser, D.; Wesche, J.; Dehne, M.; Becker, K.; Tichelmann, K.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise; Forschungsauftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung unter Beteiligung des iBMB/MPA der TU Braunschweig sowie der VHT Heusenstamm; Stufe 3: Abschlussbericht; März 2001

[7] Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (Muster-Holzbaurichtlinie - M-HFHHolzR), Fassung Juli 2004.

[8] Hosser, D.; Kampmeier, B.: Untersuchungen zur Optimierung und Standardisierung von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen; Teilprojekt 3b: Brandtechnische Untersuchungen zur Optimierung der Flammschutzmittelzusammensetzung und des Brandverhaltens auf Bauteilebene. Schlussbericht eines vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMELV) geförderten und der Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) betreuten Forschungsvorhaben, FKZ:22008905, 2007

[9] Hosser, D.; Kampmeier, B.: Bewertung des Brandverhaltens unbekleideter flächiger massiver Holzbauteile im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten im mehrgeschossigen Holzbau unter Berücksichtigung des geltenden nationalen Sicherheitsniveaus sowie der DIN EN 1995-1-2; Forschungsauftrag der deutschen Gesellschaft für Holzforschung; Abschlussbericht Juli 2008

[10] Kampmeier, B.: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschos¬sigen Holzbau. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 206, zugleich Dissertation TU Braun¬schweig, Braunschweig 2008

[11] Winter, S.: Mehrgeschossige Gebäude in Holzständerbauweise – Konstruktionen und neue Entwicklungen; Tagungsband Brandschutz bei Sondrbauten 1994; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 112

[12] Dehne, M. ; Hosser, D.: Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise; Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 1999; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 145

[13] Dehne, M.; Hosser, D.: Grundlagen einer Richtlinie für mehrgeschossige Holzbauwerke der Gebäudeklasse 4; Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2001; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 158

[14] Dehne, M.; Kruse, D.: Brandschutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude in Holzbauweise; Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2006; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 192

[15] Kampmeier, B.: Verwendbarkeit von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im Holztafelbau; Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2007; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 208

[16] Kampmeier, B.: Innovationen im mehrgeschossigen Holzbau; Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2009; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 206

[17] Kruse, D.; Dehne, M.: Brandschutzkonzepte für Gebäude in Holzbauweise bis zur Gebäudeklasse 5; Tagungsband Braunschweiger Brandschutz-Tage 2009; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 208

[18] Musterbauordnung (MBO); Fassung November 2002

[19] DIN 4102 Teil 6: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Lüftungsleitungen, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; September 1977

[20] DIN EN 1363 Teil 1, Feuerwiderstandsprüfungen, Allgemeine Anforderungen, Deutsche Fassung, Oktober 1999

[21] DIN EN 14135: Brandschutzbekleidungen - Bestimmung der Brandschutzwirkung; November 2004

[22] DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen; Deutsche Fassung EN 13501-2:2007+A1:2009

[23] Dehne, M.; Hosser, D.: Gegen Rauch und Feuer; Mikado, Heft 7-8 (2001) S. 60-64

[24] Hosser, D.; Dehne, M.; Zehfuß, J.: Brandschutz bei Gebäuden mittlerer Höhe in Holzständerbauweise; vfdb-Zeitschrift, Heft 2, Mai 2001, S. 71-78

[25] DIN 18165 Teil 1; Faserdämmstoffe für das Bauwesen; Dämmstoffe für die Wärmedämmung; Ausgabe Juli 1991

[26] Hosser, D; Kampmeier, B.: Entwicklungen beim Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau (1); Bauen mit Holz, Heft 2/2009

[27] Hosser, D; Kampmeier, B.: Entwicklungen beim Brandschutz im mehrgeschossigen Holzbau (2); Bauen mit Holz, Heft 3/2009

[28] DIN VDE 0833 Teil 2: Gefahrenmeldeanlagen für Brand, Einbruch und Überfall - Teil 2: Festlegungen für Brandmeldeanlagen; Juni 2009

[29] DIN 14675: Brandmeldeanlagen - Aufbau und Betrieb; November 2003

[30] DIN 14676: Rauchwarnmelder für Wohnhäuser, Wohnungen und Räume mit wohnungsähnlicher Nutzung - Einbau, Betrieb und Instandhaltung; September 2010

[31] Kampmeier, B.: Kompensationen im mehrgeschossigen Holzbau; Feuer-TRUTZ Magazin; Heft 2.2010

[32] Becker, J; Tichelmann, K; Hosser, D; Wesche, J: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz mehrgeschossiger Gebäude in Holzbauweise; Forschungsauftrag der deutschen Gesellschaft für Holzforschung; Untersuchungsbericht Teil 1 Juli 1997

[33] Karlsson, B.: Fire Risk Index Method – Multi-storey Apartment Buildings; Version 2.0; Trätek, Rapport P 0212053; Stockholm 2002

[34] Dehne, M.; Kruse, D.; Kampmeier, B.: Wirtschaftlicher Brandschutz für Holzbauten. Bauen mit Holz, Fachzeitschrift für konstruktiven Holzbau und Ausbau, Ausgabe 08/2005, S. 29-34, 2005

[35] DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe, Begriffe, Anforderungen und Prüfungen; Mai 1998

[36] Kircher, F.: Dehne, M: Brände in Holzbauten – noch möglich bei moderner Bauweise? Brandschutz – Deutsche Feuerwehrzeitung, Ausgabe Februar 2009

WEITERENTWICKLUNG DER BETONBAUWEISE UND KONSEQUENZEN FÜR DEN BAULICHEN BRANDSCHUTZ

Ekkehard Richter
ehemals Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig

EINLEITUNG

Die Entwicklung der Betonbauweise wurde in den letzen Jahrzehnten maßgeblich durch Fortschritte in der Baustofftechnologie bestimmt. Der Stahl wurde durch neue Legierungen und thermo-mechanische Behandlung so weit verbessert, dass heute gleichermaßen nichtrostende, schweißgeeignete, hochfeste und duktile Bewehrungsstäbe zur Verfügung stehen. Beim Beton wurde durch Einbetten von Fasern aus Stahl, alkaliresistentem Glas, Kunststoff oder Kohlenstoff der Anstieg der Bruchdehnung und insbesondere der Bruchenergie, die Verbesserung der Zugfestigkeit (Nachrisszugfestigkeit) und der Duktilität und damit des Rissverhaltens erreicht. Der Einsatz solcher Faserbetone, speziell des Stahlfaserbetons, war zunächst hauptsächlich auf hochbelastete Industriefußböden und als Stahlfaserspritzbeton auf die Vorsicherung im Tunnelbau beschränkt. Durch die bauaufsichtliche Einführung der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [1] wird die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken des Hoch- und Ingenieurbaus aus Stahlfaserbeton sowie Stahlfaserbeton mit Betonstahlbewehrung bis zur Betondruckfestigkeitsklasse C50/60 möglich.

Mit ganz anderer Zielsetzung wurde in den 1980er Jahren zunächst in Japan der selbstverdichtende Beton entwickelt. Bei diesem Beton kann auf die Zuführung von Verdichtungsarbeit, meist mit Innenrüttlern, verzichtet werden. Die Konsistenz des selbstverdichtenden Betons wird durch Zugabe von Fließmitteln und Mehlkorn so eingestellt, dass er beim Einbau selbst entlüftet, die Bewehrung dicht umschließt und jeden Hohlraum in der Schalung vollständig ausfüllt. Es entsteht ein idealer Beton zur Herstellung filigraner Bauteile oder Bauteile mit sehr hohem Bewehrungsgrad. Nachteilig ist die vergleichsweise hohe Empfindlichkeit des selbstverdichtenden Betons, mit dem er auf Veränderung der Ausgangsstoffwerte oder der Verarbeitung reagiert.

Selbstverständlich wurde in den letzten Jahrzehnten auch die Festigkeit des Betons weiterentwickelt. Bereits seit den 1960er Jahren ist die Herstellung hochfester Betone mit einer Druckfestigkeit bis über 100 N/mm^2 bekannt, allerdings kamen sie in Deutschland erst relativ spät zur Anwendung. Die Festigkeitssteigerung wurde durch Verringerung des Massenverhältnisses zwischen Wasser und Zement erreicht, wobei die Verarbeitungsfähigkeit durch Zugabe hochleistungsfähiger Fließmittel sichergestellt wurde. Eine weitere Festigkeitssteigerung wurde durch Zugabe von Zusatzstoffen, insbesondere Silicastaub, und eine Erhöhung der Packungsdichte zwischen Gesteinskörnung, Sand, Zement, Gesteinsmehl und Silicastaub erreicht. Dadurch können heute Ultrahochleistungsbetone mit Festigkeiten bis 400 N/mm^2 hergestellt werden. Auf

Grund der hohen Druck- und Biegezugfestigkeit bietet sich Ultrahochleistungsbeton für die Herstellung schlanker und filigraner Bauteile an, die gleichzeitig hohe Lasten abtragen, z. B. Stützen und Binder in Hochhäusern.

Generell erlauben die verbesserten Stahl- und Betoneigenschaften, dass die erforderlichen Bauteilquerschnitte kleiner werden, ohne die Leistungsfähigkeit der Bauteile zu beeinträchtigen. Ein Effekt, der der Wirtschaftlichkeit der Betonbauweise zu Gute kommt. Auf Grund der kleinen Bauteilabmessungen wächst die zur Verfügung stehende Nutzfläche und dadurch können höhere Mieteinnahmen erzielt werden.

Hinsichtlich des baulichen Brandschutzes können die Auswirkungen der stahl- und betontechnischen Innovationen in zwei Punkten zusammen gefasst werden:

- kleine Abmessungen führen zur schnelleren Erwärmung der Bauteilquerschnitte und damit zum früheren Verlust der ursprünglichen Festigkeit von Beton und Bewehrung
- bei schlanken und filigranen Bauteilen können frühzeitig zerstörende Betonabplatzungen auftreten.

Über die Auswirkungen der schnellen Erwärmung und der zerstörenden Abplatzungen sowie die Konsequenzen für die Brandschutzbemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton berichten Kampmeier und Hollmann in [2].

In diesem Beitrag werden die Entwicklung der Betonbauweise und die Konsequenzen für den baulichen Brandschutz am Beispiel von Tunnelschalen, speziell bei Tunneln mit einschaligem Tübbingausbau, aufgezeigt. An diesem Beispiel wird stellvertretend für die gesamte Betonbauweise deutlich, wie die stürmische Weiterentwicklung einer vergleichsweise alten Bauweise (> 100 Jahre) weitreichende Folgen für den baulichen Brandschutz hat.

In einem weiteren Beispiel wird dann erläutert, wie der bauliche Brandschutz für eine hochbelastete Stahlbetonstütze in der über 5 Geschosse durchgehenden Lobby eines Hochhauses nachgewiesen wird. Aus architektonischen Gründen sollte die Stütze einen möglichst kleinen Querschnitt aufweisen. In diesem Fall wurde die Stütze mit dem hochfesten Bewehrungsstahl SAS 670/800 zusammen mit einem Normalbeton ausgeführt. Das Beispiel zeigt, wie die geforderte Feuerwiderstandsklasse F 120 durch Kombination von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen erfolgreich nachgewiesen werden kann.

VEREINFACHTER STANDSICHERHEITSNACHWEIS FÜR TUNNEL MIT EINSCHALIGEM TÜBBINGAUSBAU

Allgemeines

Bereits Ende der 1980er Jahre wurden vom iBMB im Rahmen eines EUREKA-Vorhabens [3] in einem Tunnel in Norwegen realmaßstäbliche Brandversuche mit Straßen- und Schienenfahrzeugen durchgeführt. Die Ergebnisse bildeten in den Folgejahren weltweit die Grundlage für die brandschutztechnische Auslegung von Tunneln, ausgehend von realistischen Brandeinwirkungen über die Temperatur- und Rauchausbreitung bis hin zur rechnerischen Bemessung der Tunnelschalen. Die Versuche ergaben für alle Brandlasten einen raschen Temperaturanstieg zu Beginn des Brandes, eine anschließende Phase mit nahezu konstanter Temperatur und schließlich eine Abkühlphase, in der die Heißgastemperatur auf den Anfangswert zurückgeht. Der charakteristische Verlauf der Heißgastemperaturen wurde in Deutschland in standardisierte Temperaturzeitkurven für die Bemessung des baulichen Brandschutzes von Straßen- und Eisenbahntunneln zusammengefasst (Bild 1). Detaillierte Informationen über die Brandversuche und deren Ergebnisse wurden der Fachöffentlichkeit bereits 1993, also unmittelbar nach Abschluss des Forschungsvorhabens, im Rahmen der Braunschweiger Brandschutz-Tage mitgeteilt [4].

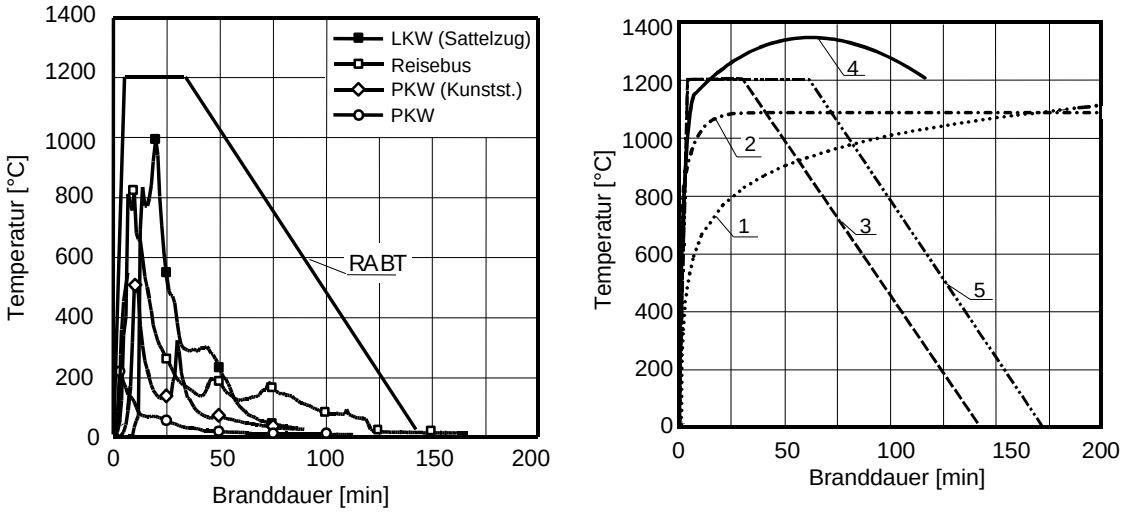


Bild 1 *Gemessene Temperaturzeitverläufe für Straßentunnel und RABT-Kurve (links) und Vergleich europäischer Temperaturzeitverläufe zur Bemessung konstruktiver Brandschutzmaßnahmen (rechts) (1: ISO-, 2: HC-, 3: RABT-, 4: RWS- und 5: EBA-Kurve)*

Nachdem die einwirkende Temperaturbeanspruchung festgelegt war, wurde im nächsten Schritt das Tragverhalten unterschiedlicher Tunnelkonstruktionen im Brandfall rechnerisch untersucht. Rasch wurde deutlich, dass dabei zwischen Tunnel in geschlossener und offener Bauweise sowie Tunnel, die im maschinellen Vortrieb hergestellt werden, unterschieden werden muss.

Die geschlossene Bauweise beinhaltet eine zweischalige Bauweise aus Spritzbeton. Dabei wird der bauliche Brandschutz dadurch sichergestellt, dass die Innenschale eine Dicke von mehr als 30 cm und die Bewehrung eine Betondeckung von nom c = 6 cm haben muss. Bei Einhaltung dieser Konstruktionsregeln ist sichergestellt, dass im Brandfall die Temperaturen an der Bewehrung der Innenschale unter 300 °C bleiben und plastische Dehnungen in der Bewehrung weitgehend ausgeschlossen sind. Nach dem Brand ist nicht mit unvertretbaren bleibenden Verformungen der Konstruktion zu rechnen [5]. Das Abplatzverhalten des Betons wurde in [6] als nicht kritisch eingeschätzt, da die statische Beanspruchung der Innenschale in der Regel gering ist, eine vergleichsweise niedrige Betongüte verwendet wird und große Teile der Innenschale durch die Tunnelzwischendecke vor dem direkten Brandangriff geschützt sind.

Bei Tunnelbauwerken in offener Bauweise handelt es sich häufig um ein- oder zweizellige Tunnel, die als geschlossene oder offene Rahmen mit Bauteildicken zwischen 0,80 m und 1,60 m hergestellt werden. Bei Brandangriff bilden sich thermisch bedingte Zwangmomente aus, die in den Rahmenknoten zu einem Momentenanstieg bei gleichzeitiger Momentenreduzierung im Feldbereich der Decke und Wände führen. Rechnerische Untersuchungen zeigten, dass die Entlastung im Feldbereich häufig bis zum vollständigen Abbau der positiven Momentenbeanspruchung führt. Trotzdem muss die Bewehrung vor zu hoher Erwärmung geschützt werden, um nach dem Brand, wenn die Zwangmomente in den Rahmenknoten abgebaut sind, wieder zur Aufnahme der Schnittgrößen unter Gebrauchslast zur Verfügung zu stehen. Dieser Umstand wird in den ZTV-Tunnel, Teil 2 [5] dadurch berücksichtigt, dass in die Decke zur Sicherung der Betondeckung im Brandfall zusätzlich eine oberflächennahe, verzinkte Mattenbewehrung (N 94) mit der Betondeckung von 2 cm eingebaut wird. Diese Maßnahme kann im Bereich der Wände entfallen, da dort die tragende Bewehrung auf der Außenseite angeordnet ist und beim Brand kalt bleibt. Für Tunnel in offener Bauweise mit Rechteckquerschnitt wurde in [7] ein vereinfachter rechnerischer Nachweis für den Lastfall Brand entwickelt. Danach werden die Schnittgrößen infolge eines Temperaturgradienten $\Delta T = 50$ K bei voller Steifigkeit des Betonquerschnitts im Zustand I mit den Schnittgrößen aus Gebrauchslasten überlagert.

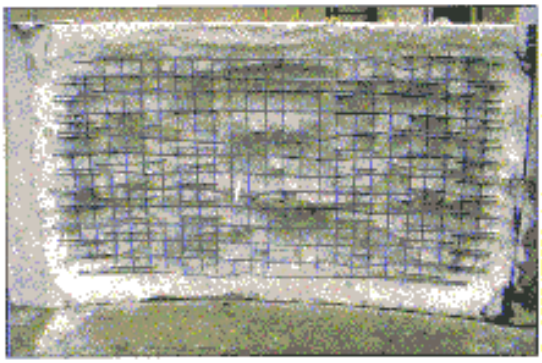
Nach Abschluss der Forschungsvorhaben [6] und [7] wurden die Ergebnisse der Praxis auf den Braunschweiger Brandschutz-Tagen ‘99 vorgestellt [8].

Beim maschinellen Vortrieb erfolgt der Ausbruch mit Tunnelvortriebsmaschinen. Der Tunnelquerschnitt wird im Nachlauf mit Stahlbetontübbings ausgekleidet, die zu einem Ring zusammengesetzt werden. Auf Grund der Fugen zwischen den Tübbings innerhalb der Ringe (Längsfugen) und zwischen den Ringen (Ringfugen) entsteht ein anderes Trag- und Verformungsverhalten als bei Tunnelauskleidungen aus Spritzbeton. In den letzten Jahren wurden schildvorgetriebene Tunnel mit einer Tübbingauskleidung aus Stahlbeton mit Bauteildicken zwischen 300 mm bis 500 mm mit immer größeren Durchmessern und in

zunehmend schwierigerer Geologie, d. h. in nur wenig tragfähigen Böden und unter Flussläufen mit minimaler Überdeckung, ausgeführt [9]. Da beim Tübbingausbau in der Regel höhere Betongüten (≥ C35/45) als beim normalen Innenschalenausbau erforderlich werden und wegen der Einschaligkeit zudem Wasserundurchlässigkeit gefordert wird, besteht für ungeschützte Tübbings die Gefahr, dass im Brandfall kassettenartige Abplatzungen auftreten, das heißt am Tübbingrand bleiben Stege stehen, während zur Tübbingmitte hin eine muldenartige Vertiefung entsteht, in der die Bewehrung teilweise frei liegt (Bild 2). Bei Bauteildicken zwischen 300 mm und 500 mm kann damit die Standsicherheit des Tunnelbauwerks gefährdet und die Dichtigkeit gegen von außen drückendes Wasser nicht mehr gewährleistet sein.

a) Versuch CTRL [10, 11]

b) Brand Kanal-Tunnel [10]



c) Versuch City-Tunnel Leipzig [12]

Bild 2 Beispiele für kassettenartige Abplatzungen an Tübbings

Für das statisch komplexe System „Tübbingausbau“ wurden im Auftrag der Deutschen Bahn in [13] die Nachweisverfahren zum baulichen Brandschutz eingehend untersucht und darauf aufbauend ein vereinfachter rechnerischer Standsicherheitsnachweis unter Berücksichtigung der im Brandfall zu erwartenden Betonabplatzungen entwickelt. Das Nachweisverfahren wurde zunächst

für Eisenbahntunnel mit 1-schaligem Tübbingausbau entwickelt, es kann aber grundsätzlich auch für Straßentunnel angewendet werden.

Abschätzung der mittleren Abplatztiefe

Das Abplatzenverhalten von Beton bei hohen und schnellen Temperatureinwirkungen wurde in den letzten Jahrzehnten in zwei Richtungen untersucht: zum einen interessierten die physikalischen, chemischen und materialspezifischen Vorgänge, die das Abplatzen verursachen, und zum anderen wurde in Brandversuchen mit bauwerksähnlichen Prüfkörpern studiert, wie sich die Prüfkörpergröße, die statischen Randbedingungen und die Größe und Art der Belastung auf das Abplatzverhalten auswirken. In [13] wurden die Ergebnisse aus den beiden Forschungsrichtungen zusammengeführt und aus dem Vergleich der Ergebnisse ein Bewertungssystem zur Abschätzung der zu erwartenden Betonabplatzungen abgeleitet. Die physikalischen, chemischen und materialspezifischen Einflussgrößen werden von Kampmeier und Hollmann in [2] zusammengestellt. Als wesentliche Einflussgrößen auf das explosionsartige Abplatzen wurden die Temperaturbeanspruchung, der Feuchtigkeitsgehalt und die Art und Menge an Polypropylenfasern identifiziert, die anderen Einflussgrößen wie Permeabilität, Gesteinskörnung, Betondruckfestigkeit, Bauteilabmessungen, äußere Belastung, thermische Ausdehnung und Bewehrung wurden in ihrer Bedeutung etwas geringer eingestuft.

Aus der Rangfolge der Einflussgrößen wurden so genannte „Risikofaktoren“ abgeleitet, die die Bedeutung der Einflussgrößen auf das Abplatzen erfassen. Bei hoher Bedeutung bekommt die Einflussgröße den Risikofaktor 5, bei geringer Bedeutung sinkt der Risikofaktor auf den Wert 1. In Tabelle 1 sind die Einflussgrößen und die Bandbreite der Risikofaktoren zusammengestellt.

Bei der Auswertung wurden nur die Einflussgrößen berücksichtigt, die für Tübbingauskleidungen von Bedeutung sind. Die Einflussgrößen Größtkorn, Bauteilabmessungen und Bewehrung / Betondeckung wurden nicht bewertet, da bei typischen Tübbing-Ausführungen die vorhandenen Werte dieser Einflussgrößen außerhalb des Bereichs liegen, in dem sie das Abplatzverhalten beeinflussen. Außerdem wurde die Einflussgröße der Eigenspannungen nicht gesondert betrachtet. Die Eigenspannungen liegen in der Regel als Zahlenwert nicht vor und können nur für Ausnahmefälle ermittelt werden; der Einfluss der Eigenspannung wurde deshalb näherungsweise durch die Risikofaktoren für die Temperaturbeanspruchung und den Feuchtigkeitsgehalt erfasst. Weitere Erläuterungen zu Tabelle 1 sind in [13] und [14] enthalten.

Die Bewertung der Einflussgrößen ergibt dann den in Tabelle 2 dargestellten Zusammenhang zwischen Abplatzrisiko und Summe der Risikofaktoren. Das Abplatzrisiko variiert zwischen sehr gering für Tübbinge aus Beton mit einer vergleichsweise kleinen Summe der Risikofaktoren (12 bis 14) und sehr hoch bei einer großen Summe der Risikofaktoren (27 bis 30). Dazwischen befinden sich Betone mit geringem, mittleren und hohem Abplatzrisiko.

Tabelle 1 Einflussgrößen und Risikofaktoren

	Einflussgröße		Risiko-faktor
1	Temperaturbeanspruchung	≤ 200 K/min	3
		> 200 K/min	5
2	Feuchtigkeitsgehalt	< 2 Gew.-%	3
		2 bis 3 Gew.-%	4
		> 3 Gew.-%	5
3	Permeabilität K_g [1)]	> 1 10^{-16} m^2	1
		≤ 1 10^{-16} m^2	3
4	Gesteinskörnung		3[2)]
5	Betondruckfestigkeit f_{ck} (Ist-Wert)	≤ 50 N/mm^2	1
		> 50 N/mm^2	3
6	Ausnutzungsgrad $\eta = \frac{\sigma_d}{f_{ck}\text{ (Ist-Wert)}}$ [3)]	< 0,2	1
		≥ 0,2	3
7	Thermische Ausdehnung α_T im Bereich: 20 °C ≤ T ≤ 1000 °C	≤ $10 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}	1
		(10 bis 17,5)·10^{-6} K^{-1}	2
		≥ $17,5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1}	3
8	Zusatz von Polypropylenfasern	≥ 2 kg/m^3	1
		> 0 bis 2 kg/m^3	3
		0 kg/m^3	5

[1)] Der spezifische Permeabilitätskoeffizient K_g kann nach [15] bestimmt werden
[2)] Wenn die gesteinsbildenden Mineralien nachweislich ein gleichmäßiges Ausdehnungsverhalten aufweisen, kann der Risiko-Faktor mit 1 angesetzt werden
[3)] Druckspannung infolge Belastung

Tabelle 2 Abplatzrisiko und Summe der Risikofaktoren

Abplatzrisiko	Summe der Risikofaktoren
sehr gering	12 – 14
gering	15 – 18
mittel	19 – 22
hoch	23 – 26
sehr hoch	27 - 30

Sofern keine Werte für die Einflussgrößen aus experimentellen Untersuchungen vorliegen oder von vergleichbaren Betonmischungen übertragen werden können, muss der höhere Risikofaktor gewählt werden.

Im nächsten Schritt mussten dem Abplatzrisiko qualitative Abplatztiefen zugewiesen werden. Dafür wurden in [13] mehr als 50 Brandversuche mit Tübbingen und Tübbingausschnitten hinsichtlich des Auftretens von Abplatzungen ausgewertet. In vielen Fällen erlaubten die unterschiedlichen Randbedingungen der Brandversuche keinen direkten Vergleich der Versuchsergebnisse und damit keine direkte Zuordnung der Versuchsergebnisse zu den Einflussgrößen in Tabelle 1. Einige Ergebnisse galten aber für alle ausgewerteten Brandversuche:

- Durch Zusatz von monofilamenten oder multifilamenten Polypropylenfasern werden die Abplatzungen verringert und/oder vermieden, fibrillierte Polypropylenfasern sind weniger effektiv.
- Stahlfasern verändern das Abplatzverhalten nicht signifikant.
- Die Abplatzungen treten zwischen der 1. und 20. Minute der Brandbeanspruchung auf, nur in Ausnahmen dauern sie bis zur 30. Minute.

Damit wurde in den Brandversuchen der positive Einfluss von Polypropylenfasern auf das Abplatzverhalten bestätigt, der Einfluss anderer Parameter war nicht so deutlich zu erkennen, da sie teilweise in einem sehr engen Spektrum variierten.

Die größten Abplatzungen traten naturgemäß bei Brandversuchen mit Prüfkörpern aus Beton ohne Zusatz von Polypropylenfasern auf. In Tabelle 3 sind diese Brandversuche zusammengestellt. Bei diesen Brandversuchen wurden maximale Abplatzungen bis t = 340 mm beziehungsweise t = 0,85 h gemessen, im Mittel lagen die Abplatztiefen im Bereich zwischen t = 250 mm und t = 0,75 · h, das galt insbesondere bei den Brandversuchen mit Tübbingen. Bei realen Bränden in Tunneln wurden ähnliche maximale Abplatztiefen beobachtet. Für die in Tabelle 3 zusammengestellten Brandversuche lag die Summe der Risikofaktoren zwischen 24 und 28, sodass mit einem hohen beziehungsweise sehr hohen Abplatzrisiko zu rechnen ist.

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse aus den Brandversuchen hinsichtlich des Abplatzverhaltens nach Tabelle 4 einstufen:

Bei Prüfkörpern, deren Betonmischung nach Tabelle 2 mit dem Abplatzrisiko „sehr hoch“ bewertet wurde, können mittlere Abplatztiefen in der Größe zwischen t = 250 mm und t = 0,75 · h auftreten. Bei Prüfkörpern mit einer Betonmischung mit dem Abplatzrisiko „sehr gering“ oder „gering“ können Abplatzungen vernachlässigt werden oder es sind mittlere Abplatztiefen in der Größe der Betondeckung zu erwarten. Bei mittlerem Abplatzrisiko erhöhen sich die zu erwartenden Abplatztiefen auf das 1,5-fache der Betondeckung. Bei hohem Abplatzrisiko werden in Tabelle 4 für die Abplatztiefe zwei Werte angegeben, der kleinere Wert ist maßgebend.

Tabelle 3 Abplatztiefen bei Brandversuchen ohne Zusatz von Polypropylenfasern

Abschnitt	Prüfkörper		max. Abplatztiefe [mm]	Literatur
	Dicke h [mm]	Form		
4.2.5	450	Tübbing	265	[16]
4.2.6	400	Tübbing	340	[17]
4.2.7	400	T.-ausschnitt[1)]	245 - 271	[18]
4.2.9	400	T.-ausschnitt	46 - 62	[19]
			37 - 65	
4.2.10	350	Tübbing	140 - 160	[20]

[1)] Der nicht gekrümmte Prüfkörper hatte mit $b \cdot l \cdot h = 1200 \cdot 1800 \cdot 400$ mm^3 annähernd die Abmessungen eines Tübbings

Tabelle 4 Abplatzrisiko und Abplatztiefe

Abplatzrisiko (gemäß Tabelle 2)	Abplatztiefe [mm]
sehr gering	0
gering	c [1)]
mittel	1, 5 · c [1)]
hoch	min (150; 3 · c) [1) 2)]
sehr hoch	min (250; 0,75 · h) [2) 3)]

[1)] c: Betondeckung der Bewehrung auf der Tunnelinnenseite

[2)] kleinere Wert maßgebend

[3)] h: Tübbingdicke in mm

Die Abplatztiefe aus Tabelle 4 kann zum Beispiel als Grundlage für ein vereinfachtes Nachweisverfahren mit Ansatz einer reduzierten Tübbingdicke verwendet werden.

Vereinfachter rechnerischer Standsicherheitsnachweis

Der vereinfachte rechnerische Standsicherheitsnachweis basiert auf einer von den Abplatzungen abhängigen Verkleinerung des Betonquerschnitts (Restquerschnitt). Der Nachweis wird für die Lastfälle „Brand“ und „Nach dem Brand“ geführt.

Für den Lastfall „Brand“ müssen im Einzelnen folgende Bemessungsschritte durchgeführt werden:

- Berechnung der instationären Temperaturfelder im Restquerschnitt des Tübbings unter Berücksichtigung der Wärmeübergangsbedingungen für Strahlung und Konvektion aus DIN EN 1991-1-2 [21] und der nichtlinearen, temperaturabhängigen thermischen Materialgesetze von Beton und Bewehrung aus DIN EN 1992-1-2 [22].
- Ermittlung der zeitabhängigen Biegesteifigkeit des Restquerschnitts unter Berücksichtigung der nichtlinearen, temperaturabhängigen mechanischen Materialgesetze von Beton und Bewehrung aus DIN EN 1992-1-2 [22]. Vereinfachend darf für die Biegesteifigkeit die Steigung der Momenten-Krümmungsbeziehung bei der Krümmung (1/r) = 0 verwendet werden (Bild 3).
- Nichtlineare Berechnung der zeitabhängigen maximalen Zwangschnittgrößen N_{zw} und M_{zw} und Ermittlung der Zwangschnittgrößen $N_{zw,10}$ und $M_{zw,10}$ für die Temperaturen $T_0 = 10$ K und $\Delta T_0 = 10$ K, jeweils am System eines gebettet gelagerten Tunnelrings ohne Tübbingfugen (Bild 4).
- Berechnung der Schnittgrößen am gebetteten Gesamtsystem mit Längs- und Ringfugen unter Berücksichtigung der Ersatztemperaturen

  $T_{0,ers} = 10 \cdot N_{zw} / N_{zw,10}$

  und

  $\Delta T_{ers} = 10 \cdot M_{zw} / M_{zw,10}$

  sowie der zeitabhängigen Biegesteifigkeit und der übrigen Gebrauchslasten wie Gebirgs- und Wasserdruck.
- Bemessung des Tunnelrings für die maßgebenden Schnittgrößen unter Berücksichtigung der außergewöhnlichen Lastkombination gemäß RiL853.2001 [23].
- Nachweis der Standsicherheit durch Vergleich der für den Lastfall „Brand“ erforderlichen Bewehrung und der vorhandenen Bewehrung aus der Bemessung unter Gebrauchslast und Normaltemperatur.

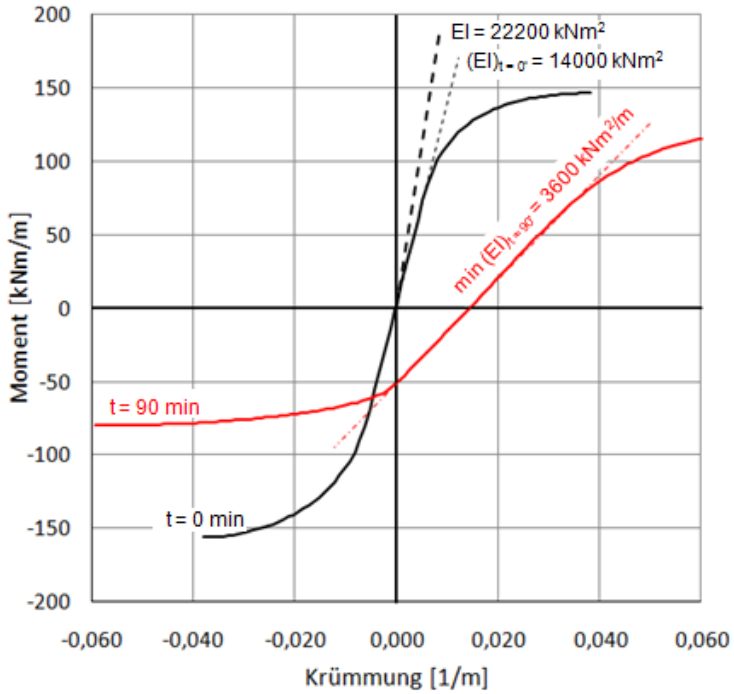


Bild 3 *Zeitabhängige Biegesteifigkeit*

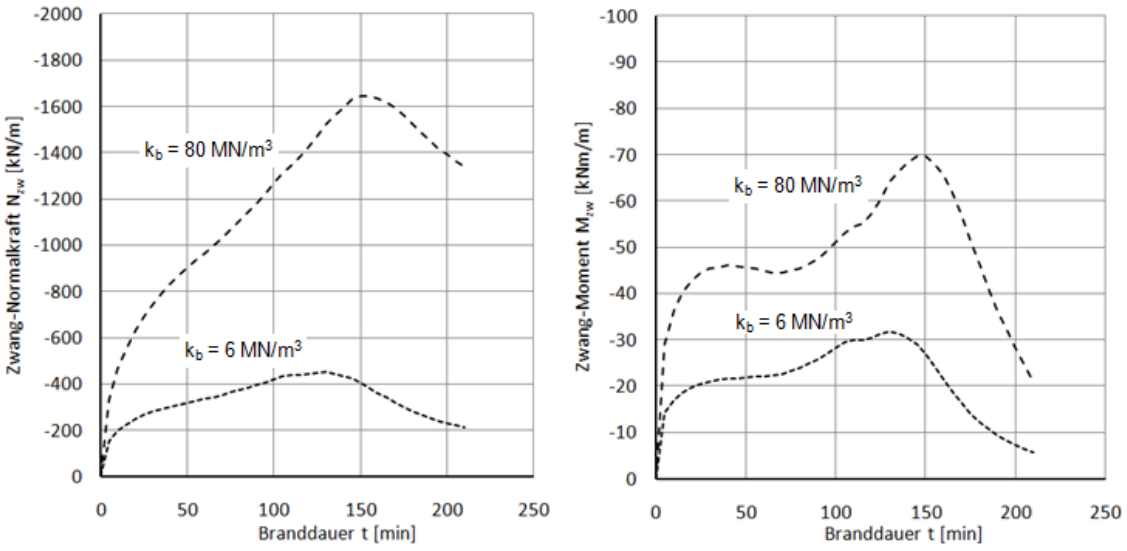


Bild 4 *Zwangschnittgrößen für unterschiedliche Bettungswerte, links: Zwang-Normalkraft, rechts: Zwang-Moment*

Beim Lastfall „Nach dem Brand“ werden die Einwirkungen bei Normaltemperatur auf das gebettete Gesamtsystem mit Längs- und Ringfugen unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit nach dem Brand angesetzt. Für die Biegesteifigkeit nach dem Brand kann in guter Näherung für alle Abplatztiefen rund 60 % der Biegesteifigkeit des Restquerschnitts angenommen werden, wobei die Materialkennwerte bei Normaltemperatur zu Grunde gelegt werden [14]. Die

Bemessung für die außergewöhnliche Lastkombination erfolgt nach [23], wobei auf der Widerstandsseite die Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN-Fb 102 [24] für Beton γ_C = 1,3 und Stahl γ_S = 1,0 angesetzt werden. Die Restfestigkeiten von Beton und Bewehrung auf der brandzugewandten Seite können in Abhängigkeit von der im Brand erreichten maximalen Temperatur aus Bild 5 entnommen werden, auf der Außenseite und im Sohlbereich des Tunnels können weiterhin die Materialfestigkeiten bei Normaltemperatur zu Grunde gelegt werden.

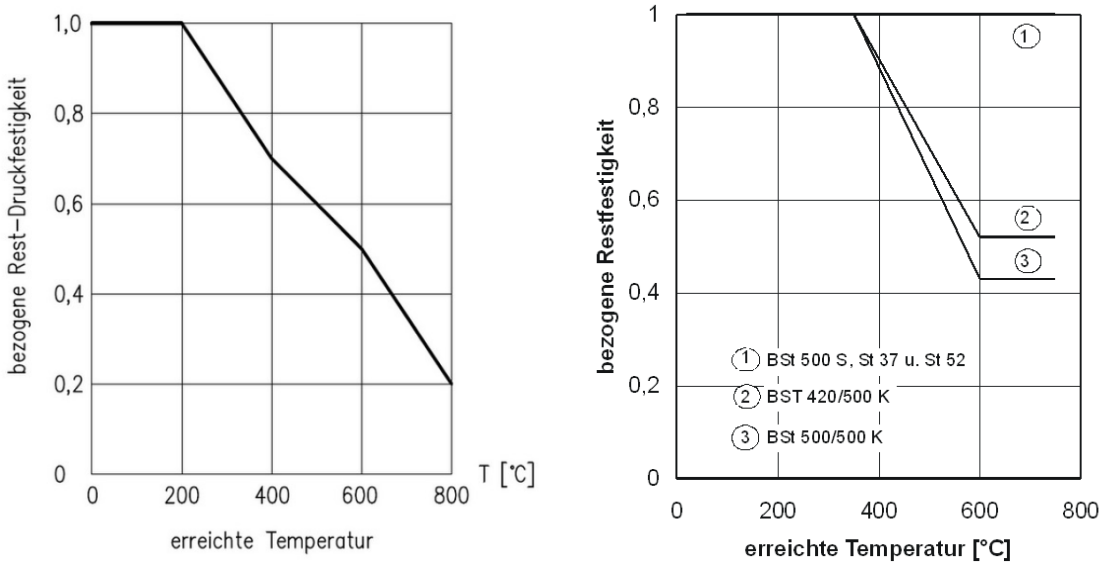


Bild 5 *Rechenwerte für die Restdruckfestigkeit von Normalbeton (links) und Betonstahl (rechts) nach dem Wiedererkalten in Abhängigkeit von der im Brand erreichten Maximaltemperatur*

Zusammenfassung vereinfachter rechnerischer Standsicherheitsnachweis

Die europäischen und nationalen Regelwerke über den Bau und Betrieb von Eisenbahn- und Straßentunneln enthalten Anforderungen zum Brandschutz der Bauwerke. Für Eisenbahntunnel wird in [25] u. a. gefordert, die Standsicherheit des Bauwerks im Falle eines Brandes so lange aufrechtzuerhalten, dass Selbst- und Fremdrettung von Reisenden und Personal ohne das Risiko eines Einsturzes des Bauwerks sichergestellt werden kann. Außerdem soll die Tunneldecke der „EUREKA“-Temperatur-Zeit-Kurve über eine bestimmten Zeit widerstehen. Die EUREKA-Kurve ist identisch mit der in Deutschland bei Eisenbahntunneln anzusetzenden EBA-Kurve (Bild 1). In [26] wird neben der Standsicherheit gefordert, die Tiefe von Betonabplatzungen unter Berücksichtigung der Betonzusammensetzung und der konstruktiven Ausbildung (Bewehrung) der Tunnelauskleidung abzuschätzen. Für Straßentunnel wird in [5] ein ausreichender baulicher Brandschutz bei Ansatz der sog. RABT-Kurve (Bild 1) gefordert. Der Brandschutz muss so ausgeführt werden, dass im Brandfall keine Schäden auftreten, die die Standsicherheit des Tunnels gefährden, keine bleibenden Verformungen der Konstruktion entstehen, die die Gebrauchstauglichkeit des Tunnels einschränken, und die Dichtigkeit weitgehend gewährleistet bleibt. Für

Straßentunnel, die mittels maschineller Schildvortriebsverfahren hergestellt werden, wird für einschalige Konstruktionen gefordert, dass der freiliegende Firstbereich mit Brandschutzsystemen auszukleiden ist oder alternativ ein Brandschutzbeton mit Polypropylenfasern verwendet wird, dessen Wirksamkeit nachgewiesen sein muss.

Mit dem vereinfachten rechnerischen Standsicherheitsnachweis können die Anforderungen aus den Regelwerken an den baulichen Brandschutz weitgehend erfüllt werden. Die im Brandfall zu erwartenden Betonabplatzungen werden auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt und durch eine reduzierte Bauteildicke berücksichtigt. Die anschließenden thermischen und mechanischen Analysen werden für die reduzierten Bauteildicken durchgeführt.

BRANDSCHUTZNACHWEISE FÜR STAHLBETONSTÜTZEN MIT HOCHBELASTETEM STAHL SAS 670/800

Allgemeines

Beim Bauvorhaben Opernturm Frankfurt wurden hochbelastete Innen- und Außenstützen mit dem hochfesten Stahl SAS 670/800 bewehrt, wobei Bewehrungsdurchmesser von 35 mm, 43 mm, 57 mm und 75 mm zum Einsatz kamen (Bild 6). Für diese neuartige Bauweise musste wegen der hohen Bewehrungsgrade und der Verwendung eines hochfesten Stahles mit großen Bewehrungsdurchmessern ein Antrag auf Zustimmung im Einzelfall bei der obersten Bauaufsichtsbehörde des Landes Hessen gestellt werden.

Aus Brandschutzgründen mussten bei dem Hochhaus die Bauteile des Haupttragwerks, zu denen auch die o. g. Stützen zählen, die Anforderungen der Feuerwiderstandsklasse F 120 nach DIN 4102 Teil 2 (09/1977) erfüllen. Der Nachweis der Feuerwiderstandsklasse sollte bei der nicht genormten Bauweise durch Brandversuche in Verbindung mit rechnerischen Untersuchungen zur Übertragung der Versuchsergebnisse auf die Stützen im Bauwerk geführt werden.

Im Folgenden wird lediglich auf die Brandversuche und die rechnerischen Untersuchungen eingegangen. Weiterführende Informationen zum Bauvorhaben Opernturm Frankfurt, insbesondere zum neuen Bewehrungssystem mit hochfesten Betonstahl SAS 670/800, können [27] entnommen werden.

Bild 6 Ansicht Opernturm und Bewehrung einer Stahlbetonstütze [27]

Stützen im Opernturm Frankfurt

Die zu beurteilenden Stützen mit hochfestem Bewehrungsstahl gehörten zu Stützensträngen im Randbereich und im Gebäudeinneren. Diese Stützen wurden für die Gebrauchslasten als Pendelstützen berechnet und wiesen im Bereich der Lobby eine Länge von 11,75 m auf. Die Betongüte betrug C50/60, wobei der Betonmischung zur Vermeidung von Betonabplatzungen 1,5 kg/m^3 Polypropylenfasern zugegeben wurden. Als Bewehrung im Bereich der voll überdrückten Querschnitte wurde hochfester Stahl SAS 670/800 mit den folgenden Kennwerten verwendet:

- Charakteristischer Wert der Streckgrenze f_{yk} = 670 N/mm^2
  zugehörige Dehnung/Stauchung ε = 3,26 mm/m
- Bemessungswert der Streckgrenze: f_{yd} = 584 N/mm^2
  zugehörige Dehnung/Stauchung ε = 2,84 mm/m.

Bei Materialuntersuchungen des Bewehrungsstahls ∅ 75 mm SAS 670/800 wurden der Elastizitätsmodul E_s = 203.600 N/mm^2 und der linear-elastische Bereich bis zu einer Stauchung von ca. 3,8 mm/m bei einer Spannung von etwa 740 N/mm^2 ermittelt.

Bild 7 zeigt links einen typischen Querschnitt mit der vorhandenen Bewehrung für eine Stütze im Randbereich und rechts für eine Stütze im Gebäudeinneren.

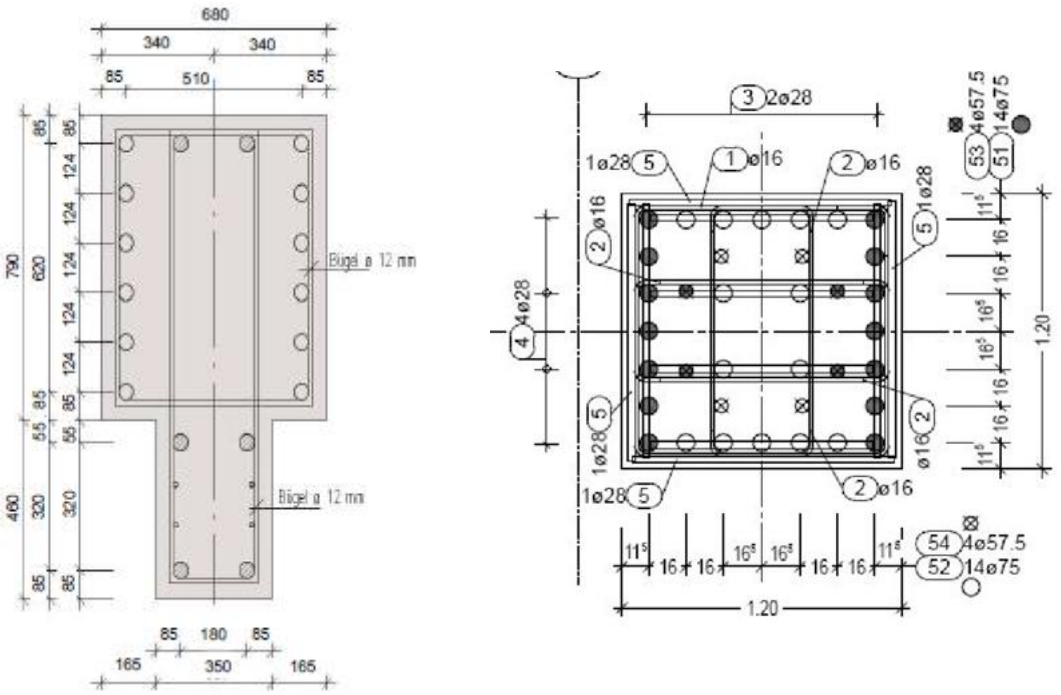


Bild 7 *Querschnitt und Bewehrung, links: Stütze im Randbereich (Pos. S54, Maße in mm); rechts: Stütze im Gebäudeinneren (Pos. S1010, Maße in cm und m)*

Versuchsstützen

Auf Grund ihrer Stützenlänge, Querschnittsabmessungen und Lasten $N_d \leq$ 110 MN überstiegen die im Opernturm Frankfurt zur Ausführung kommenden Stahlbetonstützen mit hochfestem Stahl die versuchstechnischen Möglichkeiten des Stützenbrandofens im iBMB / MPA in Braunschweig. Für die Normbrandversuche mussten Versuche konzipiert werden, die das Spektrum der Randbedingungen – soweit versuchstechnisch realisierbar – auf der sicheren Seite liegend abdecken. Für das Brandverhalten der Stützen sind folgende Parameter besonders kritisch:

- Geringe Querschnittsabmessungen,
- Geringer Achsabstand der tragenden Bewehrung,
- Ungeschützte Betonschichten außerhalb der Bewehrung,
- Großer Schlankheitsgrad,
- Hohe Lastausnutzung,
- Exzentrischer Lastangriff.

Unter Beachtung dieser Parameter wurden in [28] die in Tabelle 5 zusammengestellten System- und Lastannahmen der Versuchsstützen S1 und S2 für die durchzuführenden Normbrandversuche festgelegt.

Tabelle 5 Stützenparameter der Versuchsstützen S1 und S2

Parameter	S1	S2
Querschnitt b x h [cm^2]	30 x 30	30 x 30
Beton	C50/60	C50/60
Längsbewehrung S 670/800	4 Ø 75	4 Ø 57,5
Achsabstand der Längsbewehrung u [mm]	89,5	80,75
Bügel BSt 500 S	Ø 10	Ø 10
Länge L [m]	3,66	3,66
Längskraft F [kN]	3000	3000
Exzentrizität e [m]	0,018	0,0092

Tabelle 6 nach [29] verdeutlicht, dass die beiden Versuchsstützen S1 und S2 bezüglich der genannten Parameter gegenüber den Stützen im Bauwerk durchweg ungünstiger sind. Eine Ausnahme stellt die Lastausnutzung dar, weil die im Versuchsstand einstellbare maximale Normalkraft begrenzt ist. Zum Ausgleich wurde die Lastexzentrizität bei den Versuchsstützen vergrößert, um vergleichbare Vorkrümmungen wie im Bauwerk zu erhalten.

Versuchsdurchführung

Die Normbrandversuche wurden durch die Materialprüfanstalt für das Bauwesen (MPA) Braunschweig durchgeführt. Dazu wurde zunächst die im Brandversuchsstand eingebaute Versuchsstütze mit der Längskraft von 3006 kN (S1) bzw. 3002 kN (S2) belastet und dann einer Brandbeanspruchung entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) der DIN 4102 Teil 2 (09.77) ausgesetzt. Die Erwärmung des Betonquerschnitts wurde in drei Höhenlagen (Drittelspunkte und halbe Stützenlänge) durch Thermoelemente in unterschiedlicher Tiefe aufgezeichnet. Außerdem wurde die Erwärmung der Längsbewehrung aus hochfestem Stahl auf der Außen- und Innenseite der Stäbe erfasst, um Temperaturunterschiede innerhalb der Stäbe sichtbar zu machen. Die Verformung der Stütze wurde in Richtung der Längsachse am Stützenkopf und quer zur Längsachse in Stützenmitte gemessen und aufgezeichnet.

Rechnerische Simulation

Beide Versuche wurden mit einem allgemeinen Rechenverfahren, dem im iBMB entwickelten Programm STABA-F [30], vorausberechnet. Die temperaturabhängigen Materialkennwerte für den Beton C50/60 mit überwiegend quarzhaltiger Gesteinskörnung und für den hochfesten Stahl SAS 670/800 wurden nach der damals gültigen DIN ENV 1992-1-2 [31] vorgegeben. Die charakteristischen Festigkeiten des Stahls dienten als Einhängewerte der Spannungs-Dehnungs-

Tabelle 6 Vergleich der für den Nachweis der Brandsicherheit maßgebenden Stützen des Opernturms mit den Versuchsstützen S1 und S2

<table>
<tr><td rowspan="2"></td><td colspan="2">Versuchsstützen</td><td colspan="3">Stützen Opernturm</td><td rowspan="2">Bewertung</td></tr>
<tr><td>S1</td><td>S2</td><td>S54</td><td colspan="2">S1010</td></tr>
<tr><td>Bewehrungs-grad [%]</td><td>19,5</td><td>11,3</td><td>ca. 6</td><td colspan="2">ca. 12</td><td>Bewehrungsgrad der Versuchsstützen tendenziell höher, somit Anteil des Stahls an der Tragfähigkeit größer: Versuchsstützen ungünstiger</td></tr>
<tr><td>Ausmitte e [m]</td><td>0,01</td><td>0,018</td><td colspan="3">Ohne planmäßige Momente, ungewollte Aus-mitte nach DIN 1045-1 ca. 0,0171</td><td>Anpassung der Ver-suchsstützen an die realen Bedingungen</td></tr>
<tr><td>nom c [cm]</td><td colspan="2">5,2</td><td>5,35</td><td colspan="2">7,35</td><td>Versuchsstützen ungünstiger</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Bügel</td><td colspan="2" rowspan="3">Ø 10/15
im Lasteinlei-tungsbereich
Ø 10/9</td><td>Ø 12/20</td><td colspan="2">Ø 16/20</td><td rowspan="3">Verbügelung der Versuchs- und Bau-werksstützen ist in etwa vergleichbar</td></tr>
<tr><td colspan="3">Lasteinleit.-bereich</td></tr>
<tr><td>Ø 12/10</td><td colspan="2">Ø 16/10</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Belastung $N_{Ed,fi}$ [kN]</td><td>3006</td><td>3002</td><td>14951</td><td colspan="2">72731</td><td rowspan="2">Die Versuchsstützen sind durch geringere Stahlspannung gün-stiger. Die durch Ausmitten eingeprägten Verformungen sind bei den Versuchs-stützen ungünstiger.</td></tr>
<tr><td colspan="2">entspricht 67 % der Gebrauchslast</td><td colspan="3">Stahl im GZT bis zur Streckgrenze belastet (Knicken)</td></tr>
<tr><td>Lagerungs-bedingungen</td><td colspan="2">oben/unten gelenkig</td><td colspan="3">oben/unten unberücksichtigte Teileinspannung</td><td>Versuchsstützen ungünstiger</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Bewehrung [mm]</td><td>n</td><td>4</td><td>4</td><td>18</td><td>28</td><td>+ 8</td><td rowspan="2">Versuchsstützen decken den ungün-stigsten Fall ab</td></tr>
<tr><td>Ø</td><td>75</td><td>57^5</td><td>43</td><td>75</td><td>57^5</td></tr>
<tr><td>Schlankheit λ</td><td colspan="2">43,25</td><td>65,27</td><td colspan="2">34,6</td><td>Versuchsstützen sind gegenüber der Bauwerksstütze S54 günstiger</td></tr>
<tr><td>$L = L_0$ [m]</td><td colspan="2">3,74</td><td colspan="3">11,75</td><td></td></tr>
</table>

beziehungen. Weitere Anpassungen der in [31] genormten Materialkennwerte wurden bewusst nicht vorgenommen.

Mit dem allgemeinen Rechenverfahren werden eine thermische Analyse zur Ermittlung der Bauteiltemperaturen und anschließend eine mechanische Analyse zur Ermittlung des Trag- und Verformungsverhaltens durchgeführt. Weiterführende Informationen zum allgemeinen Rechenverfahren können den Beiträgen von Hosser [32] und Richter [33] zu den der Braunschweiger Brandschutz-Tagen ‘09 entnommen werden.

Versuchs- und Rechenergebnisse, Schlussfolgerungen

Am Beispiel der Versuchsstütze S1 werden die Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen der numerischen Simulation verglichen.

In Bild 8 werden stellvertretend für alle gemessenen Temperaturen die Messwerte auf der Außen- und Innenseite der Längsbewehrung SAS 670/800 im oberen Drittel der Stützenlänge zusammen mit den Rechenwerten im Schwerpunkt des Bewehrungsstabs dargestellt.

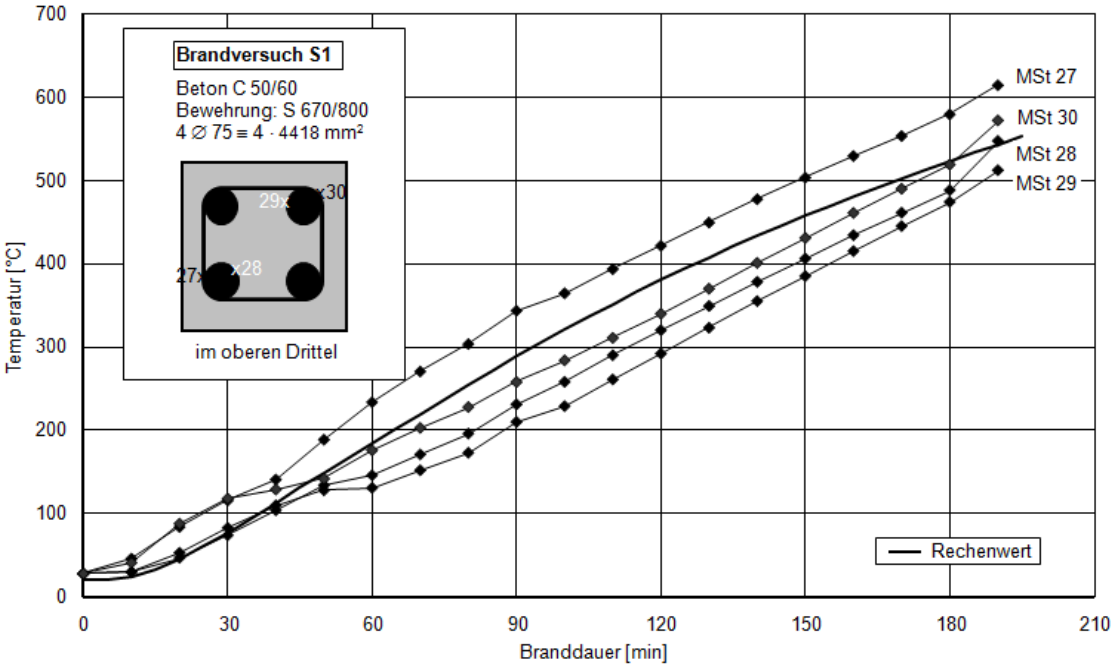


Bild 8 *Gemessene Temperaturen auf der Außen- und Innenseite der Längsbewehrung SAS 670/800 und berechnete Temperatur im Schwerpunkt des Bewehrungsstabs (Messung im oberen Drittel der Stützenlänge)*

Die gemessenen und berechneten Horizontalverformungen in Stützenmitte sind in Bild 9 und die Vertikalverformungen am Stützenkopf in Bild 10 gegenüber gestellt.

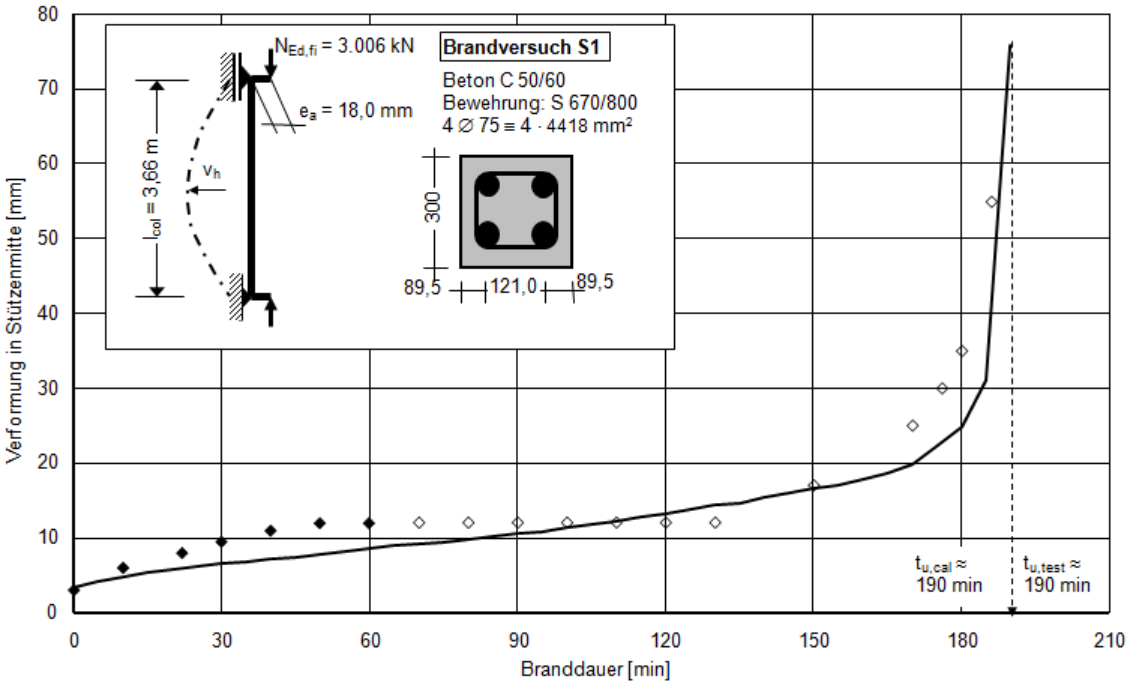


Bild 9 *Gemessene und berechnete Horizontalverformung in Stützenmitte der Versuchsstütze S1*

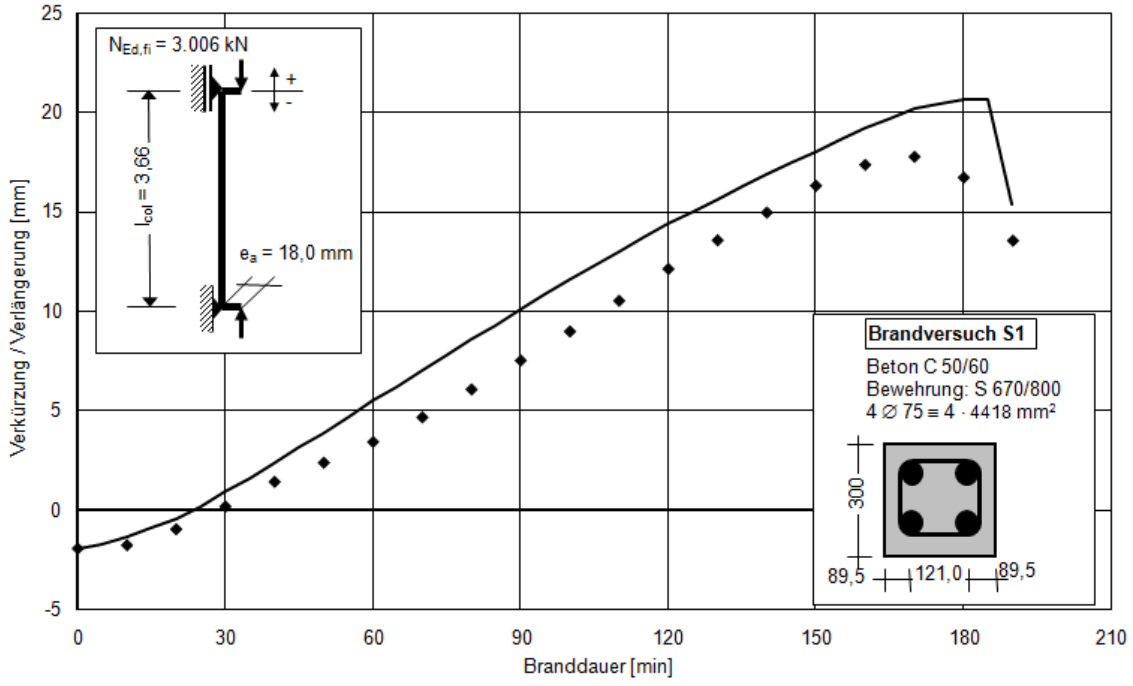


Bild 10 *Gemessene und berechnete Vertikalverformung am Stützenkopf der Versuchsstütze S1*

Aus dem Vergleich der Ergebnisse lassen sich für die Versuchsstütze S1 folgende Schlüsse ziehen:

- Der Versagenszeitpunkt lässt sich am besten aus Bild 9 ablesen. Sowohl im Brandversuch als auch in der Simulationsrechnung versagt die Stütze nach 190 Minuten durch übermäßige Verformungszunahme (Steifigkeitsverlust).
- Die Bewehrungstemperatur wird in der Simulation zutreffend ermittelt.
- Die Übereinstimmung der Horizontalverformung in Stützenmitte im Versuch und in der Simulationsrechnung ist gut. Hierbei ist zu beachten, dass Verformungsmessungen im Brandofen generell mit großen Unsicherheiten behaftet sind.
- Die berechnete Verlängerung der Stütze ist geringfügig größer. Diese Unterschiede sind dadurch zu erklären, dass der Stützenbeton auf Grund seiner Gesteinskörnung eine geringere thermische Dehnung aufweist, als unter der Voraussetzung vorwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung angenommen wurde.
- Insgesamt stimmen die Ergebnisse der Brandversuche und der rechnerischen Simulation unter Ansatz von Standardwerten für die temperaturabhängigen Materialkennwerte sehr gut überein.
- Die geforderte Feuerwiderstandsdauer von 120 min wird bei der Versuchsstütze deutlich überschritten. Die Stütze kann in die Feuerwiderstandsklasse F 180, Kurzbezeichnung "F 180-A", nach DIN 4102 Teil 2 (09.77) eingestuft werden.
- Auch bei dieser Stütze wurden über die gesamte Branddauer so gut wie keine Abplatzungen festgestellt.
- Damit kann die Gefahr zerstörender Betonabplatzungen bei der gewählten Betonrezeptur für die Versuchsstützen unter Zusatz von 1,5 kg/m^3 PP-Fasern und unter vergleichbaren Randbedingungen hinsichtlich Querschnittsabmessungen und Belastung wie im Versuch als gering eingestuft werden.

Die Schlussfolgerungen für die Versuchsstütze S1 wurden in Versuch und Rechnung vollumfänglich für die Versuchsstütze S2 bestätigt. Die unterschiedliche Feuerwiderstandsdauer von Versuchsstütze S1 ($t_{u,test}$ = $t_{u,cal}$ = 190 min) und Versuchsstütze S2 ($t_{u,test}$ = 156 min, $t_{u,cal}$ = 155 min) spielt keine Rolle, da in beiden Fällen die geforderte Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten deutlich überschritten wurde.

Numerische Simulation repräsentativer Bauwerksstützen

Unter Berücksichtigung der für das Brandverhalten besonders kritischen Parameter und der in Tabelle 6 zusammengestellten Randbedingungen der Bauwerksstützen beim Opernturm Frankfurt wurden in Abstimmung mit dem für die technische Umsetzung und Berechnung der hochfesten Stützen verantwortlichen Ingenieurbüro Dr. Falkner und Partner, Stuttgart, zwei hinsichtlich des Brandverhaltens sehr ungünstige Stützen ausgewählt. Es handelt sich um die Stützen-Positionen S54 und S1010 aus Tabelle 6, die Querschnitte und Bewehrung dieser Stützen sind in Bild 7 dargestellt. Für diese Stützen wurde das

Trag- und Verformungsverhalten bei Brandbeanspruchung durch die ETK gemäß DIN 4102 Teil 2 durch rechnerische Simulation mit dem allgemeinen Rechenverfahren STABA-F untersucht.

Ergebnisse der numerischen Simulation und Schlussfolgerungen

Die Simulationsergebnisse der beiden repräsentativen Bauwerksstützen werden am Beispiel der Stütze S54 erläutert. In den Bildern 11 bis 13 sind die berechneten Bewehrungstemperaturen sowie die Horizontal- und Vertikalverformung dargestellt.

Aus den Ergebnissen der numerischen Simulation lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- In der Längsbewehrung aus hochfestem Stahl SAS 670/800 mit einem Achsabstand u = 85 mm betrug die Maximaltemperatur nach einer Branddauer von 120 Minuten ca. 400 °C und am Ende der Simulationsdauer von 210 Minuten ca. 600 °C (Bild 11).
- Die Horizontalverformungen in Stützenmitte nahmen mit zunehmender Simulationsdauer zu und führten nach 126 Minuten Branddauer zum Stabilitätsversagen der Stütze (Knicken um die schwache Achse) (Bild 12).
- Bei der voll belasteten Stütze trat zunächst eine Stauchung von knapp 7 mm auf, die dann von der thermischen Dehnung überlagert wurde. Unmittelbar vor dem Versagen der Stütze betrug die Verlängerung der Stütze ca. 11 mm (Bild 13).

Für die Stütze S1010 ergaben sich ähnliche Schlussfolgerungen. Auf Grund des hier vorhandenen größeren Achsabstandes u = 115 mm wurde die Längsbewehrung nur sehr langsam erwärmt. Die Maximaltemperatur betrug nach einer Branddauer von 120 Minuten ca. 230 °C und am Ende der Simulationsdauer ca. 380 °C. Folgerichtig zeigten die Horizontalverformungen in Stützenmitte über die gesamte Simulationsdauer einen stetigen Anstieg, ohne Anzeichen für einen bevorstehenden Steifigkeitsverlust. Die kräftige Stauchung zu Beginn des Brandversuchs von knapp 14 mm wurde während des Brandversuchs zunehmend von der thermischen Dehnung überlagert, sodass am Ende der Simulationsdauer die Ausgangslage wieder erreicht wurde.

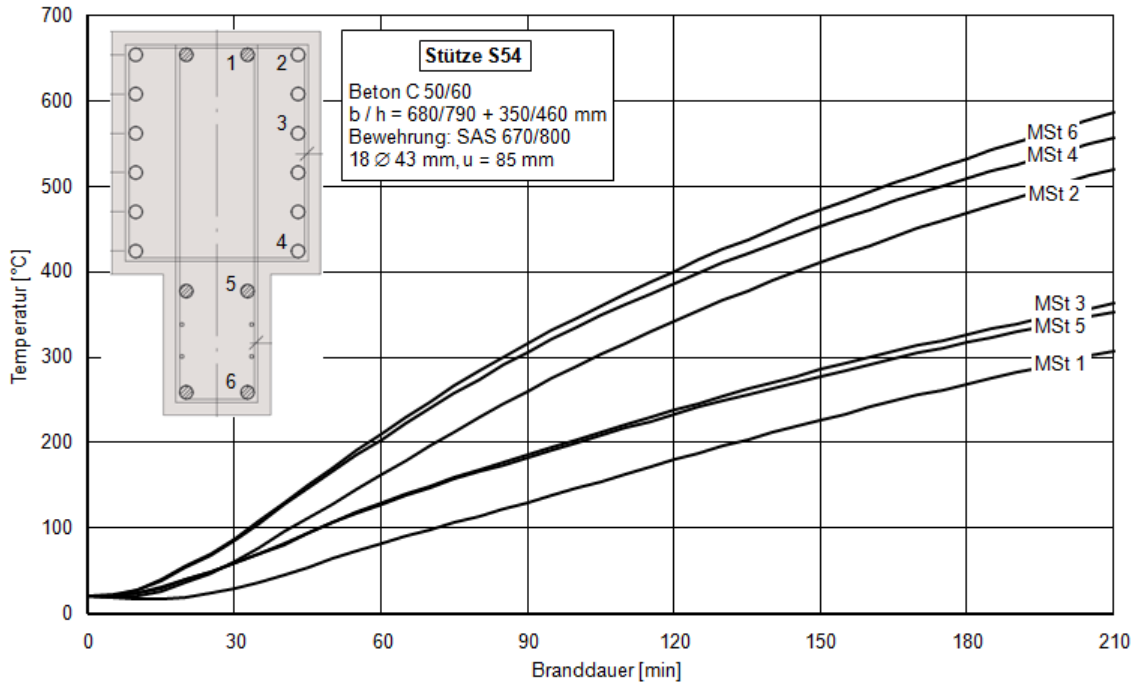


Bild 11 *Berechnete Bewehrungstemperaturen an den bezeichneten Stäben der Stütze S54 in Abhängigkeit von der Branddauer*

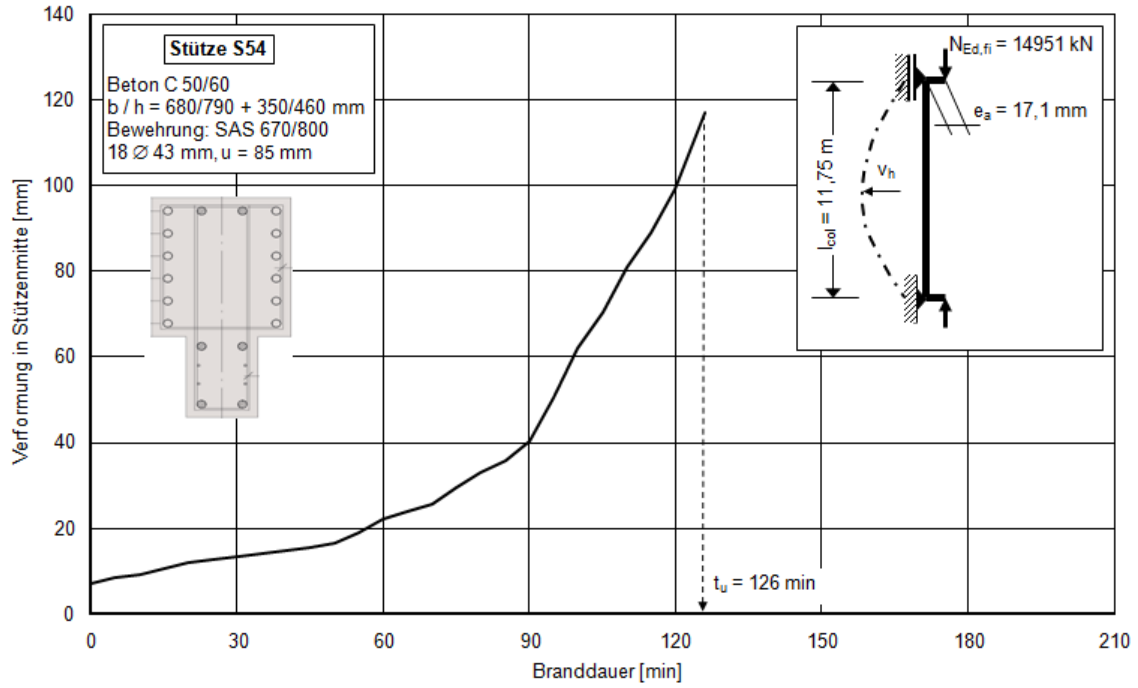


Bild 12 *Berechnete Horizontalverformung der Stütze S54*

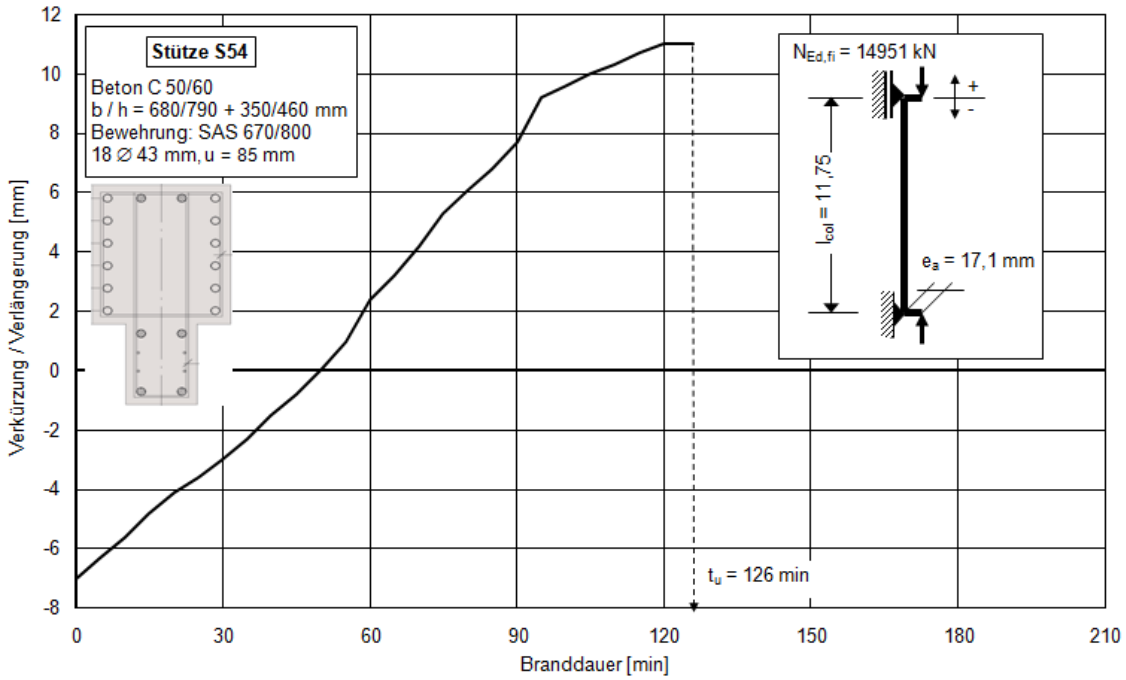


Bild 13 Berechnete Vertikalverformung der Stütze S54

Zusammenfassung hochbelastete Stahlbetonstützen

Beim Bauvorhaben Opernturm Frankfurt wurden Stahlbetonstützen mit hochfestem Bewehrungsstahl SAS 670/800 eingesetzt. Für diese neuartige Bauweise musste ein Antrag auf Zustimmung im Einzelfall bei der obersten Bauaufsichtsbehörde des Landes Hessen zum Nachweis der geforderten Feuerwiderstandsdauer F 120 gestellt werden.

Das Brandverhalten der für das Bauvorhaben Opernturm vorgesehenen Stützen konnte auf Grund der Stützenabmessungen und der Belastung nicht im Brandversuch ermittelt werden. Es wurde deshalb eine Kombination aus experimentellen und numerischen Untersuchungen durchgeführt.

Für die Normbrandversuche wurden Versuchsstützen konzipiert, bei denen die für das Brandverhalten maßgebenden Parameter durchweg ungünstiger als bei den Stützen im Bauwerk waren. Aus versuchstechnischen Gründen war jedoch die Lastausnutzung geringer als in Realität. Daher wurden die Ergebnisse der Normbrandversuche dazu verwendet, ein allgemeines Rechenverfahren zur numerischen Simulation des Trag- und Verformungsverhaltens brandbeanspruchter, stabförmiger Bauteile zu validieren. Unter Vorgabe der in DIN EN 1992-1-2 angegebenen temperaturabhängigen Materialkennwerte konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Rechenergebnissen, insbesondere hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer, erzielt werden. Die experimentell und rechnerisch ermittelten Feuerwiderstandsdauern lagen deutlich über der geforderten Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten. Bei beiden Ver-

suchsstützen traten über die gesamte Branddauer praktisch keine Betonabplatzungen auf.

Die als repräsentativ ausgewählten beiden Stahlbetonstützen mit hochfestem Bewehrungsstahl SAS 670/800 beim Bauvorhaben Opernturm Frankfurt konnten somit in die Feuerwiderstandsklasse F 180, Kurzbezeichnung "F 180-A" bzw. in die Feuerwiderstandklasse F 120, Kurzbezeichnung "F 120-A" eingestuft werden.

Die experimentellen und rechnerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Stahlbetonstützen mit dem hochfesten Bewehrungsstahl SAS 670/800 und einem Beton C50/60 mit PP-Fasern bei Brandbeanspruchung sehr positiv verhalten.

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wird an Hand von zwei Beispielen berichtet, wie die Weiterentwicklung der Betonbauweise zu neuen Ansätzen und Wegen beim Nachweis des baulichen Brandschutzes geführt hat.

In einem kurzen Überblick wird dargestellt, wie in den letzten Jahrzehnten entscheidende Impulse zur Weiterentwicklungen der Betonbauweise durch Fortschritte in der Baustofftechnologie ausgelöst wurden. Dafür werden stellvertretend die bautechnischen Innovationen beim Faserbeton, beim selbstverdichtenden Beton und schließlich beim hoch- und ultrahochfesten Beton sowie die Entwicklung hochfester Betonstähle genannt. Gemeinsames Merkmal dieser Entwicklungen sind höhere Festigkeiten und zuverlässige Anwendung auch für kleine und filigrane Bauteilabmessungen. Für den baulichen Brandschutz bedeutet die Entwicklung zu kleinen und filigranen Querschnitten mit gleichzeitig hoher Lastausnutzung, dass die Bauteile schneller erwärmt werden, die Baustoffe rascher ihre ursprüngliche Festigkeit verlieren und gleichzeitig die Gefahr zerstörender Betonabplatzungen zunimmt.

Am Beispiel des einschaligen Tunnelausbaus mit Stahlbetontübbings wird gezeigt, wie mit Hilfe eines vereinfachten rechnerischen Standsicherheitsnachweises die Anforderungen aus den europäischen und deutschen Regelwerken an den baulichen Brandschutz von Tunneln erfüllt werden können. Der Nachweis wird in drei Schritten ausgeführt: im ersten Schritt werden die zu erwartenden Betonabplatzungen auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt und durch eine reduzierte Bauteildicke berücksichtigt. Im zweiten Schritt werden für den reduzierten Bauteilquerschnitt die instationäre Erwärmung sowie die zeitabhängige Entwicklung der Zwangschnittgrößen und der Biegesteifigkeit berechnet; die Berechnung wird am System eines gebettet gelagerten Tunnelrings ohne Tübbingfugen durchgeführt. Im dritten Schritt wird der Tunnelring für die Schnittgrößen am gebetteten Gesamtsystem mit Längs- und Ringfugen unter Berücksichtigung der Ersatztemperaturen $T_{0,ers}$ und ΔT_{ers}, der zeitabhängigen Biegesteifigkeit und der übrigen Gebrauchslasten wie Gebirgs- und Wasser-

druck bemessen und die Standsicherheit durch Vergleich der für den Lastfall „Brand“ erforderlichen Bewehrung und der auf Grund der Bemessung unter Gebrauchslast und Normaltemperatur vorhandenen Bewehrung nachgewiesen.

Beim Lastfall „Nach dem Brand“ werden die Einwirkungen bei Normaltemperatur auf das gebettete Gesamtsystem mit Längs- und Ringfugen unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit nach dem Brand angesetzt.

In einem weiteren Beispiel wird gezeigt, wie der bauliche Brandschutz für hochbelastete Stahlbetonstützen nachgewiesen werden kann, deren Bewehrung aus hochfestem Stahl SAS 670/800 besteht und deren Brandverhalten auf Grund der Bauteilabmessungen und Lasten nicht im Brandversuche festgestellt werden kann. Es wurden Versuchsstützen für Normbrandversuche konzipiert, bei denen die für das Brandverhalten maßgebenden Parameter durchweg ungünstiger waren als bei den Stützen im Bauwerk. Anhand der Versuchsergebnissen wurde das allgemeine Rechenverfahren STABA-F validiert und anschließend zur rechnerischen Untersuchung von zwei als repräsentativ ausgewählten Stützen des Opernturms verwendet. Die Stützen erreichten Feuerwiderstandsdauern von mehr als 200 Minuten bzw. 126 Minuten und konnten somit in die Feuerwiderstandsklasse „F 180-A“ bzw. „F 120-A“ eingestuft werden

Das Beispiel zeigt, wie die bei dem Hochhaus geforderte Feuerwiderstandsklasse F 120 durch Kombination von experimentellen und rechnerischen Untersuchungen erfolgreich nachgewiesen werden kann.

LITERATUR

[1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie Stahlfaserbeton. Ausgabe März 2010.

[2] Kampmeier, B.; Hollmann, D.: Grundlagen für die Brandschutzbemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2011. Tagungsband. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 214, 2011.

[3] Brandschutz in Verkehrstunnelanlagen - Fahrzeugbrandversuche in Norwegen. FuE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, Förderkennzeichen 13RG9004/2. 1990. Forschungsnehmer: Studiengesellschaft für Stahlanwendung, Düsseldorf; wissenschaftliche Betreuung und Durchführung der Brandversuche: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig; Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, Köln und Institut für Ökologische Chemie und Abfallanalytik der Technischen Universität Braunschweig.

[4] Richter, E.: Tunnelbrandversuche in Norwegen. Braunschweiger Brandschutz-Tage ´93. Kurzreferate. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 103, 1993.

[5] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING Teil 5 Tunnelbau. Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056, Verkehrsblatt Verlag, Stand 12/07. Abschnitt 1. Geschlossene Bauweise, Stand 12/07. Abschnitt 2 Offene Bauweise, Stand 12/07. Abschnitt 3 Maschinelle Schildvortriebsverfahren, Stand 12/07

[6] Hosser, D.; Richter, E.; Siegfried, W.: Baulicher Brandschutz für Tunnel in geschlossener Bauweise. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 15.236 R93E im Auftrag des Bundesministers für Verkehr. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 1994.

[7] Hosser, D.; Richter, E.: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 15.263 R95E im Auftrag des Bundesministers für Verkehr. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig. Juni 1998.

[8] Richter, E.; Paliga, K.: Erkenntnisse aus Tunnelbränden zum konstruktiven Brandschutz. Braunschweiger Brandschutz-Tage ´99. Kurzreferate. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 145, 1999.

[9] Winselmann, D; Städing, A.; Babendererde, L.; Holzhäuser, J.: Aktuelle Berechnungsmethoden für Tunnelauskleidungen mit Tübbingen und deren Verfahrenstechnische Voraussetzungen. DGGT, Baugrundtagung Hannover, 2000.

[10] Kusterle; W. et al: Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton; Heft 544 der Schriftenreihe „Straßenforschung und Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG“ des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2004.

[11] Shuttleworth, P.: Fire protection of concrete tunnel linings; Tunnel Management International 5, Heft 2, 2002.

[12] Franz, A.; Dehn, F.: City-Tunnel Leipzig: Brandversuche an Tübbingen: EI - Eisenbahningenieur (57), Heft 5, 2006.

[13] Sicherheitstechnische Beurteilung und Anforderungen an den baulichen Brandschutz in Eisenbahntunneln mit Tübbingauskleidungen. Studie der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen (STUVA), des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig und des Ingenieurbüros Prof. Duddeck und Partner (D+P) im Auftrag der Deutschen Bahn, DB Netz. Schlussbericht Mai 2008.

[14] Schuck, W.; Haack, A.; Richter, E.; Städing, A.: Baulicher Brandschutz bei Eisenbahntunneln mit einschaligem Tübbingausbau. Beitrag im Taschenbuch für den Tunnelbau 2011 der Deutsche Gesellschaft für Geotechnik.; VGE Verlag GmbH Essen; 2010.

[15] Bunke, N.: Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 422, 1991.

[16] Both, C.: Tunnel fire safety. Proceedings of INTERFLAM 2001.

[17] Dehn, F.; Wehrter, N.: Brandversuche an Tunnelinnenschalenbetonen für den M 30-Nordtunnel in Madrid; Beton- und Stahlbetonbau101, Heft 9, September 2006.

[18] Boström, L., Larsen, C. K.: Concrete for tunnel linings exposed to severe fire exposure; FIRE 166 – MS, 12-13-04.

[19] Dahl, J.; Richter, E.: Brandschutz im einschaligen Tunnelausbau – Vermeidung von Betonabplatzungen. Braunschweiger Brandschutz-Tage ´01. Kurzreferate. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 158, 2001.

[20] Winkler, F., Theiß, R.: Einsatz von Kunststofffasern bei Tübbingen; Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 5. 2004.

[21] DIN EN 1991-1-2:2010-12 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen, Brandeinwirkungen auf Tragwerke.

[22] DIN EN 1992-1-1:2010-12 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau.

[23] DB Netz AG: Richtlinie 853 „Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten“. Stand 01.12.2008.

[24] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.

[25] Kommission der europäischen Gemeinschaften: Technische Spezifikation für die Interoperabilität bezüglich „Sicherheit in Eisenbahntunneln“ im konventionellen transeuropäischen Eisenbahnsystem und im transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystem (TSI-SRT). Brüssel, Dezember 2007.

[26] Eisenbahn-Bundesamt: Richtlinie „Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln“. Stand 01.07.2008.

[27] Falkner, H.; Gerritzen, D.; Jungwirth, D.; Sparowitz, L.: Das neue Bewehrungssystem; Druckglieder mit hochfestem Betonstahl SAS 670/800. Teil I: Entwicklung, Versuche, Bemessung und Konstruktion. Teil II: Opernturm Frankfurt – Anwendung. Beton- und Stahlbetonbau 103, Heft 5 und 8. 2008.

[28] Konzeption der Stützenbrandversuche S1 und S2. Bericht des Büros Falkner und Partner, Stuttgart, vom 01.07.2007 (unveröffentlicht).

[29] Opernturm Frankfurt – Stützen aus hochfestem Bewehrungsstahl D 670/800. Informationen zur Beurteilung der Brandsicherheit. Bericht des Büros Falkner und Partner, Stuttgart, vom 18.07.2007 (unveröffentlicht).

[30] Quast, U.; Hass, R.; Rudolph, K.: STABA-F – Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens von einachsig gespannten Bauteilen unter Feuerangriff. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 1984.

[31] DIN V ENV 1992-1-2: Eurocode 2 - Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Ausgabe 1997.

[32] Hosser, D.: Brandschutzbemessung nach den Eurocodes –Vorgaben für die Anwendung in Deutschland. Braunschweiger Brandschutz-Tage ´09. Kurzreferate. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 208, 2009.

[33] Richter, E.: Brandschutztechnische Bemessung von Betontragwerken nach Eurocode 2 Teil 1-2. Braunschweiger Brandschutz-Tage ´09. Kurzreferate. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, Heft 208, 2009.

ENTWICKLUNG VON INGENIEURMETHODEN ALS BASIS FÜR LEISTUNGSORIENTIERTE BRANDSCHUTZKONZEPTE

Marita Kersken-Bradley
Kersken+Kirchner GmbH, München

WAS SIND INGENIEURMETHODEN?

Erste Brandversuche

Die ersten Bauteil-Brandversuche wurden vermutlich 1890 in den USA durchgeführt und zwar an Decken. In NY City gab es ab dem Jahr 1900 einen Code, der forderte, dass die Decken in Brandversuchen bei Temperaturanstieg bis zu 1100°C und Belastung 211kg/m² 5 Stunden standhalten mussten - und nach Temperaturbeanspruchung die 4-fache Last für 24 Stunden. Die ersten ASTM Standards über Brandversuche wurden 1908 herausgegeben, mit gleicher Belastung aber einem Temperaturanstieg bis zu 927°C. In den folgenden Jahren wurden weitere Versuche durchgeführt, auch an Stützen und schließlich erschien im Jahre 1918 der Vorläufer von ASTM E119 mit der Standard-Temperaturzeitkurve

$T = T_o + 345 \log (0{,}1833t + 1)$ t in Stunden

Wegen des Abkühlverhaltens von Schmiede- und Gusseisen wurden damals Löschwasserversuche (hose stream test) gefordert. Seinerzeit wurden die Brandversuche ganz bestimmt als Ingenieurmethoden erachtet.

Erste äquivalente Branddauern

Die Verbindung zwischen der Standard-/Einheits-Temperaturzeitkurve und dem Brandverhalten bei natürlichen Schadensfeuern beschäftigte S. Ingberg schon in den 20er Jahren. Aufgrund umfangreicher Versuche, auch im großen Maßstab, stellte er die „equal area“ Theorie auf [1]. Er ermittelte die Fläche unter der Naturbrandkurve und setzte diese gleich der Fläche unter der ETK – jeweils oberhalb einer Basistemperatur von 150°C oder 300°C. vgl. Abb. 1.

Ingberg stellte seine Ergebnisse in Tabellenform dar, aus denen bis zu 800 kWh/m² sich eine lineare Beziehung: $t_e = 0{,}24\ q$ ermitteln lässt. In späteren Untersuchungen hat Ingberg auch auf den Einfluss von Ventilationsbedingungen hingewiesen, diesen aber nicht quantifiziert.

Ab den 60er Jahren wurde das Thema einer Äquivalenz wieder aufgegriffen mit verschiedenen Ansätzen für die Ventilation und zunehmend im Sinne einer vergleichbaren maximalen Bauteiltemperatur, so wie wir es heute kennen. Beispielhaft seien folgende Forscher genannt: K. Kawagoe (1963), M. Law (1973), O. Pettersson (1976).

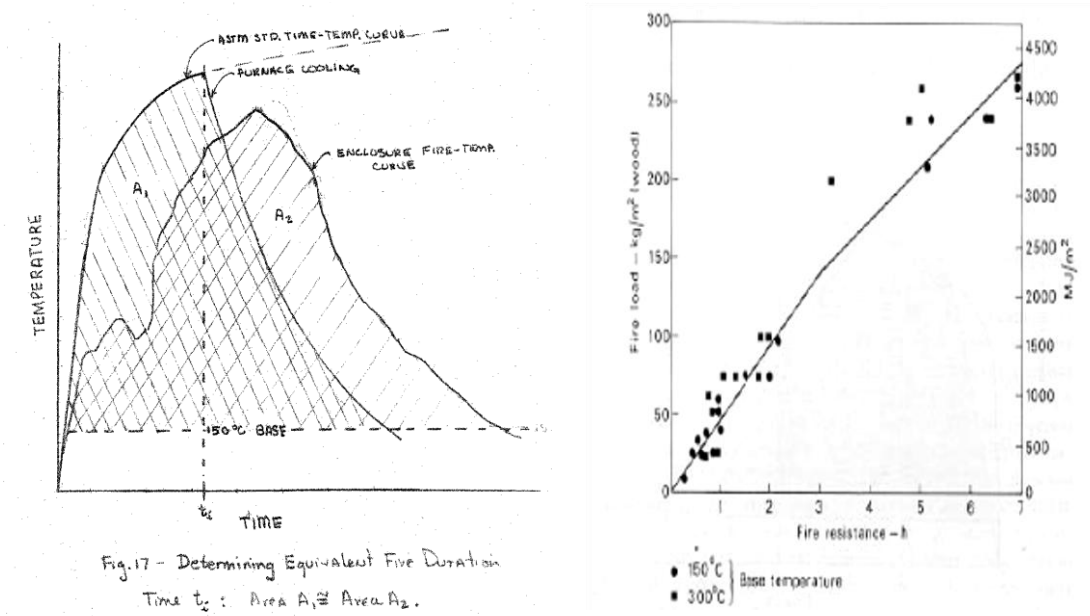


Bild 1 Equal Area Theory von Ingberg

Heute

Einen umfassenden Überblick zum Stand der Ingenieurmethoden liefert das SPFE Handbook of Fire Protection Engineering [2]. Für den deutschsprachigen Raum kann auf den vfdb-Leitfaden, herausgegeben von D. Hosser verwiesen werden [3] und auf die „Ingenieurmethoden im baulichen Brandschutz“ von U. Schneider et al. [4].

Sicherheitskonzepte

Neben den Bemühungen physikalische Phänomene für die praktische Anwendung aufzubereiten, gehört auch der Umgang mit Modellunsicherheiten, Streuungen und deren Aufbereitung im Sinne von Wahrscheinlichkeitsaussagen zu den Ingenieurmethoden. Die Grundlagen der ersten Fassung von DIN 18230-1 (Entwurf 8/78) wie sie z. B. in [5] und [6] beschrieben wurden, sind im Wesentlichen noch heute zutreffend und wurden mit Ergänzungen im Rahmen der Eurocodes übernommen [7].

Noch orientieren sich die Sicherheitskonzepte, die auch in [3] und [4] behandelt werden, sehr stark an Bemessungssituationen für den konstruktiven Brandschutz; für andere Bemessungssituationen – etwa die Rauchableitung oder Personenstromanalysen betreffend – besteht Untersuchungsbedarf.

Folgerungen für Ingenieurmethoden

Zuweilen besteht die Tendenz nur rechnerischen Verfahren den Status einer Ingenieurmethode zuzubilligen. Es gibt aber genügend Fragestellungen die nicht oder nicht allein rechnerisch modelliert werden können (Beispiel: Brand-

ausbreitung über Fassaden). Insofern sind Ingenieurmethoden rechnerische und/oder experimentelle Nachweise gegenüber definierten Einwirkungen oder Leistungskriterien, die gegenüber der Physik mehr oder minder vereinfachend sind.

Der Übergang zwischen der Anwendung einer Bemessungshilfe und einer Ingenieurmethode ist gleitend. So kann man die Angaben zur Ermittlung der äquivalenten Branddauer nach DIN 18230-1 als Bemessungshilfe verstehen, im Wesentlichen abgeleitet aufgrund von Ingenieurmethoden. Man kann die Ermittlung der äquivalenten Branddauer nach DIN 18230-1 aber auch als eine, wenn auch stark vereinfachende Ingenieurmethode erachten. Die Ausübung eines fachlichen Ermessens kann Ingenieurmethode sein, wenn es auf der Grundlage weitreichender Versuchserfahrung oder Literaturkenntnisse erfolgt. Als Ingenieurmethode kann auch eine Bewertung dahingehend gelten, dass aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit auf eine Auslegung für ein bestimmtes Ereignis verzichtet werden kann.

WAS SIND LEISTUNGSORIENTIERTE BRANDSCHUTZKONZEPTE?

Um einem Kalauern a priori entgegenzuwirken wird darauf hingewiesen, dass „leistungsorientiert“ die deutsche Übersetzung von „performance-based“ ist. Der Begriff ist nicht brandschutzspezifisch: Er rührt aus dem konstruktivem Ingenieurbau bei dem man in den 70er Jahren begann, die damals üblichen Nachweise zulässiger Spannungen, die oft mehrere Aspekte des Tragverhaltens zusammenfassten, hinsichtlich physikalischer Grenzzustände, die durch die Bemessung verhindert werden sollten, zu analysieren. Im engeren Sinne handelt es sich um eine Bemessung nach Grenzzuständen (limit-state design), im weiteren Sinne kann man leistungsorientiert auch mit schutzzielorientiert gleichsetzen.

Brandschutzspezifisch ist eher das Feindbild des performance-based design, nämlich das „prescriptive design“ – also eine brandschutztechnische Auslegung nach Vorschriften - in der Annahme dass Vorschriften durchweg ungerechtfertigt oder zu konservativ sind. Ohne Feindbild weicht ein leistungsorientiertes Brandschutzkonzept punktuell von den Lösungen des Brandschutzkonzeptes der MBO/LBO ab, und zwar dort wo nutzungs- oder gebäudespezifische Gegebenheiten durch bauaufsichtliche Vorschriften nicht ausreichend gewürdigt werden.

Bedingt nun ein leistungsorientiertes Brandschutzkonzept die Verwendung von Ingenieurmethoden im Sinne rechnerischer und/oder experimenteller Nachweise? Meines Erachtens nein. Ein leistungsorientiertes Brandschutzkonzept wägt ab, ob es für den Bauherrn im Einzelfall tatsächlich und auch nachhaltig Vorteile bringt, mögliche Erleichterungen in Anspruch zu nehmen

LEISTUNGS-/SCHUTZZIELORIENTIERTE VORSCHRIFTEN

Eher nicht schutzzielorientiert

„Die Scheidung der Stockwerke in Gebäuden mit Feuerstätten muß entweder in massiver Weise oder durch entsprechend starke Balkenlagen geschehen, an deren unterer Seite ein Mörtelverputz anzubringen ist, und deren Zwischenfüllung aus reinem, trockenem und unverbrennlichem Material zu bestehen hat und in diesem Zustande erhalten werden muß. Organische Stoffe, Bauschutt, Kehricht, Asche, Lösch etc. dürfen als Füllmaterial nicht verwendet werden.“ Entnommen aus: „Die Münchener Bauordnung vom 29. Juli 1895“ [1].

MBO 2008

Im Rahmen der heutigen MBO haben wir durchaus schutzzielorientierte Vorschriften, teilweise als alte Bekannte, teilweise noch zögerlich:

§ 14 Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung … .

In den nachfolgenden materiell-rechtlichen Regelungen wird das übergeordnete Schutzziel des §14 für die einzelnen Bestandteile eines Gebäudes konkretisiert:

§ 27 Tragende und aussteifende Wände und Stützen müssen im Brandfall ausreichend lang standsicher sein.

§ 28 Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen sind so auszubilden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.

§ 29 Trennwände … müssen als raumabschließende Bauteile von Räumen oder Nutzungseinheiten innerhalb von Geschossen ausreichend lang widerstandsfähig gegen die Brandausbreitung sein.

§ 32 Bedachungen müssen gegen eine Brandbeanspruchung von außen durch Flugfeuer und strahlende Wärme ausreichend lang widerstandsfähig sein (harte Bedachung).

Im Anschluss an die Schutzzielformulierung werden jeweils Lösungen genannt, die dem Brandschutzkonzept der MBO entsprechend zur Einhaltung der Schutzziele führen. Für abweichende Lösungen muss die Abweichung beantragt und begründet werden. Punktuell vermisst man noch abgestufte Schutzzielformulierungen oder auch eindeutigere Schutzzielverzichte (z. B. bei Dachräumen). Die Sonderbauverordnungen stellen in diesem Sinne ebenfalls Lösungen zur Einhaltung der Schutzziele der MBO dar, auch wenn man hier noch deutlicher abgestufte Schutzziele vermisst.

Mögliche Zukunft

Ggf. in Verbindung abgestufter Schutzziele ist es eigentlich nur noch ein kleiner Schritt, wenn die Lösungen der MBO/LBO oder der Sonderbauverordnungen nurmehr als „deemed-to-satisfy rules“ eingestuft werden und anstelle eines Abweichungsantrags

- Gleichwertigkeit der Lösung (vgl. technische Baubestimmungen) oder
- Gleichwertigkeit im Sinne der Schutzziele

nachzuweisen ist. Man muss sich aber im Klaren sein, dass dann auch die Rechtssicherheit bei Anwendung der MBO-Lösung oder der Sonderbau-Lösung nicht mehr im bisherigen Umfang gegeben sein wird. Insofern ist nicht zu erwarten, dass eine solche Entwicklung durchweg zu geringeren Baukosten führt.

ANWENDUNGEN

Konstruktiver Brandschutz

Am weitesten fortgeschritten sind Ingenieurmethoden im Bereich des konstruktiven Brandschutzes. Eine wesentliche Entscheidung im Rahmen der Eurocodes war es, die Regelungen für die brandschutztechnische Auslegung in den jeweiligen Eurocodes aufzunehmen und somit die heiße Bemessung besser an die normale Tragwerksbemessung anzubinden. Auch aufbauend auf jahrzehntelange Versuchserfahrung ist man bei der Ermittlung des Tragverhaltens unter Temperatureinwirkung für die meisten Bauarten so weit, dass fallweise Querschnittsnachweise, Bauteilnachweise und Tragwerksnachweis (auch unter Einbeziehung nicht brandbeanspruchter Bereiche) mit größerer Aussagesicherheit geführt werden können als mit Brandversuchen.

Im Regelfall erfolgt die Bemessung für eine Temperatureinwirkung gemäß der ETK und für eine vorgegebene, oder anhand der äquivalenten Branddauer $t_{ä}$ bestimmte, erforderliche Feuerwiderstandsdauer. Soweit es die Anwendungsgrenzen der Materialmodelle erlauben, können auch beliebige Naturbrandverläufe berücksichtigt werden.

Da seitens der Braunschweiger Forschung über viele Jahre hinweg, auch und insbesondere im Rahmen der Eurocodes wesentliche Beiträge geleistet wurden, wir hier nicht auf dieses Thema eingegangen.

Sonderbauteile

Nachweise für raumabschließende Bauteile wie Türen, Verglasungen, Brandschutzklappen, Schottungen entziehen sich noch weitestgehend einer rechnerischen Behandlung. Für sie wird auf viele Jahre hinweg der Brandversuch die einzige Nachweismethode sein, auch wenn die Versuchsplanung, –auswertung

und Klassifizierung zunehmend auch rechnerisch begleitet wird oder werden sollte.

Die ETK-gebundene Klassifizierung bedingt, dass Naturbrandverläufe für solche Bauteile ohne Belang sind bzw. nur in übersetzter Form als äquivalente Branddauer $t_ä$ verwendet werden können.

Naturbrände

Naturbrände stehen hier als Synonym für alle nicht genormten Temperatur-Zeit-Verläufe und können parametrische Zeitverläufe einschließen. Soweit Berechnungsverfahren zum Abschluss der Eurocodes als normungsfähig erachtet wurden, sind sie in DIN EN 1991-1-2 [8] eingeflossen. Da auch diese Arbeiten seitens der Braunschweiger Forschung eng begleitet wurden, wird dieses Thema nicht vertieft.

Mit Bezug auf die Ausführungen zu den Sonderbauteilen wird darauf hingewiesen, dass es nur wenig Gebäude ohne raumabschließende Sonderbauteile gibt. Insofern ist es unbedingt erforderlich, die Akzeptanz des sog. $t_ä$-Verfahrens zu verbessern. Wesentliche Beiträge hierzu werden im Rahmen der Arbeiten zu DIN 18230-4 geleistet, vgl. auch [5] und [8].

Eine eher untypische Fragestellung ergab sich bei der in Abb. 1 dargestellten Überdachung einer LKW-Ladehalle mit Fischbauchträgern und Stahlunterspannung, wobei die Überdachung sehr große Öffnungsflächen aufweist. Seitens des Büro Grewolls wurde mit FDS nachgewiesen, dass bei Sprinklerauslösung die Oberflächentemperatur der Unterspannung nicht über 300°C ansteigt. Die zuständige Feuerwehr wünschte eine Vergleichsrechnung mit einem anderen Modell; dabei sollte auch der Fall geprüft werden, dass keine Sprinklerauslösung erfolgt. Diese Berechnungen wurden mit den im MRFC enthaltenen Plumemodellen in Verbindung mit einem besonderen Auswertemodul seitens Dr. Max ausgeführt.

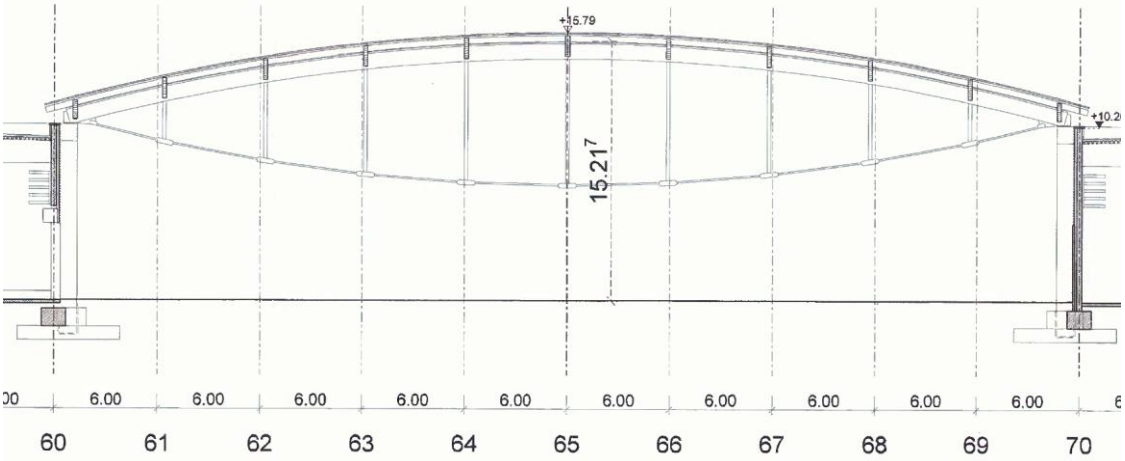


Bild 2 Halle mit Fischbauchträgern und Stahlunterspannung

Aufgrund der viel kürzeren Rechenzeiten konnten naturgemäß viel mehr Parametervariationen durchgeführt werden; in den nachfolgenden Bildern sind nur zwei Variationen dargestellt. Für den Fall der Sprinklerauslösung konnten die Ergebnisse der FDS Berechnung bestätigt werden; ohne Sprinklerauslösung lagen Versagenszeiten (für U/A = 48 m^{-1}) bei ca. 20 Minuten.

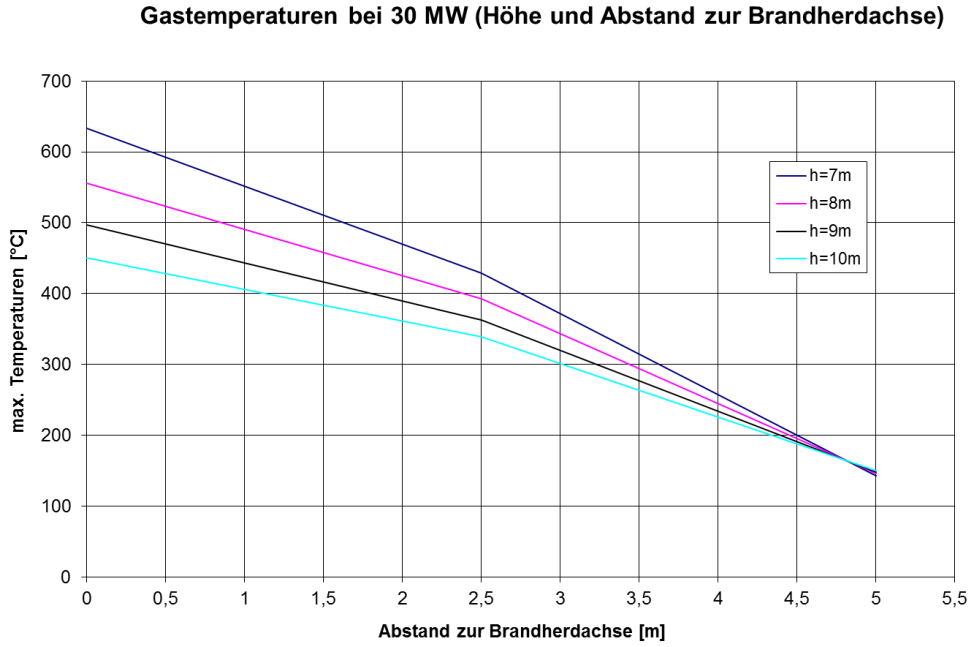


Bild 3 *Gastemperaturen ohne Sprinklerauslösung*

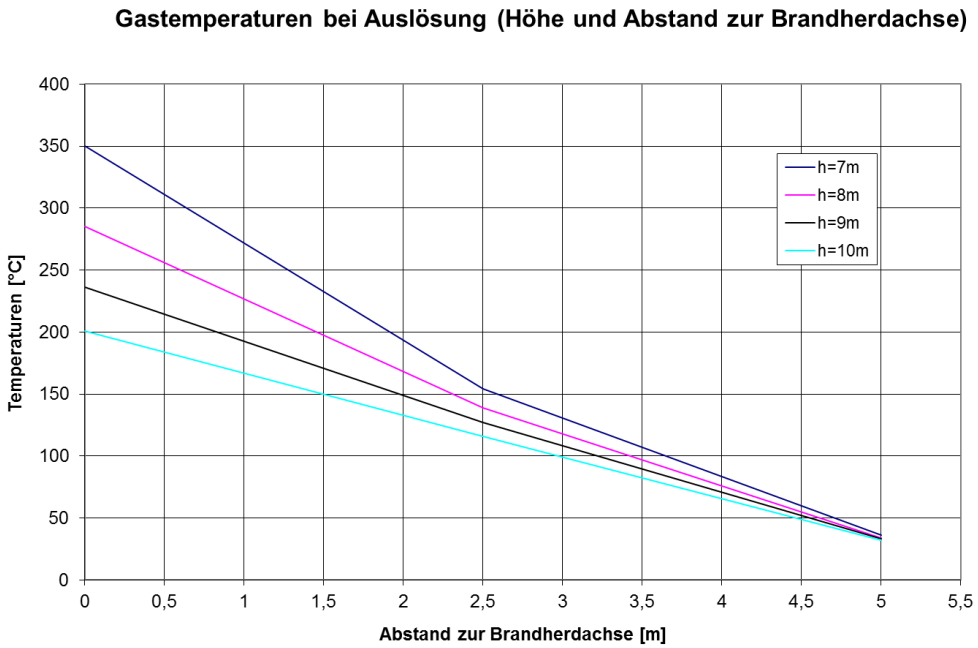


Bild 4 *Gastemperaturen bei Sprinklerauslösung*

Rauchausbreitung

Hier gibt es zwei Entwicklungen: Zum einen die Normung für den Nachweis raucharmer Schichten, welche Tabellenwerte für die Anwendung aufgrund von Ingenieurmethoden angibt. Zum anderen die unmittelbare Anwendung von Ingenieurmethoden um z. B. nachzuweisen, dass auch bei größeren Rauchabschnitten als nach Norm (in Verbindung mit zusätzlichen Maßnahmen) raucharme Schichten eingehalten werden. Übliche Anwendungen sind auch Atrien, z. B. wenn Rettungswege durch Atrien führen.

Ein Atrium aber mit nicht so üblicher Fragestellung ist am folgenden Beispiel erläutert: Es geht um ein Atrium in einem kleinen Hochhaus (45m) dass sich mit verschränkten Lufträumen über die gesamte Gebäudehöhe erstreckt. Rettungswege führen nicht durch das Atrium. Es gibt einen maschinellen Rauchabzug im Dach mit 360.000m³/h; es sollte nachgewiesen werden, dass es nicht erforderlich ist, die Bürofenster zum Atrium als Festverglasung auszuführen.

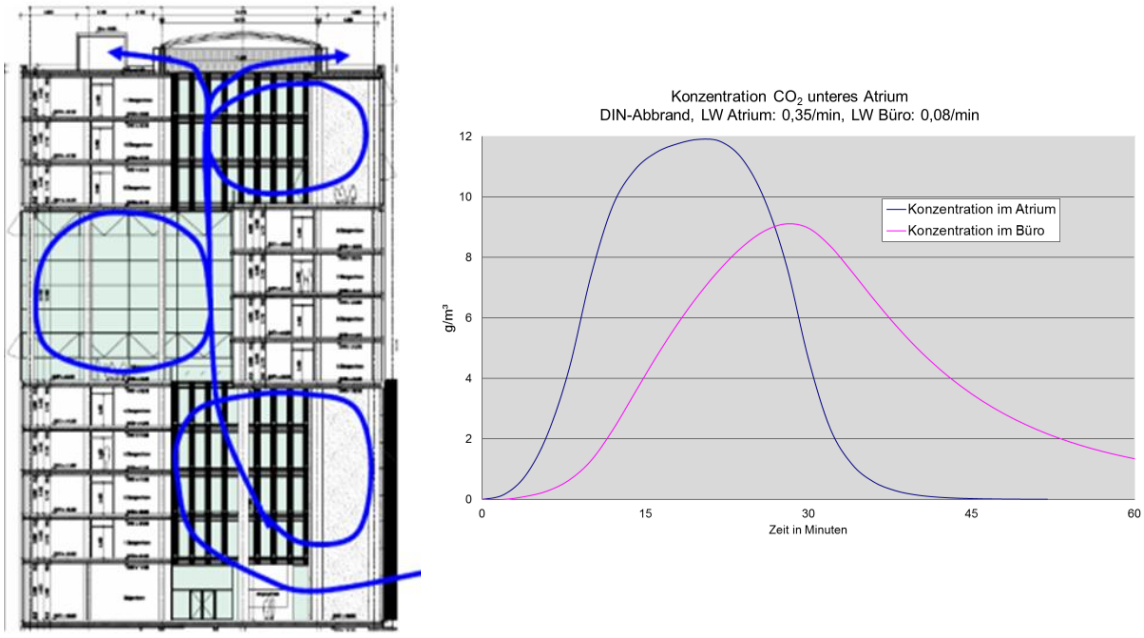


Bild 5 *Schematisierter Strömungsverlauf im verschränkten Atrium und Abschätzung der CO_2 Konzentration in Atrium und angrenzenden Büros*

Aufgrund von Strömungssimulationen des Büro P. Jung wurde festgestellt, dass im oberen Atriumbereich keine Schichtung entsteht, dass aber aufgrund der Luftströmung entlang der Atriumfassaden ein Luftaustausch bei geöffneten Bürofenstern zum Atrium zu erwarten ist; der Luftaustausch kann in der Größenordnung einem 5-fachen Luftwechsel entsprechen. Daraufhin verlangte die Genehmigungsbehörde, dass alle Fenster zum Atrium als Festverglasung auszuführen seien, sofern kein entsprechender Nachweis geführt wird. Daher wurde für einen vollständigen Abbrand von bis 400kg brennbarer Feststoffe und eine Bildungsrate Y_{CO2} = 1,5 g/g die CO_2-Konzentration im Atrium und den angren-

zenden Büros bestimmt. Es konnte nachgewiesen werden, dass in den angrenzenden Büroräumen MAK-Werte nicht erreicht werden.

Evakuierungsmodelle

In Bezug auf die Auswirkung von Modellunterschieden bei Entfluchtungsmodellen gibt es inzwischen verschiedene Untersuchungen, z. B [10] und [11]. Aus den nachfolgenden Abbildungen aus [12] ist zu erkennen, dass es durchaus „schnelle“ und „langsame“ Modelle gibt, wobei die Unterschiede umso größer sind, je einfacher die räumliche Situation. In Bild 6 sind die Modelle anonymisiert.

Das bedeutet nicht unbedingt, dass man solche Berechnungen nur unter Verwendung mehrerer Modelle durchführen darf, was manchmal sinnvoll ist, oft aber an den Kosten scheitert. Eine Plausibilitätsprüfung mit Handrechnungen ist in vielen Fällen möglich/geboten. Für verschiedene U-Bahnhöfe werden zurzeit Simulationsberechnungen für verschiedene Szenarien mit dem Modell Pedgo durch das Büro Waldau durchgeführt und parallel mit Handrechnungen nach NFPA 130 Abschnitt 5.5. Die Übereinstimmung ist bei den bisher durchgeführten Berechnungen gut, wobei die Zeiten nach NFPA etwas kürzer sind als in der Simulation.

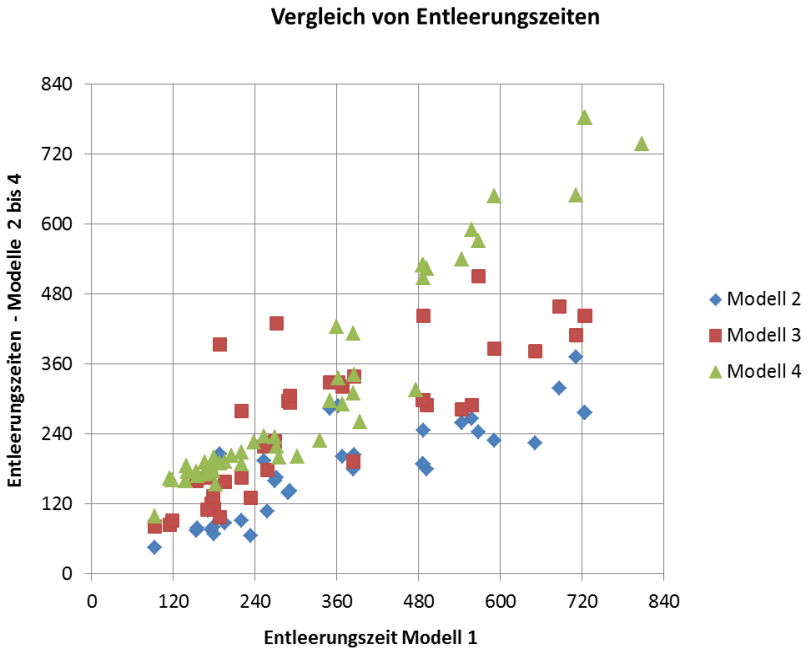


Bild 6 Entleerungszeiten mit verschiedenen Modellen berechnet

Im folgenden Beispiel wurde nachgewiesen, dass eine Rettungswegverlängerung auf 58 m über größere Rettungsweg- und Ausgangsbreiten kompensiert werden kann (die Bayerische VStättV kennt keine raumhöhenabhängige Wegverlängerung). Hierfür wurden die Entleerungszeiten für eine VStättV-konforme Auslegung (1), für Weglänge 58 m ohne Kompensation (2), für Weglänge 30 m

mit größerer Breite (3) und schließlich für Weglänge 58 m mit größerer Breite (4) ermittelt. Wir nennen dieses Vorgehen 4-Punkt-Nachweise.

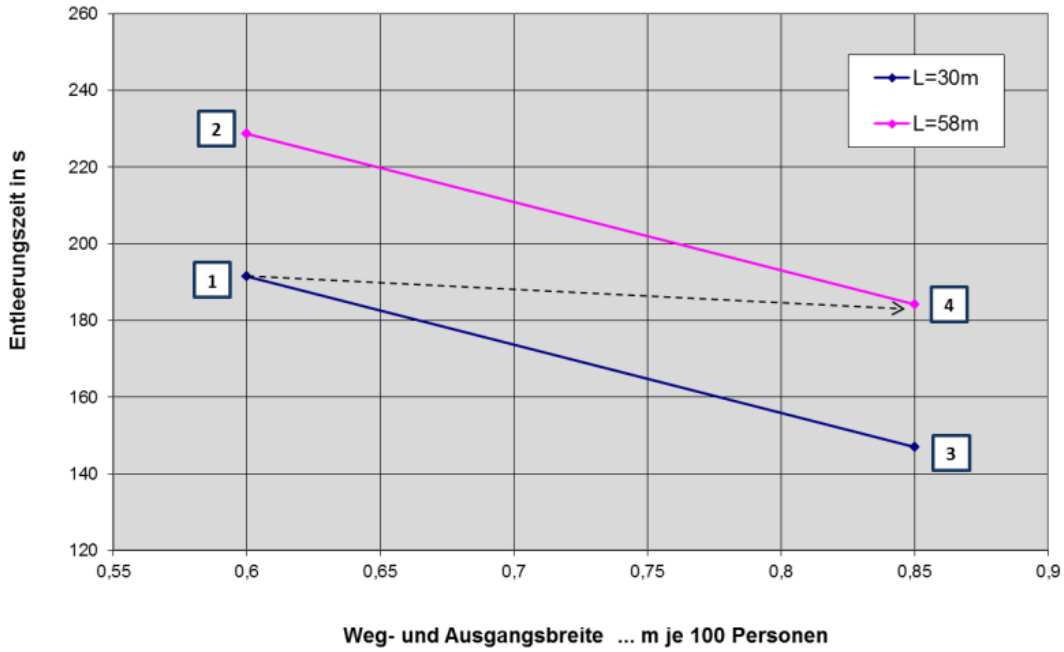


Bild 7 „4-Punkt-Nachweis“ für verlängerte Rettungsweglänge

Feuerlöschanlagen, Schutzanlagen

Ein Thema das bei Abhandlungen zu Ingenieurmethoden vergleichsweise selten erwähnt wird, ist die Bemessung von Feuerlöschanlagen, obgleich hier mittlerweile erhebliche Expertise bei der rechnerischen Modellierung in Verbindung mit umfänglicher Versuchserfahrung vorliegt. Auch hier gilt, dass Ingenieurmethoden vornehmlich für die Bereitstellung von Bemessungshilfen verwendet werden.

Es sind Sonderfälle bei denen im Rahmen eines Brandschutzkonzeptes etwa Vordimensionierungen – als Nachweis der Machbarkeit – durchgeführt werden. Als Beispiel wird eine 50m hohe Gebäudegruppe genannt, bei der im vorhabenbezogenen Bebauungsplan vergessen wurde, Mindestabstände (Schutzstreifen) gegenüber einem Tanklager auf dem Nachbargrundstück auszuweisen. Abstände zwischen Hochhaus und Tank betragen zwischen 17 m und 30 m. Entfernungsabhängige Wärmestrahlungsintensitäten für einen Störfall im Tanklager waren durch den TÜV vorgegeben, wobei für die hier betrachtete Fassade von bis zu 14 kW/m² auszugehen war. Wegen der möglicherweise sehr langen Einwirkungsdauer sollte im Rahmen des Bauantrags geprüft werden, ob durch eine Fassadenberieselung die Strahlung weitgehend absorbiert werden kann. Es wurde eine Größenordnung von 2l/m²min ermittelt; für eine Fassadenfläche von 2500 m² und eine nominelle Betriebsdauer von 5 Stunden ergab sich eine Wasserbevorratung von 1500 m³.

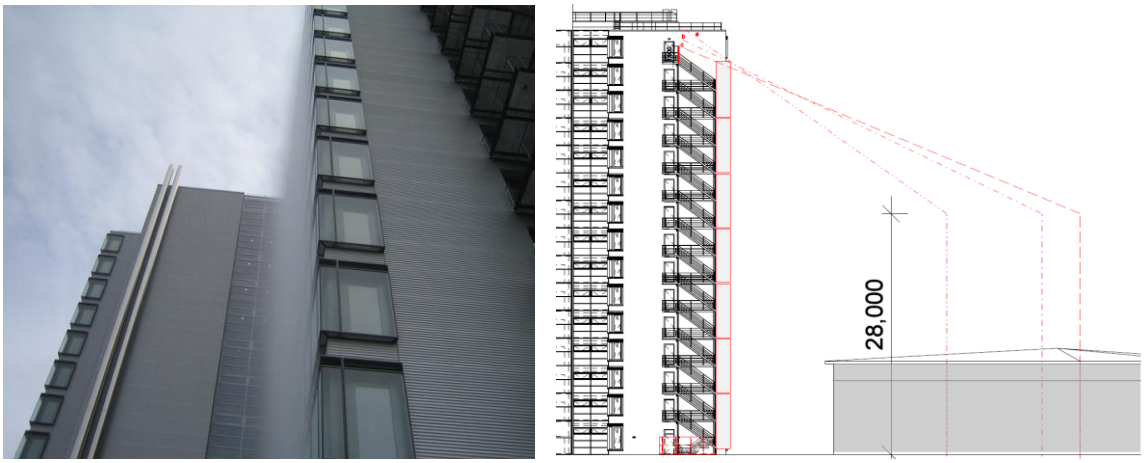


Bild 8 Hochhaus neben Tanklager

Baulicher Strahlenschutz

Beim gleichen Projekt wie oben ging es auch um den tiefergelegenen Ladehof, über den auch Rettungswege führen. Der kleinste Abstand zum Tanklager beträgt 12 m, wofür eine Wärmestrahlung von 19kW/m² anzusetzen war. Unter Berücksichtigung eines höhen- und entfernungsabhängigen Konfigurationsfaktors F* (vgl. Bild 9) wurde als maßgebende Strahlung ca. 4 kW/m² ermittelt. Da auch bei dieser Strahlung die Schmerzgrenze gemäß Literaturangaben im Sekundenbereich erreicht wird, wurde ein Gitterrost als Strahlenschutz vorgesehen.

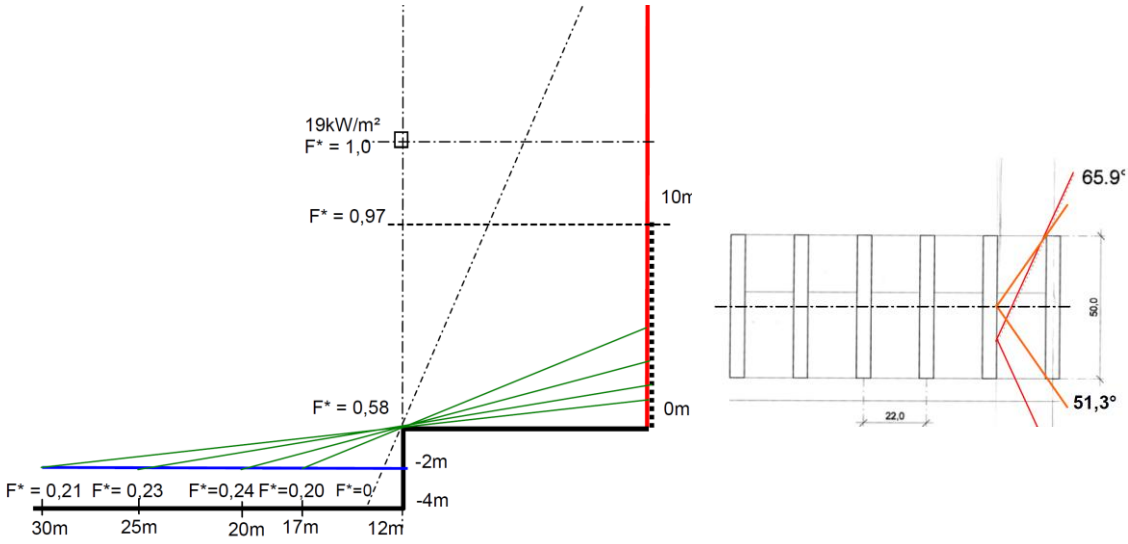


Bild 9 Hofüberdachung mit Gitterrost als Strahlenschutz (Konfigurationsfaktor F und Geometrie des Rostes)*

Die Geometrie des Gitterrostes wurde so bestimmt, dass für den steilsten Einfallwinkel von y = 65,9° keine direkte Strahlung den Rost passiert und dass aufgrund von Reflexionen die Strahlung auf 1,4 kW/m² (Solarkonstante) begrenzt wird.

Gebäudeabstände

Gebäudeabstände sind nicht nur Gegenstand bauaufsichtlicher sondern auch bauplanungsrechtlicher Vorschriften, die in Bebauungsplänen ihren Niederschlag finden. Vorgegebene Abstandsflächen resultieren in der Regel in Gebäudeabstände, die größer sind als zur Verhinderung der Brandausbreitung erforderlich.

Es sind Sonderfälle bei denen im Rahmen des Brandschutzkonzeptes nachgewiesen werden muss, dass eine Brandausbreitung über Gebäudeabstände hinweg nicht zu befürchten ist. Als Beispiel werden zwei Gebäude genannt, ein Hochhaus und ein 7-geschossiges Hotel; im Bebauungsplan wurde versäumt, Gebäudeabstände unter Berücksichtigung der Höhenentwicklung festzulegen oder mit Auflagen (z. B. Sprinklerung auch des Hotels) festzulegen. Eine Sprinklerung der Geschossflächen des Hotels kam für den Bauherrn nicht in Frage.

Gemäß Auflage in der Baugenehmigung sollte nachgewiesen werden, dass bei Vollbrand im Hotel die Sprinkleranlage des Hochhauses nicht unterlaufen wird. Die Auflage wurde dahingehend konkretisiert, dass der Vollbrand drei Geschosse des Hotels umfasst und die Strahlung an der Fassade des Hochhauses gemäß DIN EN 13501-5 auf 12,5 kW/m² begrenzt wird, wobei Löschmaßnahmen nicht in Ansatz gebracht werden durften. Die Abstände der Gebäude gehen aus Bild 10 hervor.

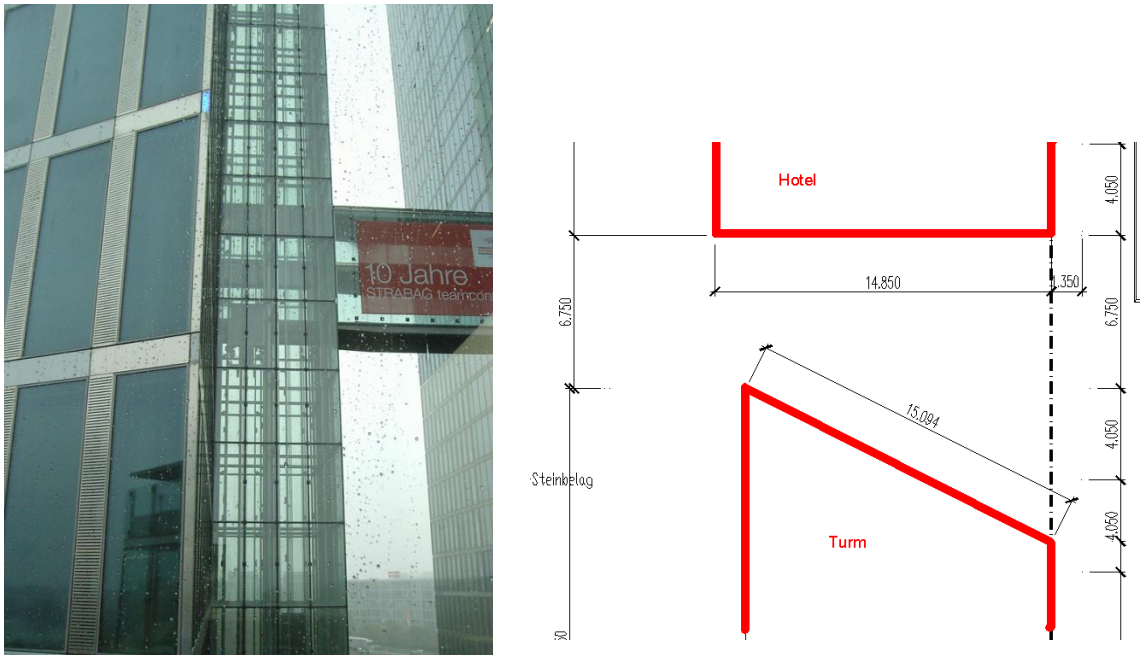


Bild 10 Gebäudeabstände: Hochhaus gegenüber Hotel

Aufgrund von Brandraumberechnungen für die Hotelzimmer gegenüber dem Turm wurden Gastemperaturen bestimmt und als Strahler entsprechend der

Geschossgeometrie angesetzt. Ein Beispiel für die errechneten Strahlungsdichten ist in Bild 11 enthalten; der geforderte Grenzwert konnte für 3 (aber nicht mehr) Brandgeschosse nachgewiesen werden.

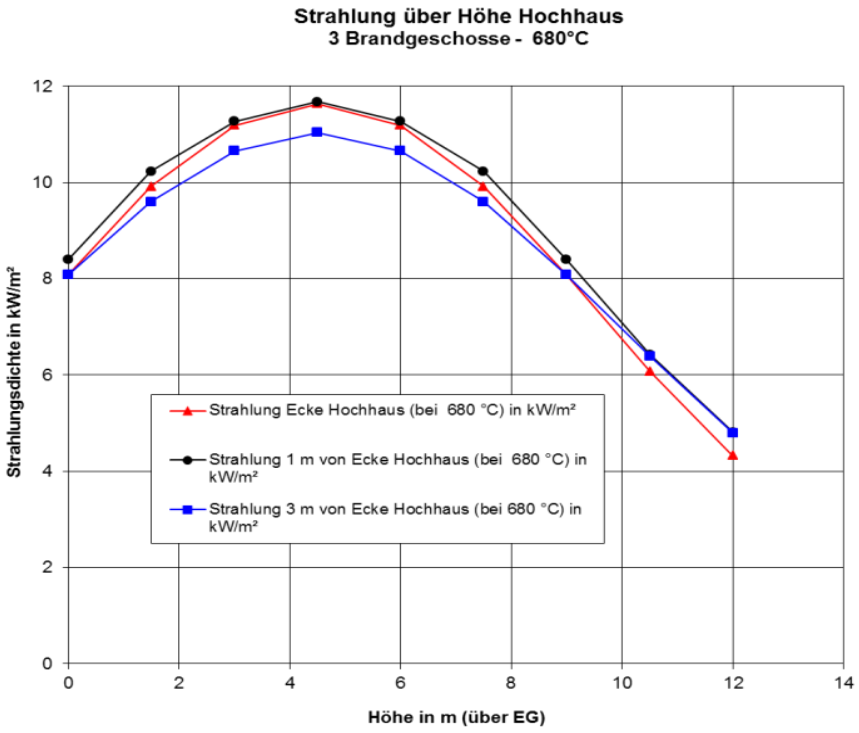


Bild 11 Strahlungsdichten an der Hochhausfassade (U. Max)

Zulässige Flächen

Ein Beispiel für eine mögliche Begleitung von Ingenieurmethoden bei Festlegungen in bauaufsichtlichen Vorschriften sind zulässige Flächen wie sie in der IndBauRL vorgegeben werden. Betrachtet man den Erwartungswert der umgesetzten Brandbelastung $E(Q_B)$ in einem Brandbekämpfungsabschnitt mit der Fläche A und der rechnerischen Brandbelastung q_R erhält man

$$E(Q_B) = p_1(A)\, p_A \cdot A\, q_R \qquad (1)$$

mit $p_1(A)$ der Auftretenswahrscheinlichkeit von Bränden in der Fläche A und p_A der Ausbreitungswahrscheinlichkeit. Als wesentliche Vereinfachung ist die Annahme, dass $p_A \cdot A$ die erwartete Brandfläche unter der Bedingung eines Brandes angibt. Als Schutzziel kann man nun vorgeben, dass der Erwartungswert der umgesetzten Brandbelastung nicht größer sein soll als für eine Referenz-Situation, z. B. ein erdgeschossiges Gebäude ohne besondere Infrastrukturmaßnahmen mit Fläche A_o mit einer rechnerischen Brandbelastung q_{Ro}

Modelliert man die Ausbreitungswahrscheinlichkeit mit

$$p_A = p_{2o} \cdot p_3 \cdot dp_x \cdot p_B \qquad (2)$$

p_{2o} Ausbreitungswahrscheinlichkeit für die Referenz-Situation – gleichbedeutend mit der Wahrscheinlichkeit, dass es in der Referenz-Situation nicht gelingt, den Brand wirksam zu begrenzen,

p_3 Veränderung gegenüber p_{2o} entsprechend der Infrastruktur

dp_x Veränderung gegenüber p_{2o} aufgrund von – gegenüber der Referenz-Situation – geänderten Einflussgrößen/Gegebenheiten, für voneinander unabhängige Einflüsse gilt: $dp_x = \Pi dp_{xi}$.

p_B Ausbreitungswahrscheinlichkeit über Barrieren innerhalb der Fläche A, z. B. Geschossdecken, hinweg.

Vergleicht man nun den Erwartungswert für die Referenz-Situation (Index o) mit den Erwartungswerten für andere Situationen, wird bei Annahme einer linearen Auftretenswahrscheinlichkeit $p_1(A) \approx A$

$$A\sqrt{p_B} \le A_o \cdot \sqrt{\frac{q_{Ro}}{q_R}}\sqrt{\frac{1}{p_3}}\sqrt{\frac{1}{dp_x}} \tag{3}$$

Man kann z. B. zeigen, dass für $dp_x = f(q) = q_R/q_{Ro}$ eine Flächenvergrößerung entsprechend $q_{Ro}/q_R \approx 90/t_{äo}$ möglich ist – entsprechend dem bisherigen Faktor F1 der IndBauRL für $t_ä > 30$ Minuten. Für $t_ä < 30$ Minuten wird der Einfluss eben bauaufsichtlich begrenzt.

Man kann weiterhin zeigen, dass für 2 Geschosse mit $A_i = 0{,}5 \cdot A$ und sonst gleichen Gegebenheiten

$$p_B = 0{,}5\left(1 + \frac{\psi_{1,2} + \psi_{2,1}}{2}\right) \tag{4}$$

wobei $\psi_{1,2}$ die Ausbreitung von unten nach oben und $\psi_{2,1}$ von oben nach unten charakterisiert (ψ=1 bedeutet Ausbreitung wie in der Ebene). Man kann schließlich zeigen, dass die Flächenbegrenzung gemäß dem derzeitigen Entwurf der IndBauRL

$$A_{bew} = \sum F_{Ai} \cdot A_i \quad \text{mit } F_{A1} = 1{,}0 \text{ und } F_{A2} = \sqrt{4 \cdot p_B} - 1 \tag{5}$$

auch für n>2 eine brauchbare Näherung liefert [13].

ZUSAMMENFASSUNG

In den letzten Jahrzehnten wurden Fortschritte bei den Ingenieurmethoden erzielt und zwar

- für die Erstellung von Bemessungshilfen
- für direkte Anwendungen bei kleinen und großen Fragestellungen

und, wenn auch erst in geringfügigen Anfängen, unterstützend bei der Festlegung bauaufsichtlicher Anforderungen.

Einschränkend muss jedoch angeführt werden, dass wesentliche Probleme unseres Ingenieuralltags noch lange nicht mit Ingenieurmethoden und leistungsorientierten Konzepten gelöst werden können. Das ist zum einen das Thema der Verwendbarkeitsnachweise und zum anderen (teilweise mit den Nachweisen zusammenhängend) die Qualität der Bauausführung.

Zulassungen für Kabelabschottungen mit 35 Seiten sind auf der Baustelle nicht handhabbar. Hier würde man sich zumindest einen verbesserten logischen Aufbau der Nachweise wünschen indem – z. B. ausgehend von der LAR – die zusätzlichen Möglichkeiten und die dabei zu beachtenden Einschränkungen systematisch aufgezeigt werden. Das wäre keine Ingenieurmethode aber eine wichtige Ingenieuraufgabe.

LITERATUR

[1] Ingberg S.: Tests of the Severity of Building Fires. Q. Natl. Fire Prot. Assoc. 22 (1928), 43-61

[2] SPFE Handbook of Fire Protection Engineering; Society of Fire Protevtion Engineers, 4. edition, 2008

[3] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 2. Auflage. D. Hosser (Hrsg.), vfdb Technischer Bericht TB 04-01, Mai 2009

[4] Schneider, U., Kolb, T., Lebeda, C., Max, U., Mehl, F. (Hrsg.): Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz, 6. Auflage; expert verlag, ISBN: 978-3-8169-3014-3

[5] Bub, H., et al.: Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven baulichen Brandschutz. In: Baulicher Brandschutz im Industriebau, Beuth Verlag Berlin-Köln, Ausgabe 1979

[6] Bub, H., Hosser, D., Kersken, M., Schneider, U.: Eine Auslegungssystematik für den baulichen Brandschutz. Brandschutz im Bauwesen, Heft 4, E. Schmidt Verlag, Berlin, 1983

[7] DIN EN 1991-1-2: 2010-12 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; mit Nationalem Anhang – National festgelegte Parameter

[8] F. ENGLERT. München (Hrsg.): J. Lindauer‘sche Buchhandlung 1895; Fundstelle: Ahnert R., Krause, I.: Typische Baukonstruktionen, Verlag Bauwesen

[9] Schneider, U., Kersken-Bradley, M., Kirchberger, H.: Brandschutz im Industriebau. In: Bauphysik Kalender 2011 - Brandschutz, N. Fouad (Hrsg.); Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2011, ISBN: 978-3-433-02965-7, S. 213 - 270

[10] Rogsch, Ch.: Vergleichende Untersuchungen zur dynamischen Simulation von Personenströmen; Diplomarbeit Berg. Universität Wuppertal, 2006

[11] Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, Ch., Seyfried, A.: Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications (in der Internet Fassung)

[12] Kersken-Bradley, M., Waldau, N., Hoffmann, T.: Berechnung von Entleerungszeiten für Fallbeispiele, Forschungsbericht für das DIBt, Berlin 2006, Nr. ZP 52-5-4.162-12114/05

[13] Kersken-Bradley, M. Brandabschnittsflächen im Industriebau, vfdb-Zeitschrift Jg. 59, Nr. 2, Seite 84-91

TRAGWERKSBEMESSUNG IM BRANDFALL NACH EUROCODES – CHANCEN UND GRENZEN

Peter Schaumann und Jörg Sothmann
Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover

EINLEITUNG

Im Dezember 2010 hat die Fachkommission Bautechnik in den Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik [5] bekannt gegeben, wie der Übergang von den bestehenden nationalen Baubestimmungen zu den Eurocodes erfolgen soll. Dies wurde in den verschiedenen Beiträgen auf den letzten Braunschweiger Brandschutz-Tagen angekündigt [3], [4], [5]. Im Kern geht es um eine Übergangsphase, während der die Eurocodes ab 1. Januar 2011 angewendet werden dürfen, ohne dass sie über die Liste der Technischen Baubestimmungen in den Bundesländern eingeführt worden sind. Letzteres soll nach heutigen Vorstellungen dann bis zum 1.Juli 2012 erfolgen.

In diesem Kontext hat die Fachkommission auch beschrieben, wie mit den Anhängen zur brandschutztechnischen Bemessung von Bauteilen zu verfahren ist. Neu gegenüber den bisherigen Regeln auf der Grundlage der ENV-Fassungen der Eurocodes für den Brandfall ist dabei, dass nun auch die Regelungen zu den Einwirkungen im Brandfall (Eurocode 1) anwendbar sind und dass die allgemeinen Berechnungsverfahren (Level 3 Verfahren, numerische Simulation) für die Bauteile als allgemein anerkannte und anwendbare Nachweisverfahren akzeptiert sind.

Den Bauherren, Planern und Genehmigungsbehörden stellt sich daher die Frage, ob bei den brandschutztechnischen Nachweisen von Bauteilen nun alles auf rechnerischem Wege und im normalen Genehmigungsweg, das heißt ohne die Einbeziehung von Sachverständigen und Zulassungen im Einzelfall, möglich ist.

Immerhin ermöglichen die Eurocodes nicht nur den rechnerischen Nachweis einzelner Bauteile (Stützen, Träger, Wände oder Decken) in Form von berechenbaren Feuerwiderstandsdauern unter Normbrand, sondern sie eröffnen auch den Weg zu Berechnungen des Gesamttragwerks oder von Teiltragwerken.

Dieser Weg wurde beispielsweise auf den Braunschweiger Brandschutz-Tagen 2005 in einer eigenen Sitzung thematisiert [9]. Dort wurde eingebettet in die Darlegung des gesamten Brandschutzkonzeptes für ein Hörsaal- und Verwaltungsgebäude (Bild 1) nach dem vfdb-Leitfaden [10] auch der Tragsicherheitsnachweis eines stählernen Rahmens auf der Grundlage einer Finiten-Element-Methode-Simulation (FEM-Simulation) dargestellt, wobei die Temperaturbeanspruchung aus einer Brandsimulation mit einem Feldmodell (CFD) stammte. Ist dieser damals skizzierte Nachweis nunmehr als Nachweis im normalen bauaufsichtlichen Verfahren denkbar?

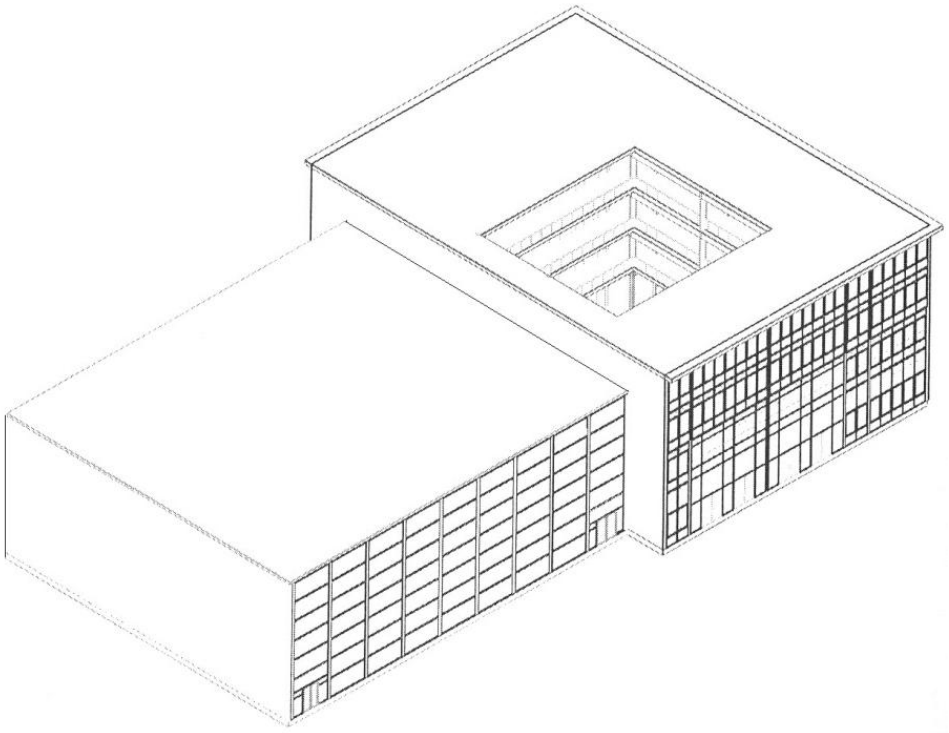


Bild 1 Ansicht Hörsaal- und Verwaltungsgebäude nach [9]

Dieser Frage und der Frage nach den Chancen und Grenzen, die die Anwendbarkeit der Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung bietet, widmet sich der folgende Beitrag.

AKTUELLE SITUATION

Für die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen und Bauwerken des konstruktiven Ingenieurbaus sind als europäisch harmonisierte technische Regeln die Normen nach Tabelle 1 anwendbar. Die Fachkommission Bautechnik hat in [5] formuliert, dass keine Bedenken bestehen, die Normen nach § 3 Abs. 3 Satz 3 Musterbauordnung als *gleichwertige Lösung* abweichend von den korrespondierenden Technischen Baubestimmungen anzuwenden. In diesem Beitrag werden diese Normen entweder kurz als Eurocode 1 usw. ohne detaillierten Literaturverweis zitiert.

Dem aufmerksamen Leser wird auffallen, dass in der Liste der Mauerwerksbau (Eurocode 6) und die Aluminiumtragwerke (Eurocode 9) fehlen. Ursache dafür sind zeitliche Verzögerungen in der Bearbeitung oder der Konsensfindung. Die Teile werden, so sie denn vorliegen, zu dem geplanten Einführungstermin Mitte 2012 hinzugefügt werden können.

Die Fachkommission hat die Anwendung der Eurocode-Brandschutzteile laut Tabelle 1 unter einige Vorbehalte gestellt und hat auch Einschränkungen vorgenommen. Diese werden im Folgenden skizziert.

Tabelle 1 Übersicht über die anwendbaren Eurocode-Brandschutzteile mit Nationalem Anhang

DIN-Norm	Deutscher Titel
DIN EN 1991-1-2: 2010-12 DIN EN 1991-1-2:NA*)	Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke Nationaler Anhang
DIN EN 1992-1-2: 2010-12 DIN EN 1992-1-2:NA*)	Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall Nationaler Anhang
DIN EN 1993-1-2: 2010-12 DIN EN 1993-1-2:NA*)	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall Nationaler Anhang
DIN EN 1994-1-2: 2010-12 DIN EN 1994-1-2:NA*)	Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton- Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall Nationaler Anhang
DIN EN 1995-1-2: 2010-12 DIN EN 1995-1-2:NA*)	Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall Nationaler Anhang

*) Die o. g. nationalen Anhänge wurden im Dezember 2010 veröffentlicht

Zu Eurocode 1 heißt es [5]: „Naturbrandmodelle nach Abschnitt 3.3 der DIN EN 1992-1-2 sind von der Anwendung *als gleichwertige technische Lösung* nach § 3 Abs. 3 Satz 3 MBO *ausgenommen***“**. Formal sind damit alle Anwendungen der „heißen“ Eurocodes auf die Normbrandbedingungen (Einheits-Temperaturzeitkurve, ETK) beschränkt. Aus Sicht des Verfassers bedeutet das bis auf wenige Ausnahmen gleichzeitig eine Beschränkung auf Einzelbauteile, denn die Berechnung von Teil- oder Gesamttragwerken ist meist nur dann sinnvoll, wenn abweichend von der ETK auch reale Brandszenarien angesetzt werden. Derartige Betrachtungen sind im allgemeinen Genehmigungsverfahren vorerst ausgenommen. Sie sind gleichwohl auf dem Wege der Abweichung und insbesondere für Sonderbauten unter Einbeziehung von Sachverständigen möglich; hierzu mehr im Kapitel „Einwirkungen“.

Damit ist die eingangs gestellte Frage im Zusammenhang mit dem Hörsaal- und Verwaltungsgebäude beantwortet: Die CFD-Berechnung wird nur auf dem Wege der Abweichung akzeptiert. Die FEM-Tragstrukturberechnung ist im Allgemeinen unter ETK-Beanspruchung durchzuführen und es sind Feuerwider-

standsklassen nach Sonderbauverordnung (wegen des Hörsaals) nachzuweisen.

Hinsichtlich der Tragsicherheitsnachweise im Brandfall verweist die Fachkommission Bauaufischt nicht ausschließlich auf die Brandschutzteile der Eurocodes sondern auch auf die DIN 4102-4 oder -22; dies insbesondere für spezielle Ausbildungen (z. B. Anschlüsse, Fugen etc.). Über den aktuellen Stand der DIN 4104-4 wird auf dieser Veranstaltung in einem separaten Beitrag berichtet.

Kann nun jeder Tragwerksplaner oder Prüfingenieur mit den Brandschutzteilen des Eurocodes arbeiten? Die Antwort auf diese Frage lautet: „Im Prinzip ja“. Die Fachkommission Bautechnik hat hier keine inhaltlichen Einschränkungen auf der Nachweisseite, d.h. in den „materialbezogenen“ Teilen der Brandschutz-Eurocodes 2 bis 5, formuliert. Es werden jedoch Anforderungen an die Qualifikation der tätigen Fachplaner und Prüfer gestellt. Diese beziehen sich insbesondere auf die Anwendung der allgemeinen Rechenverfahren.

Dazu wird zunächst noch einmal kurz erläutert, was darunter nach den Eurocodes zu verstehen ist. In den Eurocodes 2 bis 4 sind dazu weitgehend wortgleiche Regelungen in den Abschnitten 4.4 der Brandschutzteile enthalten. Darin heißt es: “Allgemeine Rechenverfahren müssen eine wirklichkeitsnahe Berechnung brandbeanspruchter Tragwerkeermöglichen. Sie müssen grundlegend auf dem physikalischen Verhalten aufbauen und zu einer zuverlässigen Abschätzung des erwarteten Brandverhaltens der maßgebenden Teiltragwerke führen.“ Im Weiteren wird dann angeführt, dass diese Verfahren üblicherweise die Temperaturfeldberechnung und die Berechnung des mechanischen Strukturverhaltens unter erhöhten Temperaturen beinhalten. Dazu werden heute in der Regel Finite-Element-Methoden (FEM) verwendet.

Sehr interessant ist der Hinweis darauf, dass allgemeine Rechenverfahren nach den Eurocodes in Verbindung mit beliebigen Brandraumtemperatur-Zeitkurven verwendet werden können. Dies allerdings unter der Voraussetzung, dass die Materialeigenschaften für den maßgebenden Temperaturbereich und die Erwärmungsgeschwindigkeiten bekannt sind. Da die Materialeigenschaften im Eurocode in der Regel lediglich für ETK-Bedingungen gelten, sind diese Voraussetzungen also nicht erfüllt. Hier besteht Forschungsbedarf. Dies ist ein möglicher Grund dafür, dass die Fachkommission Bautechnik die allgemeine Anwendung von Naturbränden ausgeschlossen hat.

In der Veröffentlichung der Fachkommission [5] wird festgestellt, dass die Prüfer der Bemessung von Bauteilen und Tragwerken unter Brandeinwirkung bei prüf- oder bescheinigungspflichtigen Bauvorhaben bereits Erfahrungen mit der Prüfung/Bescheinigung derartiger Nachweise haben oder an einschlägigen Fortbildungsveranstaltungen im Brandschutz teilgenommen haben sollten, wenn allgemeine Rechenverfahren zur Bemessung angewendet werden. Auf der Seite der Fachplaner müssen die allgemeinen Rechenverfahren nach DIN Eurocode 1/NA, Anhang CC vom Ersteller des Rechenprogramms validiert werden. Die Dokumentation der Validierung ist dem Prüfer vorzulegen. Damit definiert die

Fachkommission für die Anwendung der allgemeinen Berechnungsverfahren Qualifikationsnachweise sowohl auf der Fachplaner- wie auf der Prüferseite. Bei den Fachplanern beziehen sich die Nachweise allerdings nicht auf den Fachplaner selbst, sondern auf die verwendeten Rechenprogramme.

Auf einige spezielle Aspekte der Bauteilberechnung im Brandfall wird in dem Kapitel „Bauteilbemessung“ eingegangen.

EINWIRKUNGEN

Die thermische Einwirkung auf Bauteile im Brandfall wird den Erläuterungen der Fachkommission Bautechnik folgend durch die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) definiert. Abweichungen von der ETK sind im Industriebau und im Gutachterverfahren möglich. Die Eurocodes bieten prinzipiell die Möglichkeit sogenannte Naturbrandszenarien anzusetzen und mit diesen Brandszenarien die Bauteile mit allgemeinen Rechenverfahren nachzuweisen. Je nach Brandlast und Ventilationsbedingungen liegt hier Potenzial um Bauteile, die nach ETK-Forderung als nicht widerstandfähig einzustufen sind, nachzuweisen. Ebenso bietet sich mit den Eurocodes die Möglichkeit brandschutztechnische Infrastruktur in den Ansatz zubringen. Sprinkler, Brandmeldeanlagen oder z.B. Werkfeuerwehren können auf der Grundlage wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen mit konkreten Zahlenwerten erfasst werden. Eine einheitliche Bewertung der brandschutztechnischen Infrastruktur ist somit gewährleistet. All dies ist im Sicherheitskonzept des Nationalen Anhangs (NA) zu Eurocode 1 verankert.

Aufbauend auf diesem Sicherheitskonzept wurden in einem gemeinsamen Forschungsvorhaben des Institutes für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover und des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig unterschiedliche Gebäude betrachtet. Detailliertere Informationen zu dem Forschungsprojekt können [11] entnommen werden.

Eines der Gebäude war ein offenes oberirdisches Parkhaus. Bei solchen Parkhäusern gibt es in Deutschland die allgemeine Regelung, dass die tragenden Bauteile zwar nicht brennbar sein müssen, weitergehende Anforderungen an den Feuerwiderstand aber nicht gestellt werden. Europaweit und auch bei einem Nachweis mit allgemeinen Rechenverfahren in Deutschland stellt sich Frage nach dem Brandszenario in einem Parkhaus. Basierend auf dieser bauaufsichtlichen Forderung „nicht brennbar“ wird in dem Projekt für die Tragwerksbemessung ein äquivalenter Naturbrand hergeleitet. Somit kann ein Brandszenario bestimmt werden, das den geltenden bauaufsichtlichen Anforderungen in Deutschland äquivalent ist. Für das betrachtete Parkhaus konnte gezeigt werden, dass zwei, gleichzeitig brennende PKW dieses Szenario darstellen. Dabei werden die Konventionen des Sicherheitskonzeptes aus dem Nationalen Anhang (NA) zu Eurocode 1 berücksichtigt. In Bild 2 sind die Wärmefreisetzungsraten für die zwei brennenden PKW nach dem Sicherheitskonzept und für drei brennende PKW nach [12] zu sehen.

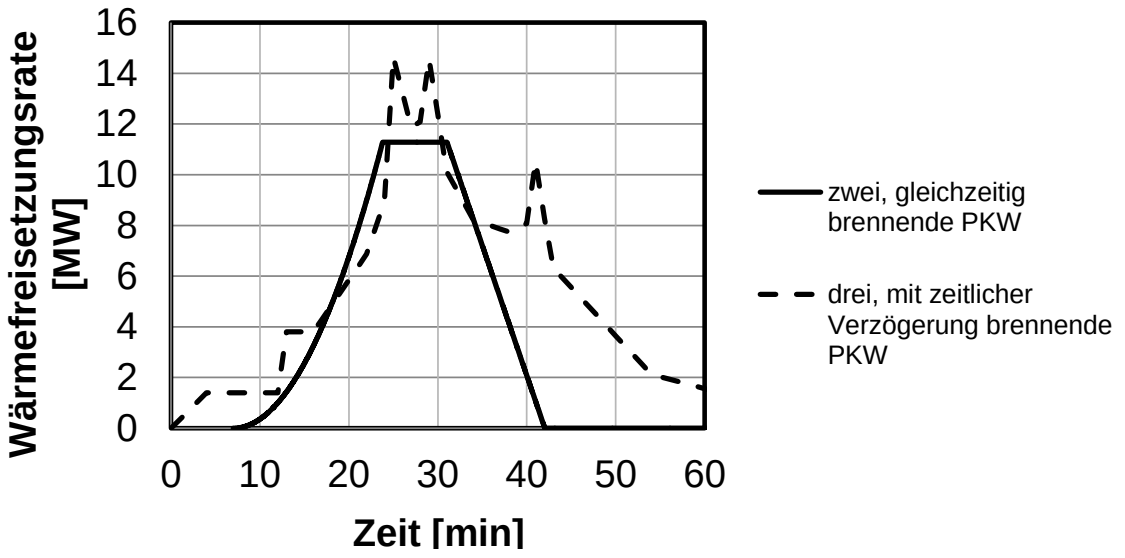


Bild 2 *Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsraten; rechnerischer Ansatz (-----) / Versuch (- - - -)*

Die beiden Kurven zeigen sowohl vom zeitlichen als auch vom Betrag der Wärmefreisetzungsrate einen ähnlichen Verlauf. Die Ausnahme bildet der abklingende Brand. Da dieser Bereich für die Bauteilbemessung meist von geringer Bedeutung ist, kann von einer guten Wiedergabe des Brandes unter Einhaltung von Sicherheiten ausgegangen werden.

Für die Verallgemeinerung auf alle Parkhäuser sind zwar noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich, als Basis für eine europaweit einheitliche Regelungen scheinen die Forschungsergebnisse jedoch bereits geeignet.

Weiterhin wurde in dem Forschungsprojekt ein Bürogebäude betrachtet. Die bauaufsichtliche Forderung an die Tragglieder lautet Feuerwiderstandsklasse F30. Der Temperaturverlauf der ETK bis zur 30sten Minute und die Heißgastemperaturen der vereinfachten Naturbrandkurven aus dem NA zu Eurocode 1sind in Bild 3 vergleichend gegenübergestellt.

Es wird anhand der maximalen Temperatur des Brandes deutlich, dass die Naturbrandkurve unter Berücksichtigung einer Brandmeldeanlage (BMA) nach dem Sicherheitskonzept ähnliche Anforderungen an die Konstruktion stellt wie die ETK. Dies spiegelt sich auch bei der Nachweisführung der Verbundträger des Bürogebäudes wider. Dabei wird ein ungeschützter HEB220-Träger mit einer 16 cm dicken Betonplatte betrachtet. Sowohl bei der thermischen Einwirkung ETK als auch bei dem Naturbrand unter Berücksichtigung der BMA versagt der Träger, der somit keiner Feuerwiderstandsklasse zugeordnet werden kann. Wird hingegen der Naturbrand unter Berücksichtigung von Sprinklern betrachtet, kann gezeigt werden, dass der Träger während des gesamten Brandverlaufes die mechanischen Einwirkungen abtragen kann. In diesem Beispiel bewirkt die Berücksichtigung von Sprinklern also eine Reduzierung der Feuerwiderstandsklasse von F 30 auf keine Anforderung.

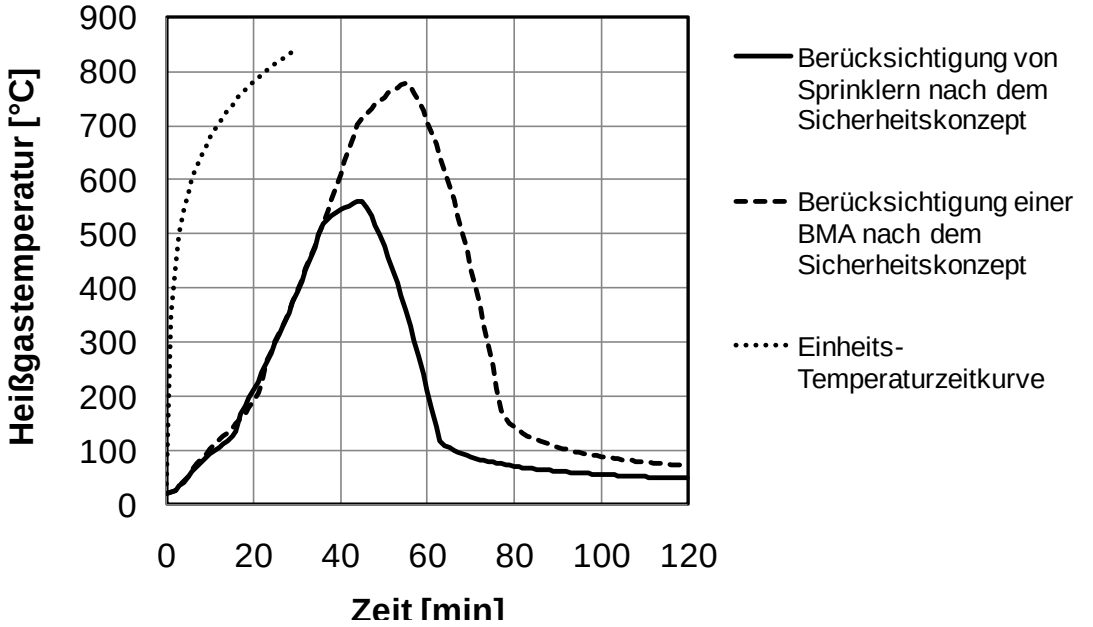


Bild 3 Heißgastemperaturverlauf bei der Anwendung der vereinfachten Naturbrandkurven und die Einheits-Temperaturzeitkurve im Vergleich

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Naturbrände als realistische Brandszenarien eine Chance darstellen, Bauteile bei definiertem Sicherheitsniveau wirtschaftlicher zu bemessen. Die Spielregeln für die Nutzung dieser Chance sind jedoch noch festzulegen. Solange werden hier nicht nur in Deutschland von Seiten der Bauaufsicht Grenzen gesetzt.

BAUTEILBEMESSUNG

Der Verfasser hat in den vergangenen Jahre regelmäßig auf den Braunschweiger Brandschutz-Tagen über die Normenentwicklung bei den Brandschutznachweisen im Stahl- und Verbundbau berichtet [1], [2]. Daher ist es verständlich, wenn an dieser Stelle insbesondere auf einige Details der brandschutztechnischen Bemessung von Stahl-und Verbundbauteilen eingegangen wird.

Stahlbauteile

Bei Stahlbauteilen geht es insbesondere um die Erwärmung im Brandfall. Lediglich bei geringen Anforderungen bis etwa F 30 und bei gleichzeitig hoher Massigkeit der Bauteile (kleiner Profilfaktor) gelingt es rechnerisch nachzuweisen, dass die kritische Stahltemperatur, bei der Versagen einträte, bis zur geforderten Feuerwiderstandsdauer nicht erreicht werden. In den meisten Fällen sind Brandschutzbekleidungen anzuordnen, um die Erwärmung zu verzögern. Bis auf wenige Ausnahmen, die im Nationalen Anhang zu Eurocode 3 angegeben sind, gibt es jedoch keine Materialparameter, mit denen im bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahren rechtssicher agiert werden kann. Das gilt in besonderem Maße für die dämmschichtbildenden Anstriche(s. Bild 4).

Bild 4 Aufschäumender Dämmschichtbildner im Brandversuch

Daher sind im Eurocode 3 zwar die rechnerischen Grundlagen für die Berechnung der Temperaturerhöhung gegeben, bei der Anwendung fehlt es aber an entsprechenden Materialdaten. Diese müssten von den Herstellern der Bekleidungen zur Verfügung gestellt und durch Prüfzeugnisse legitimiert werden.

Schubtragfähigkeit von Verbunddecken

Beim Verbundbau ist mit der jetzigen Fassung des Eurocode 4 ein vereinfachtes Nachweisverfahren für Verbunddecken eingeführt worden, das auch die Tragfähigkeit des Bleches bis zu einem Grade bei der Ermittlung der Biegemomententragfähigkeit im Brandfall berücksichtigt. Das kann insbesondere bei hinterschnittenen Profilen (s. Bild 5, links) interessant sein, weil die Erwärmung durch die Profilform günstig beeinflusst wird. Wenn diese Blechteile an der Biegetragwirkung beteiligt werden sollen, ist konsequenterweise ein Nachweis der Längsschubtragfähigkeit auch für den Brandfall zu erbringen. Dafür sind in der Norm und auch in den Zulassungen keine Angaben enthalten. Hier besteht ebenfalls Forschungsbedarf. Eine Anwendung allgemeiner Berechnungsverfahren hilft hier nicht ab, da die erforderlichen Grenzwerte der Längsschubspannungen bereits unter Normaltemperaturbedingungen experimentell ermittelt werden.

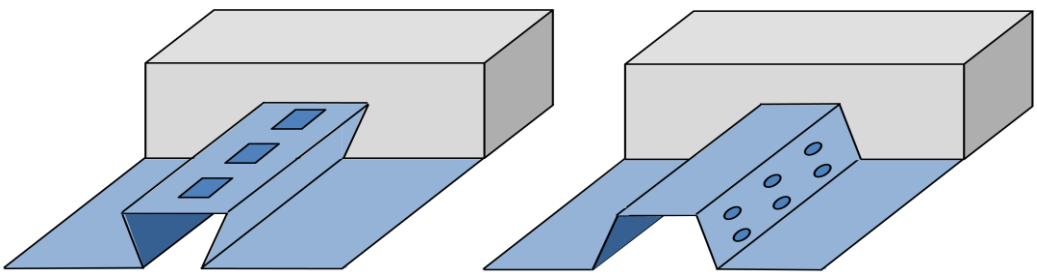


Bild 5 Verbunddecken mit hinterschnittenem (links) und offenem Profil (rechts)

Verbundstützen mit Einstellprofil

Durch die allgemeinen Rechenverfahren wird die Möglichkeit gegeben, Bauteile virtuell im Computer z.B. unter ETK-Brandbeanspruchung zu prüfen. Kostenintensive Brandversuche können weitgehend entfallen. Ein gutes Beispiel hierfür sind Verbundstützen. Eine Vielzahl von Verbundstützen ist bereits in dem Eurocode 4geregelt. Da aber immer schlankere Bauteile gefordert werden, wird dazu übergegangen, massige Einstellprofile (s. Bild 6) zu nutzen. Stützen mit solchen Querschnitten werden im Eurocode 4 nicht mit Tabellen oder vereinfachten Berechnungsverfahren behandelt.

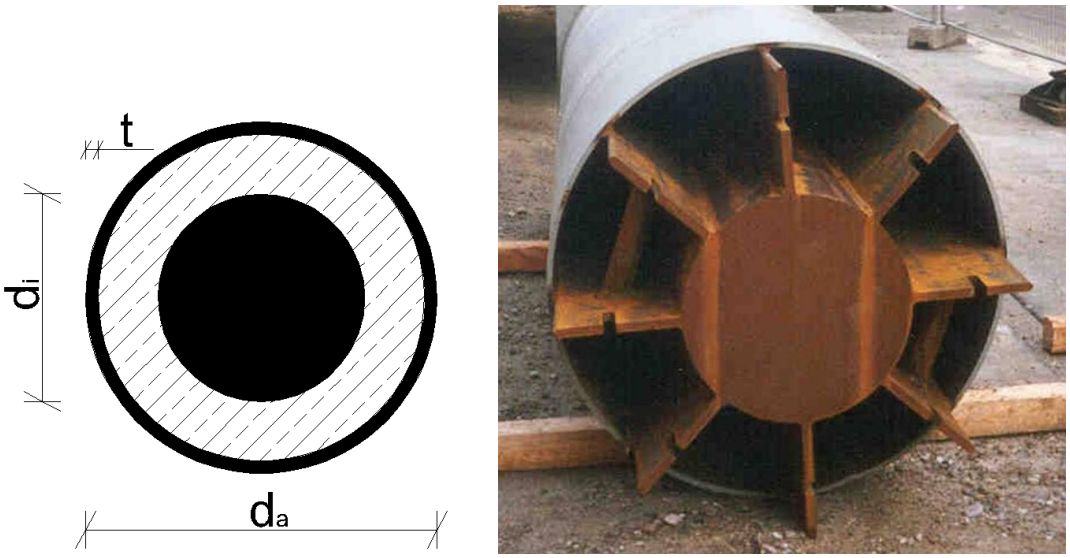


Bild 6 *Beispiel eines Verbundstützenquerschnittes mit Einstellprofil Anwendung NordLB Verwaltung in Hannover*

Eine Zuweisung zu einer Feuerwiderstandklasse ist mit einfachen Mitteln nicht möglich. Mit den allgemeinen Rechenverfahren ergibt sich nun die Chance, solche Stützenquerschnitte nachzuweisen.

Hierfür sollte mit einem validierten Programm die Traglast ermittelt werden. Das Programm kann anhand von Versuchen oder mittels des Anhangs CC des Nationalen Anhang zu Eurocode 1 validiert werden. Im Rahmen des bauaufsichtlichen Genehmigungsverfahrens wären die Berechnungsergebnisse durch einen Prüfingenieur/Prüfsachverständigen oder ein Prüfamt für Standsicherheit zu prüfen. Diese sollten über die oben angesprochene Qualifikation verfügen.

Aufgrund dieser neuen Möglichkeiten haben bereits einige Softwareherstel-ler,wie Infograph (http://www.infograph.de/produkte/brand.htm), ihre Softwarepakete um die Bemessung von Bauteilen im Brandfall ergänzt. Aber auch bereits existierende Softwarelösungen wie Safir (http://www.argenco.ulg.ac.be/logiciels/SAFIR/), Vulcan (http://www.vulcan-solutions.com/index.html) und die allgemeinen Finite-Element-Programme wie Abaqus und Ansys sind hier ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu nennen.

GESAMT- UND TEILTRAGWERKE

Eine der großen Neuerungen der Eurocodes gegenüber den traditionellen, nationalen Brandschutznormen ist die Möglichkeit des Nachweises von Teil- und Gesamttragwerken. Im Nationalen Anhang zu Eurocode 4steht zu der Anwendung derartiger Berechnungsverfahren folgende Angabe:

„Sofern zur brandschutztechnischen Bewertung von Tragwerken oder Teiltragwerken mit allgemeinen Rechenverfahren Rechenprogramme verwendet werden, wird davon ausgegangen, dass diese validiert sind. Der Anhang CC des nationalen Anhangs von Eurocode 1-1-2 gibt geeignete Beispiele für das Validierungsverfahren."

Da die angegebenen Validierungsbeispiele ausschließlich auf einzelne Bauteile bezogen sind, eignen sich diese nicht zur Validierung von allgemeinen Rechenmethoden für die Berechnung von Gesamttragsystemen. Für Rechenmodelle dieser Größenordnung bestehen daher derzeit keine normativen Vorgaben, auf die sich eine solche Berechnung stützen könnte. Daher ist nach Auffassung der Verfasser selbst bei Zugrundelegung der ETK im Einzelfall über die Möglichkeit des Nachweises zu entscheiden.

Aufgrund fehlender normativer Vorgaben ist die Umsetzung dieser formal erlaubten Vorgehensweise einerseits sehr aufwendig und andererseits auch angreifbar. So stellt sich bereits zu Beginn einer Simulation die Frage nach der maßgebenden mechanischen und thermischen Beanspruchung, da ein Brand in einem Abschnitt möglicherweise kritischer ist als ein Vollbrand.

Weiterhin muss bei der Simulation eines Gesamttragwerkes der Einfluss der Verbindungselemente berücksichtigt werden. Die Interaktion der einzelnen Bauteile ist dabei im Brandfall nicht immer gleich der Interaktion bei Raumtemperatur. Beispielsweise kann ein momententragfähiger Anschluss im Brandfall vorzeitig versagen, da seine Rotationskapazität erreicht ist. Andererseits kann ein bei Raumtemperatur als gelenkig bemessener Fahnenblechanschluss nach einer gewissen Rotation oder durch thermische Dehnungen der anschließenden Träger durchaus eine Momententragfähigkeit entwickeln, sobald sich dessen Unterflansch an die Stütze anlegt.

Um die Effekte des Anschlussverhaltens im Brandfall besser vorhersagen zu können, wird derzeit vom Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover gemeinsam mit der TU Darmstadt ein AiF-Forschungsprojekt zu diesem Thema durchgeführt. In diesem Rahmen werden vor allem Kopfplatten- und Fahnenblechanschlüsse im Stahl- und Verbundbau untersucht. Als Ziel ist angestrebt, Momenten-Rotations-Beziehungen für verschiedene Anschlussvarianten zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb eines Brandes aufstellen zu können. Zum Erreichen dieses Ziels werden derzeit thermische und mechanische numerische Modelle von realistischen Anschlusssituationen ausgearbeitet, auf deren Basis vereinfachte Rechenmodelle entwickelt werden können. Weiterhin wurden im

Rahmen des Projektes zur Validierung zwei Brandversuche an der MPA Braunschweig durchgeführt.

Um ein realitätsnahes Temperaturfeld innerhalb des Anschlusses zu erzeugen, wurde der Anschluss mit einem reaktiven Brandschutzanstrich versehen. Bild 7 zeigt den Anschluss vor und nach dem Brandversuch. Ergebnisse der Versuche und der zugehörige Forschungsprojekt werden in Kürze veröffentlicht.

Bild 7 Anschlussdetail vor dem Versuch (links) und nach dem Versuch (rechts)

Es bleibt festzuhalten, dass sich Anschlüsse im Brandfall durchaus anders verhalten können als bei Raumtemperatur. Da dieses Verhalten bis dato noch nicht ausreichend erforscht ist, sind Berechnungen von Teil- und Gesamttragwerken derzeit noch im Bereich der Forschung anzusiedeln.

Unter der Voraussetzung, dass die Anschlussdetails von untergeordneter Bedeutung für das Tragwerk im Brandfall sind, bietet die Betrachtung von Gesamt- oder Teiltragwerken durchaus Vorteile. So kann der Ausfall einzelner Bauteile durch Lastumlagerung und einen Wechsel des Tragsystems kompensiert werden. Dieser Tatsache wird sich bei der sogenannten Membrantragwirkung im Brandfall bedient. Bei Verbunddecken-Träger-Systemen können bewusst Stahlträger ohne Brandschutzbekleidung ausgeführt werden. Diese erwärmen sich im Brandfall schnell und verlieren ihre Tragfähigkeit. Dadurch und durch den thermischen Gradienten biegt sich die Decke stark durch und bildet eine Zugmembran aus (siehe Bild 8). Diese Zugmembran steht im Gleichgewicht mit einem Druckring.

Trotz der geringeren Brandschutzmaßnahmen ergibt sich keine geringere Feuerwiderstandsdauer für das System. Hierbei müssen jedoch Randbedingungen eingehalten werden (Genaueres siehe [13]). Dieser positive Effekt ergibt sich aus der Betrachtung des Teiltragwerks.

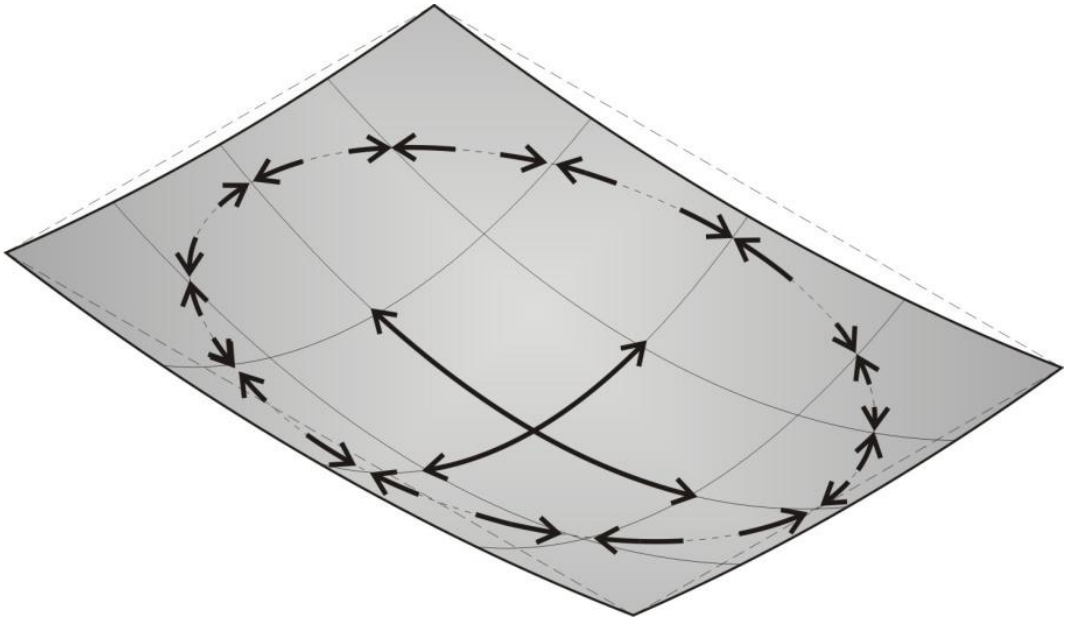


Bild 8 Prinzipskizze der Membranwirkung

Bei der Betrachtung eines Teiltragwerks oder gar eines Gesamttragwerks stellt sich immer die Frage nach dem Brandszenario. Ist es wirklich angemessen davon auszugehen, dass z.B. über eine komplette Etage zur gleichen Zeit der Normbrand ausbricht? Es ist vielmehr angemessen von einer Brandausbreitung auszugehen. Dabei werden Trennwände die Ausbreitung zeitlich verzögern. Somit wird es Bereiche geben in denen ein Brand entsteht, in denen der Vollbrand wütet, in denen der Brand abklingt und Bereiche, die noch nicht oder sogar nie von dem Brand betroffen sind. Es muss somit ein zu der Tragwerkssimulation passendes Brandszenario gefunden werden. Hierfür stellten die Eurocodes jedoch keine Hilfen zur Verfügung.

Weiterhin wird in den Eurocodes lediglich auf den Bauteilwiderstand bezüglich der Tragfähigkeit (Kriterium R) detaillierter eingegangen. Raumabschließende Bauteile wie Decken und Wände müssen zusätzlich das Isolationskriterium I und das Dichtigkeitskriterum E erfüllen. Das Isolationskriterium ist relativ eindeutig definiert, so dass es mit einer thermischen Simulation nachgewiesen werden kann. Simulationsmethoden zum Nachweis der Rauchdichtigkeit von Bauteilen sind dem Verfasser nicht bekannt. Hier besteht ebenfalls Forschungsbedarf. Solche numerischen Verfahren, die einerseits das strukturmechanische Verhalten z.B. auch der Rissbildung in Stahlbeton oder- Stahlverbunddecken beschreiben, und andererseits das Durchdringen von Rauch und/oder Feuer simulieren, sind äußerst komplex.

Versuche zeigen jedoch, dass diese Phänomene auftreten. Ein Beispiel dafür ist der Naturbrandversuch an einem Deckensystem, bei dem die Tragfähigkeit während des gesamten Brandes gegeben war, der Raumabschluss jedoch nicht (Bild 9). Es wird somit deutlich, dass der Raumabschluss nicht immer implizit durch den Tragfähigkeitsnachweis erfüllt ist.

Bild 9 Versagen eines Deckensystems durch den Verlust des Raumabschlusses

Insgesamt kann festgehalten werden, dass mit der Simulation von Teil- und Gesamttragewerken eine wirtschaftlichere Auslegung des Brandschutzes möglich ist. Dabei sind jedoch noch einige Detailfragen ungeklärt, so dass die Anwendung komplex und teilweise noch gar nicht möglich ist.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Beitrag gibt einen Überblick über den Stand der Einführung rechnerischer Nachweise im konstruktiven baulichen Brandschutz auf der Grundlage der Eurocodes. Die Fachkommission Bautechnik hat den Übergang von den nationalen zu den europäischen Regelungen beschrieben und dabei einige Einschränkungen und zusätzliche Bedingungen formuliert.

Anhand von Beispielen – teils aus kürzlich abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekten – werden die Chancen und die Grenzen bei der Anwendung der Eurocodes thematisiert. Die Anwendungsfreundlichkeit der rechnerischen Nachweisverfahren wird maßgeblich von der Nutzerfreundlichkeit entsprechender Software bestimmt werden.

Auf europäischer Ebene sind schon erste Aktivitäten erkennbar, die nächste Generation der Eurocodes vorzubereiten. Dabei ist die Zielrichtung der zukünftigen Entwicklung noch nicht fixiert. Es gibt Stimmen, die eine Vereinfachung der erforderlichen Nachweisverfahren für die „Heißbemessung“ fordern, indem - z.B. wie in der alten DIN 4102-4 - lediglich geometrische Randbedingungen wie

Mindestabmessungen und Mindestachsabstand der Bewehrung von der beflammten Oberfläche festgelegt werden.

Andere Stimmen meinen, die Eurocodes behindern die zukünftige Entwicklung in Richtung „performance based design“, weil sie noch viel zu sehr auf die Feuerwiderstandsklassen und damit auf die Normbrandkurve ausgerichtet sind.

Die Verfasser sind gespannt, wohin die Entwicklung geht, und sind bereit, an der Gestaltung mitzuwirken.

LITERATUR

[1] Schaumann,P.: Brandschutztechnischer Nachweis von Stahl- und Verbundkonstruktionen gemäß Eurocode 3 und 4, Braunschweiger Brandschutz-Tage ‘89, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, S. 95 - 108, 1989

[2] Schaumann, P.: Brandverhalten von Stahl- und Verbundbauteilen – Fortschreibung der DIN 4102-4 und der Eurocodes, in: Braunschweiger Brandschutz-Tage ‘03, iBMB, TU Braunschweig, Heft 168, S. 139 - 156, 2003

[3] Hosser, D.: Was ändert sich mit der Einführung der Eurocode-Brandschutzteile in Deutschland? Braunschweiger Brandschutz-Tage 2010, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, Heft 210, Braunschweig, 2010

[4] Sommer, T.: Stand und weitere Entwicklung der Brandschutznormung in Deutschland und Europa. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2010, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, Heft 210, Braunschweig, 2010

[5] Wathling, K.-D.: Umsetzung der europäischen Brandschutznormen im bauaufsichtlichen Verfahren. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2010, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, Heft 210, Braunschweig, 2010

[6] Fachkommission Bautechnik der Bauministerkonferenz: Erläuterungen zur Anwendung der Eurocodes vor ihrer Bekanntmachung als Technische Baubestimmungen, DIBt-Mitteilungen 6/2010, Ernst & Sohn, 2010

[7] Richter, E.: Brandschutzbemessung von schlanken Stahlbetonstützen – Vergleich DIN 4102-4 und Teil 22 mit Eurocode 2 Teil 1-2. Braunschweiger Brandschutz-Tage ’07, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, Heft 199, Braunschweig, 2010, S. 89-108

[8] Hosser, D.: Rahmenbedingungen für die Anwendung der Eurocodebrandschutzteile in Deutschland. Braunschweiger Brandschutz-Tage ’07, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, Heft 199, Braunschweig, 2010, S. 109-128

[9] Sitzung 4, Braunschweiger Brandschutz-Tage ‘05, Tagungsband. iBMB, TU Braunschweig, Heft 185, Braunschweig, 2005, S. 89-108

[10] vfdb/ Hrsg. D. Hosser: Leitfaden - Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 2. Auflage Mai 2009, Altenberge/Braunschweig, 2009, http://www.vfdb.de/download/Leitfaden_Ingenieurmethoden_Juni_2009.pdf

[11] Schaumann, P., Sothmann, J., Hosser, D., Albrecht, C., Girkes, H. W.: Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung - Erprobung und Validierung im Stahl- und Stahlverbundbau, Bauphysik-Kalender 2011, pp.383-407 Hrsg. Fouad, N., ISBN: 978-3-433-02965-7, Ernst & Sohn, Berlin, 2011

[12] Joyeux, D., Kruppa, J., Cajot, L.-G., Schleich, J.-B., van de Leur, P., Twilt, L., Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings, Final report, ECSC steel publications (2002)

[13] Mensinger, M., Stadler, M., Schaumann, P., Sothmann, J.: Abschlussbericht zum IGF-Forschungsprojekt 16142 N/1 „Nutzung der Membranwirkung von Verbundträger-Decken-Systemen im Brandfall“ (in Vorbereitung)

[14] Stadler, M., Mensinger, M., Schaumann, P., Sothmann, J.: Munich Fire Test on Membrane Action of Composite Slabs in Fire: Test Result and Recent Findings, Proceedings of Int. Conference "Applications of Structural Fire Engineering", pp.177-182, ISBN: 978-80-01-04798-9, Czech Technical University, Prague, 2011

ANHANG 1

Anschriften der Referenten und Sitzungsleiter

Dipl.-Ing. Cornelius Albrecht, MSc.	Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) Technische Universität Braunschweig Beethovenstraße 52 38106 Braunschweig c.albrecht@ibmb.tu-bs.de
Dr.-Ing. Helge-Jürgen Dargel	Bayer Technology Services GmbH BTS-ENG-CSA Geb. B 610 51368 Leverkusen helge-juergen.dargel@bayer.com
Dr.-Ing. Michael Dehne	Dehne, Kruse Brandschutzingenieure GmbH & Co. KG Gustav-Schwannecke-Straße 13 38518 Gifhorn dehne@kd-brandschutz.de
Dr.-Ing. Stefan Ehmann	WTM ENGINEERS GMBH Ballindamm 17 20095 Hamburg s.ehmann@wtm-hh.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
Dipl.-Ing. Christiane Hahn	Hahn Consult GmbH Baumschulenweg 2 38104 Braunschweig HC-BS@Hahn-Consult.de
Holger Hofmann	Fraport AG World Wide Services Cargo City Gebäude 547 60547 Flughafen Frankfurt am Main
Dr.-Ing. Volker Hohm	Ingenieurteam Trebes GmbH & Co. KG Schillerstraße 11 24116 Kiel hohm@trebes.de

Dr.-Ing. Dirk Hollmann
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz (iBMB)
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
d.hollmann@ibmb.tu-bs.de

Baudirektor
Prof. Dipl.-Ing. Günter Hoppe
Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 B
10829 Berlin
gho@dibt.de

Univ.-Prof.
Dr.-Ing. Dietmar Hosser
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz (iBMB)
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
d.hosser@ibmb.tu-bs.de

Akad. Rat
Dr.-Ing. Björn Kampmeier
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz (iBMB)
Technische Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
b.kampmeier@ibmb.tu-bs.de

Dr.-Ing. Marita Kersken-Bradley
Kersken + Kirchner GmbH
Beratende Ingenieure VBI
Pernerkreppe 11
81925 München
dr.m.kersken@kk-fire.com

Dipl.-Ing. (FH) Udo Kirchner
Sachverständigenbüro
Halfkann + Kirchner
Richard-Lucas-Straße 4
41812 Erkelenz
kirchner@hk-brandschutz.de

Dr.-Ing. Ulrich Max
Ingenieurbüro für Brandsicherheit AGB
In der Gründ 1
76646 Bruchsal
u.max@brandschutz-agb.de

Oberingenieur a. D.
Dr.-Ing. Ekkehard Richter
Petzvalstraße 45b
38104 Braunschweig
Ekkehard.Richter@gmx.net

Ministerialrat Dipl.-Ing. Jost Rübel	Ministerium für Wirtschaft, Energie, Bauen, Wohnen und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen Referat X.1 Jürgensplatz 1 40217 Düsseldorf jost.ruebel@mwebwv.nrw.de
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann	Leibniz Universität Hannover Institut für Stahlbau Appelstraße 9a 30167 Hannover schaumann@stahl.uni-hannover.de
Univ.-Prof. em. Dr. techn. Dr. h. c. Ulrich Schneider	Technische Universität Wien Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz Karlsplatz 13/206 1040 Wien (Österreich)
Dr.-Ing. Ralf Schnetgöke	Gruner AG Thurgauerstraße 56 8050 Zürich (Schweiz) ralf.schnetgoeke@gruner.ch
Dipl.-Ing. Jörg Sothmann	Leibniz Universität Hannover Institut für Stahlbau Appelstraße 9a 30167 Hannover sothmann@stahl.uni-hannover.de
Dr.-Ing. Mingyi Wang	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. Wilhelmstraße 43 / 43 G 10117 Berlin m.wang@gdv.de
Regierungsdirektor a. D. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wesche	Dönhoffstraße 88 51373 Leverkusen j.wesche@gmx.de
Dr.-Ing. Jochen Zehfuß	hhpberlin Ingenieure für Brandschutz Niederlassung Hamburg Kurze Mühren 20 20095 Hamburg j.zehfuss@hhpberlin.de

ANHANG 1

Anschriften der Referenten und Sitzungsleiter

ANHANG 2

Kurzvorstellung des Veranstalters (iBMB / MPA)

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ (iBMB)

TU Braunschweig

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 und Grundlagen des Massivbaus	Prof. Dr.-Ing. D. Hosser	(Tel. -5441)
Organische Werkstoffe und Holzwerkstoffe	Prof. Dr.-Ing. B. Kasal	(Tel. 22077-0)
Geschäftsführender Leiter:	Prof. Dr.-Ing. D. Hosser	(Tel. -5441).

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-38106 Braunschweig
Tel. 05 31/22077-0
Fax 05 31/22077 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 Temperaturbeanspru-chung 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.
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.
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 : 1. und 2. Oktober 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 Bauwerkstung unter Einbeziehung von monitoring. 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, 21.09./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
Erscheint ca. im September 2010

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 €

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 €