

SSI-Bulletin

Das Mitteilungsorgan der Schweizerischen Vereinigung unabhängiger Sicherheitsingenieure und -berater

So finden Sie uns im Internet: www.ssi-schweiz.ch

Rechnerischer Nachweis für Schutzziele

«Heisse» Bemessung von Tragwerken

Die Bemessung des Feuerwiderstandes von Tragwerken wird heute normalerweise auf der Basis von genormten Brandbelastungen durchgeführt. Insbesondere für Sonderbauten, moderne Architektur oder neue Bauweisen lassen sich mit einem alternativen, schutzzielorientierten Ansatz optimierte Lösungen finden. Unter Verwendung effektiver Brandbelastungen – der Naturbrandbeanspruchung – wird mit der «heissen Bemessung» die Einhaltung der geforderten Schutzziele rechnerisch nachgewiesen.

VON DR. RALF SCHNETGÖKE

Der erforderliche Feuerwiderstand von Tragwerken wird bislang rechnerisch oder durch genormte Brandversuche nachgewiesen. Grundlage für die Brandeinwirkung für diese Nachweise ist die sogenannte Einheitstemperaturzeitkurve (ETK). Die ETK wurde im Wesentlichen aus Bränden in Innenräumen abgeleitet. Damit soll der Beginn des Vollbrandes bis zum voll entwickelten Schadenfeuer in Rechnung gestellt werden. Mit der Einhaltung dieser Massnahmen wird davon ausgegangen, dass ein allgemein akzeptiertes Sicherheitsniveau erreicht wird.

Seit einigen Jahren werden vor allem für Sonderbauten, unter anderem aus Gründen des Denkmalschutzes, der modernen zeitgemässen Architektur oder neuen Bauweisen zunehmend an Schutzziele orientierte brandschutztechnische Betrachtungen durchgeführt. Klassisches Beispiel hierfür ist der Entrauchungsnachweis mittels Brandsimulation. Dieser Nachweis ist allgemein anerkannt und wird bei einer Vielzahl von Sonderbauten eingesetzt. Weiter wird der Entrauchungsnachweis mittels Brandsimulation auch schon indirekt durch den Passus «Massnahmen für den Rauch- und Wärmeabzug sind anhand spezieller Rauch- und Wärmeabzugskonzepte (z.B. rechnerischer Nachweis) festzulegen» in den aktuellen Brandschutzvorschriften der VKF verlangt.

Neben dem Entrauchungsnachweis ist es mittlerweile auch möglich, den erforderlichen Tragwiderstand von Tragkonstruktionen schutzzielorientiert festzulegen und nachzuweisen. Dabei werden Ingenieurmethoden zur Bestimmung der effektiven Brandwirkungen (Naturbrand) und Bauteilantworten eingesetzt. Bei diesem Vorgehen werden die tatsächlich vorhandene Brandbelastung vor Ort abgeschätzt, eine zeitabhängige Energiefreisetzungsrates ermittelt und die Berechnung der Raumtemperaturen mit entsprechenden Brandmodellen durchgeführt. Diese Raumtemperaturen werden dann in der Strukturanalyse des Bauwerkes berücksichtigt. Die Eingangsgrössen für die Ingenieurmethoden werden sehr konservativ angenommen, um das allgemein akzeptierte und in präskriptiven Vorschriften implizit vorhandene Sicherheitsniveau zu erreichen. Dieser neuen Entwicklung tragen auch die Brandschutzvorschriften der VKF Rechnung. Hier wird in der Brandschutzrichtlinie die Möglichkeit eröffnet, die Tragfähigkeit von Bauwerken (Einzel-

bauteile oder Gesamttragwerke) mit Zustimmung der Brandschutzbehörde rechnerisch oder durch Brandversuche bei Beanspruchung unter Naturbrandbedingungen nachzuweisen.

Naturbrand

Die Modelle zur Beschreibung des Naturbrandes berücksichtigen im Gegensatz zu den nominellen Temperaturzeitkurven (z.B. ETK) die wesentlichen Einflussfaktoren für den Verlauf eines natürlichen Brandes wie Art und Menge der Brandlasten, Ventilationsverhältnisse, Brandraumgeometrie und thermische Eigenschaften der umfassenden Bauteile. Mögliche Temperaturzeitverläufe des Naturbrandes sind in Bild 1 der ETK gegenübergestellt.

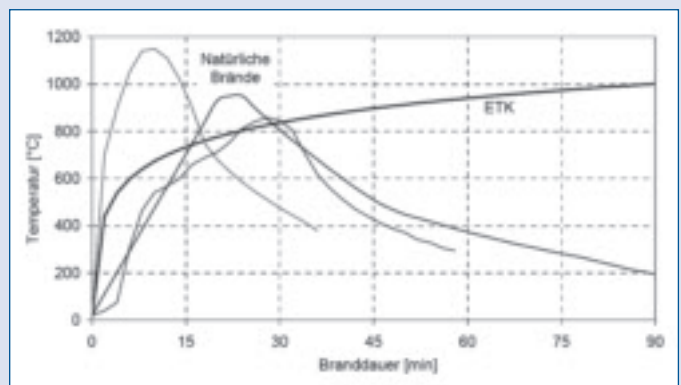


Bild 1: Vergleich des Temperaturzeitverlaufes natürlicher Brände mit der ETK (Zehfuss, 2004)

Die Einflussfaktoren können zudem zeitlich veränderlich sein. Somit ergibt sich für ein Bauwerk in Abhängigkeit der örtlichen und zeitlichen Verhältnisse eine Fülle möglicher Brandverläufe. Für jeden Raum, jede Nutzungseinheit und jeden Brandabschnitt sind viele Brandszenarien denkbar, die sich aus einer Reihe von Einflussgrößen wie Brandursache, Ort der Brandentstehung, besonderen Brandgefahren und weiteren möglichen brandbeeinflussenden Faktoren ergeben. Für die brandschutztechnische Bemessung eines Bauwerks müssen daher sogenannte Bemessungs-Brandszenarien definiert werden, mit denen ein möglicher Brand durch Beschreibung der Zündart und der weiteren Entwicklung des Feuers zuverlässig abgedeckt werden kann. Der Bemessungsbrand beschreibt den durch das Bemessungs-Brandszenario hervorgerufenen Temperaturzeitverlauf.

Die erforderliche Zuverlässigkeit der Brandschutzbemessung muss über die Definition einer hinreichend konservativen Bemessungsbrandeinwirkung sichergestellt werden. Das erfolgt durch die Anwendung eines entsprechenden Sicherheitskonzeptes.

Brandszenarien

Grundlage für eine realistische Erfassung des zu erwartenden Brandverlaufs bei einer schutzzielorientierten Brandschutzbemessung ist ein realistisches Brand-

szenario, welches durch einen Bemessungsbrand beschrieben wird, der den vorliegenden brandschutztechnischen Randbedingungen (Brandlast, Ventilation, Raumgeometrie) Rechnung trägt. Der Bemessungsbrand kann in Form einer Wärmefreisetzungsrate vorgegeben werden, mit der sich die Brandentwicklung quantitativ beschreiben lässt, und die dann Grundlage für eine rechnerische Ermittlung der Brandwirkungen (z.B. Raumtemperaturen, Rauchgasströme) ist.

Sicherheitskonzept

Das im Folgenden vorgestellte Sicherheitskonzept für den Nachweis des konstruktiven Brandschutzes mithilfe der Eurocode-Brandschutzteile wurde vom Autor miterarbeitet [Hosser et al., 2008]. Es berücksichtigt den aktuellen Stand probabilistischer Sicherheitsanalyse und wurde darauf aufbauend speziell für die praxisorientierte Anwendung entwickelt. Das Sicherheitskonzept ist für unterschiedliche Bauweisen (Beton, Stahl, Verbund, Holz, Mauerwerk), unterschiedliche Nutzungsarten (normale Gebäude und Sonderbauten), unterschiedliche Brandeinwirkungen (Normbrand- und Naturbrandbeanspruchung) und unterschiedliche rechnerische Nachweisverfahren (vereinfachte und allgemeine Rechenverfahren) gleichermaßen anwendbar.

Das Sicherheitskonzept orientiert sich an den – unter übergeordneten Gesichtspunkten – bereits getroffenen Festlegungen

in den europäischen Normen. Das betrifft einerseits die generellen Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit von Bauwerken und Tragwerken, die bauart- und baustoffübergreifend in EN 1990 – Eurocode geregelt sind.

Je nach verwendetem Naturbrandmodell und Nachweisverfahren sind unterschiedliche Eingangsgrößen für die Brandeinwirkungen massgebend und daher mit Teilsicherheiten zu beaufschlagen:

- die Brandbelastung, wenn die Branddauer für die Bemessung massgebend ist (z.B. für Bauteile mit grösserer Feuerwiderstandsdauer und für Holzbauteile mit konstanter Abbrandgeschwindigkeit)
- die Brandausbreitungsgeschwindigkeit, wenn die Brandeinwirkung in der Frühphase des Brandes massgebend wird (z.B. die Raumtemperatur bei ungeschützten Stahlbauteilen)
- die maximale Brandausdehnung und/oder Abbrandrate, die in der stationären Phase eines brandlastgesteuerten Brandes die maximale Wärmefreisetzungsrate und Temperaturentwicklung bestimmen
- die Ventilationsbedingungen, die im ventilationsgesteuerten Brand für die maximale Wärmefreisetzungsrate und Temperaturentwicklung ausschlaggebend sind

In Abhängigkeit der Auftretenswahrscheinlichkeit eines Schadenfeuers ergibt sich die erforderliche Zuverlässigkeit für die Bemessung der Konstruktion. Die Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} eines Schadenfeuers in einer brandschutztechnisch wirksam abgetrennten Nutzungseinheit mit der Grundfläche A in einem Bezugs-

Editorial

Schutzzielorientierte Bemessung

Im Zusammenhang mit Schutzbauten gegen Naturgefahren ist eine schutzzielorientierte Bemessung seit langer Zeit üblich. Wir sind es gewohnt, bei der Auslegung von Dämmen im Wasserbau zum Beispiel vom 100-jährigen Hochwasser auszugehen, oder unsere Gebäude auf ein Erdbeben mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren zu bemessen. Die Schutzziele grenzen dabei nicht akzeptable Risiken gegenüber akzeptablen Risiken ab.

Diese schutzzielorientierte Bemessung findet je länger je mehr Einzug in weiteren Ingenieurdisziplinen. Die Entwicklung weg von starren deterministischen Anforderungen hin zu ganzheitlichen, probabilistischen Betrachtungen ermöglicht dank einer grösseren Flexibilität neben ansprechenden architektonischen Lösungen auch einen wirtschaftlichen Ressourceneinsatz. Gerade in Zeiten mit immer komplexer werdenden Projektanforderungen brauchen wir diese Gestaltungsfreiheit, um die Randbedingungen der Nutzung und der

architektonischen Gestaltung mit dem gesellschaftlich verlangten Sicherheitsniveau unter einen Hut zu bringen.

Der Leitartikel zur «heissen» Bemessung beschreibt ein auf Schutzziele basierendes Sicherheitskonzept für die brandschutztechnische Bemessung. Der vorgestellte risikobasierte Ansatz ist wegweisend, und es liegt an uns Ingenieuren, solch innovativen Ansätzen am Markt zum Durchbruch zu verhelfen. Eine herausfordernde Aufgabe, packen wir sie an!



Peter Jost
Basler & Hofmann AG

I M P R E S S U M

Herausgeber: Schweizerische
Vereinigung unabhängiger
Sicherheitsingenieure und
-berater
Güstrasse 46, CH-8700 Küsnacht
Telefon 044 910 73 06
Fax 044 910 73 96

Erscheinungsweise: zwei Ausgaben pro Jahr

Mitarbeiter
dieser Ausgabe: Dr. Ralf Schnetgöke
Gruner AG, Ingenieure & Planer

Peter Jost
Basler & Hofmann AG

Layout, Satz
und Druck: Rheintaler Druckerei und Verlag AG,
9442 Berneck

S S I - Mitgliedfirmen stellen sich vor:

AMSTEIN + WALTHERT SICHERHEIT AG

beschäftigt sich schwerpunktmässig mit Problemlösungen auf dem Gebiet der integralen Objektsicherheit (Safety, Security). Unser Angebot sind den Bedürfnissen des Kunden entsprechende, präzise fokussierte, aber gesamtheitlich ausgerichtete Dienstleistungen:

- neutrale Beratung (z.B. System-evaluation etc.)
- Schwachstellenanalysen
- Planung
- Ausführungsbegleitungen
- Sicherheitsrevision/Audits

Das Fundament unserer anerkannten Tätigkeit sind motivierte, leistungswillige Mitarbeiter, praktische Erfahrung und ein breit abgestütztes Fachwissen in Bezug auf:

- Bauliche Schutzmassnahmen
- Tür-Engineering
- Brandschutz
- Zutrittskontrolle, Multi-Badging
- Einbruchschutz
- Video-Überwachung
- Sicherheitsleittechnik
- Notfallplanung

Unsere Spezialisten (ca. zwölf Mitarbeiter) befassen sich seit mehr als 20 Jahren mit punktuellen Problemlösungen, umfassenden Sicherheitskonzepten und leiten anspruchsvolle Gesamtprojekte (Neubauten, Umbauten, Sanierungen). Deshalb kennen sie viele, aktuelle Sicherheitsstandards für:

- Banken, Versicherungen
- Rechenzentren
- Öffentliche Verwaltungen (Justizgebäude, Gefängnisse)
- Museen
- Spitäler
- Industrie und Gewerbe
- Dienstleistungsbetriebe

Amstein + Walthert Sicherheit AG
Mönchmattweg 5
5036 Oberentfelden
Tel. 062 723 05 10
E-Mail: infoaa@amstein-walthert.ch

Nutzung	Mittlere Auftretensrate je m ² und Jahr	Auftrittswahrscheinlichkeit je Nutzungseinheit und Jahr		
		p ₁ = a · A ^b		p ₁
	λ ₁ [1/(m ² ·a)]	a [1/(m ² ·a)]	b	[1/a]
Wohngebäude	4,7E-6	4,8E-5	0,9	3,0E-3
Bürogebäude	2,1E-6	5,9E-5	0,9	6,2E-3
Krankenhäuser, Pflegeheime	5,6E-6	7,0E-4	0,75	3,0E-1
öffentliche Versammlungsstätten	3,8E-6	9,7E-5	0,75	2,0E-2
private Versammlungsstätten			1,0	1,2E-1
Schulen	1,9E-6	2,0E-4	0,75	4,0E-2
Bildungseinrichtungen			0,75	4,0E-2
Hotels, Beherbergungsstätten	4,7E-6	8,0E-5	1,0	3,7E-2
Geschäftshäuser			1,0	8,4E-3
Industriegebäude (Produktion)	6,4E-6	1,7E-3	0,53	4,4E-2
Lagergebäude	1,4E-5	6,7E-4	0,5	1,3E-2

Auftretenswahrscheinlichkeit p₁ je Nutzungseinheit in Abhängigkeit von der Nutzung.

Brandbekämpfung durch	Ausfallwahrscheinlichkeit bei Anforderung	
	p ₂	p ₃
öffentliche Feuerwehr mit Eingreifzeit		
< 15 min	0,2	
> 20 min	0,5	
Werkfeuerwehr mit Eingreifzeit *)		
< 5 min (vier Staffeln)	0,02	
< 5 min (zwei Staffeln)	0,05	
< 10 min	0,1	
Automatische Löschanlage Sprinkleranlage mit Prüfung/Wartung mind. alle 2 Jahre		0,02
in anderen Fällen		0,05
Sonstige Wasserlöschanlage		0,1
Gaslöschanlage		0,1

*) automatische Brandmeldung und Alarmierung werden vorausgesetzt

Ausfallwahrscheinlichkeit p₂ beziehungsweise p₃ von Brandbekämpfungsmassnahmen.

zeitraum von einem Jahr kann mit nachfolgender Gleichung ermittelt werden:

$$P_{f,i} = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3$$

p₁ = jährliche Auftretenswahrscheinlichkeit eines Entstehungsbrandes in der Nutzungseinheit [1/a]

p₂ = Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch die Feuerwehr

p₃ = Ausfallwahrscheinlichkeit der Brandbekämpfung durch eine automatische Löschanlage im Anforderungsfall

Aus der für alle Lastfälle geltenden zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit p_f und

der jährlichen Auftretenswahrscheinlichkeit p_{fi} von mindestens einem Schadenfeuer in der betreffenden Nutzungseinheit kann eine zulässige bedingte Versagenswahrscheinlichkeit p_{f,fi} im Brandfall beziehungsweise der damit verknüpfte Zuverlässigkeitsindex β_{fi} wie folgt ermittelt werden:

$$p_f = \Phi(-\beta)$$

$$P_{f,fi} = \frac{p_f}{P_{fi}}$$

$$\beta_{fi} = -\Phi^{-1}(P_{f,fi})$$

Mit der bedingten Versagenswahrscheinlichkeit im Brandfall $p_{f,fi}$ nach obiger Gleichung beziehungsweise dem zugehörigen Zuverlässigkeitsindex β_{fi} können Bemessungswerte für die Eingangsdaten zur Ermittlung der Brandeinwirkung definiert werden.

Aufgrund der grossen Streuungen und des Einflusses sowohl auf die Amplitude der Wärmefreisetzungsrate als auch auf die Dauer des (von Löschmassnahmen unbeeinflussten) Brandes ist in der Regel die Brandlastdichte die dominierende Eingangsgrösse. Sie ist daher mit einem oberen Bemessungswert anzusetzen, der sich aus dem charakteristischen Wert durch Multiplikation mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} ergibt.

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_{fi} für die Brandlastdichte kann direkt aus Bild 2 (durchgezogene Kurve) in Abhängigkeit vom erforderlichen Zuverlässigkeitsindex β_{fi} abgelesen werden.

Simulation

Zur Berechnung der Brandraumtemperaturen des jeweiligen Brandszenarios stehen verschiedene mathematische Brandsimulationsmodelle zur Verfügung, die sich in drei Gruppen einteilen lassen. Die erste Gruppe enthält empirisch belegte Ansätze zum Beispiel zur Modellierung der Plume-Temperaturen oder des Ceiling Jets. Die zweite Gruppe umfasst die Zonenmodelle und die dritte Gruppe die Feldmodelle (CFD). Allen ist gemein, dass sie als Eingangsgrösse eine Brandlast Q benötigen, die idealerweise vor Ort ermittelt wird. Unter der Brandlast Q versteht man die Summe der Verbrennungswärme sämtlicher in einem Raum enthaltenen brennbaren Stoffe. Die Wahl des Brandsimulationsmodells hängt sehr stark vom zu betrachtenden

Brandszenario ab. Bei einem lokalen Brand ist es oft ausreichend, mit empirischen Ansätzen zu arbeiten. Zonenmodelle respektive daraus abgeleitete parametrische Brandraumkurven eignen sich für die Beschreibung von Raumbränden mit einfachen Geometrien. Sehr universell einsetzbar sind Feldmodelle (CFD), mit ihnen lassen sich auch Brände in komplizierten Geometrien mit hinreichender Genauigkeit abbilden.

«Heisse» Bemessung

Die EN 1991-1-2 regelt die Rechen Grundlagen zur Ermittlung der Temperatur- und Lasteinwirkungen. Der Brandfall wird dabei als ein aussergewöhnliches Ereignis (accidental situation) angesehen, das nicht mit anderen, davon unabhängigen aussergewöhnlichen Ereignissen zu überlagern ist.

Die Brandschutzteile der baustoffbezogenen Eurocodes sehen grundsätzlich brandschutztechnische Nachweisverfahren auf drei Stufen vor: mittels tabellarischer Daten (Nachweisstufe 1), mittels vereinfachter Rechenverfahren (Nachweisstufe 2) und mittels allgemeiner Rechenverfahren (Nachweisstufe 3).

Die Nachweisverfahren mittels tabellarischer Daten beschränken sich in der Regel darauf, die Querschnittsabmessungen des zu untersuchenden Bauteils (und z.B. bei Betonbauteilen den Achsabstand der Bewehrung) mit Werten zu vergleichen, die nach Brandversuchsergebnissen zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind.

Mit den vereinfachten Rechenverfahren wird in der Regel nachgewiesen, dass von einem Bauteil die im Brandfall massgebenden Lasteinwirkungen nach Ablauf

einer vorgeschriebenen Branddauer (Feuerwiderstandsdauer des Bauteils) aufgenommen werden können. Dafür werden unter anderem Vereinfachungen bei der Ermittlung der Bauteiltemperaturen und der Beschreibung des Versagenszustandes im Brandfall getroffen.

Die allgemeinen Rechenverfahren ermitteln für eine vorgegebene Branddauer das tatsächliche Tragvermögen, ggf. auch das Verformungsverhalten der Bauteile. Sie bieten Lösungen für drei Probleme des baulichen Brandschutzes:

- Ermittlung des Gleichgewichts- und Verformungszustandes eines Einzelbauteils zu beliebigen Zeitpunkten t bei vorgegebener Temperaturzeitkurve in der Bauteilumgebung, Belastung und Lagerung. Damit kann ein Brandversuch simuliert werden.
- Ermittlung der von einem Einzelbauteil maximal aufnehmbaren Belastung (z.B. $N_{R,fi,d}$, $M_{R,fi,d}$) bei einer vorgegebenen Temperaturzeitkurve in der Bauteilumgebung nach einer bestimmten Brandeinwirkungsdauer.
- Ermittlung des Gleichgewichts- und Verformungszustandes von Gesamt- oder Teiltragwerken aus mehreren Bauteilen bei lokaler Brandbeanspruchung, wobei sowohl nominelle Temperaturzeitkurven als auch natürliche Brandverläufe simuliert werden können.

Mit dem allgemeinen Rechenverfahren ist es möglich, die Tragwerksbemessung im Brandfall unter Naturbrandbeanspruchung («heisse» Bemessung) durchzuführen. Mit dem oben beschriebenen Sicherheitskonzept wird sichergestellt, dass die Zuverlässigkeit des Tragwerkes auch im Brandfall der gesellschaftlich akzeptierten Zuverlässigkeit entspricht. ■

Über den Autor

Dr. Ralf Schnetgöke

ist im Geschäftsbereich Umwelt und Sicherheit in der Gruner AG tätig und betreut dort als Projektleiter Brandschutz und Entrauchung Grossprojekte in der Planung und Ausführung. Zuvor war er wissenschaftlich mit dem Schwerpunkt auf probabilistischen Analysen von Bauwerken tätig. In diesem Rahmen entstand auch das Sicherheitskonzept für die «heisse» Bemessung. Er hat langjährige Erfahrung in der Tragwerksplanung und im konstruktiven Brandschutz.

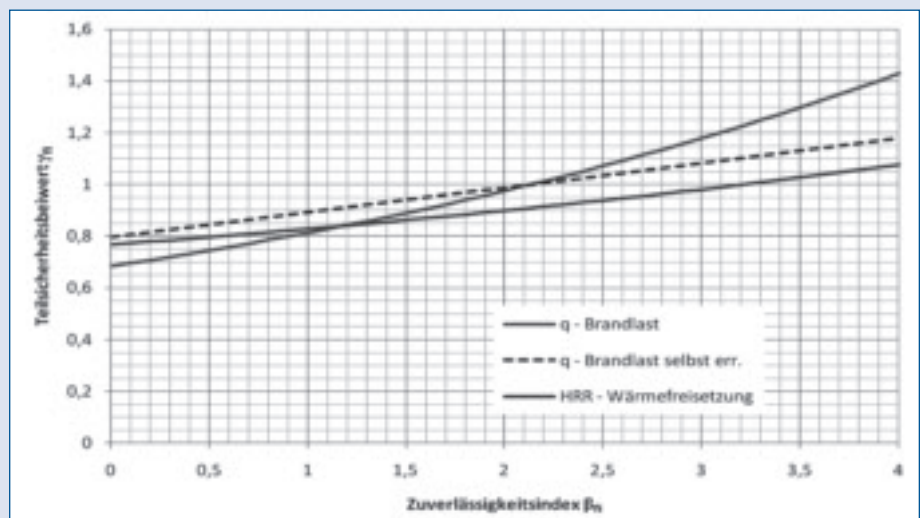


Bild 2: Teilsicherheitsbeiwerte für massgebende Einflussgrössen eines Naturbrandes bezogen auf die definierten charakteristischen Werte