

Ulrike Kuhlmann (Hrsg.)

Stahlbau-Kalender 2022

**Schwerpunkte: Türme und Maste,
Brandschutz**

- Brandschutzlösungen für sichere und wirtschaftliche Bauten in Stahl- und Stahlverbundbauweise
- Heißbemessung von Verbundtragwerken
- Reaktive Brandschutzsysteme (RBS) für Stahltragwerke

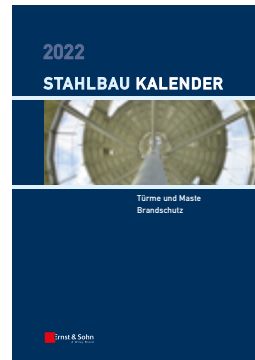
Der Brandschutz ist existenziell für die Stahlbauweise, dabei sind Brandschutzkonzepte und Naturbrandmodelle vorteilhaft. Die künftigen Entwicklungen in EN 1991-1-2 und EN 1993-1-2 werden vorgestellt. Die Planungsaufgaben bei Türmen und Masten und die Windlasten werden erläutert.

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

www.ernst-und-sohn.de/3361



2022 · 720 Seiten ·
600 Abbildungen · 180 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03361-6 € 159*

Fortsetzungspreis € 139*

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03363-0 € 194*

Fortsetzungspreis eBundle € 169*

ÜBER DAS BUCH

Ein Schwerpunkt des Stahlbau-Kalenders 2022 ist der Brandschutz, der existenziell für die Stahlbauweise ist. Die ganzheitliche Betrachtung des vorbeugenden Brandschutzes unter Berücksichtigung der nutzungsbedingten Gefährdungspotentiale und Schutzziele spielt bei der Planung und Errichtung von Bauwerken eine wesentliche Rolle. Planung und Entwurf mithilfe von Brandschutzkonzepten und Naturbrandmodellen können vorteilhafte, wirtschaftliche Konstruktionen hervorbringen.

Mit dem zweiten Schwerpunktthema Türme und Maste behandelt dieser Kalender ein Spezialthema des Stahlbaus mit seinen spezifischen Konstruktionsformen und Einwirkungen, insbesondere aus Wind.

Der Stahlbau-Kalender dokumentiert verlässlich und aus erster Hand den aktuellen Stand der Stahlbau-Regelwerke. In diesem Sinne werden, neben der Aktualisierung des Kommentars zu Eurocode 3 Teil 1-1 „Bemessungsregeln für den Hochbau“, die neuen Entwicklungen zur Regelung der „Brandeinwirkungen auf Tragwerke“ in prEN 1991-1-2 und der „Tragwerks-

bemessung für den Brandfall“ in prEN 1993-1-2 dargestellt und erläutert.

Wie immer bewegen sich alle Kapitel nahe an der Ingenieurpraxis und enthalten zahlreiche Beispiele. Das Buch ist ein Wegweiser für die richtige Berechnung und Konstruktion im gesamten Stahlbau mit neuen Themen in jeder Ausgabe. Herausragende Autoren aus der Industrie, aus Ingenieurbüros und aus der Forschung vermitteln Grundlagen und geben praktische Hinweise.

BESTELLUNG

| Anzahl | ISBN / | Titel | Preis |
|--------|-------------------|---------------------------------------|--------|
| | 978-3-433-03361-6 | Stahlbau-Kalender 2022 | € 159* |
| | | Fortsetzungspreis | € 139* |
| | 978-3-433-03363-0 | Stahlbau-Kalender 2022 (Print + ePDF) | € 194* |
| | | Fortsetzungspreis eBundle | € 169* |

| | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|------------|
| | Privat | Geschäftlich | |
| Bitte richten Sie Ihre Bestellung an: | Firma, Abteilung | | UST-ID Nr. |
| Tel. +49 (0)30 47031-236 | Name, Vorname | | Telefon |
| Fax +49 (0)30 47031-240 | Straße, Nr. | | Fax |
| marketing@ernst-und-sohn.de | PLZ/Ort/Land | | E-Mail |
| | Datum/Unterschrift | | |

www.ernst-und-sohn.de/3361

Vorwort

Türme und Maste sind filigrane Ingenieurtragwerke, die sehr sensibel auf klimatische Einwirkungen wie Wind reagieren. Gleichzeitig haben sich bestimmte typische Konstruktionsformen wie Fachwerke aus Winkelprofilen für diese Tragwerke bewährt. In dem ersten Schwerpunkt des Stahlbau-Kalenders 2022 werden in den zugehörigen Beiträgen nicht nur die Grundlagen, sondern auch die neuen Entwicklungen im Hinblick auf die neue Eurocode-Generation dargestellt. Die neuen Eurocode-Regelungen sind auch Hauptgegenstand der zum zweiten Themenschwerpunkt Brandschutz gehörenden Beiträge. Gleichzeitig geht es darum, wie heute in der Praxis für Stahl- und Verbundtragwerke konkrete Lösungen zum **Brandschutz** gefunden werden.

Mit dem Abdruck der Grundnorm **DIN EN 1993-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau** mit Nationalem Anhang sowie ergänzenden, an den jeweiligen Stellen aktualisierten Kommentaren von Ulrike Kuhlmann und Fabian Jörg, Universität Stuttgart wird den Anwender:innen eine verlässliche Basis für ihre tägliche Arbeit gegeben. Diese regelmäßige Überarbeitung ermöglicht es, auf aktuell entstandene Fragen oder Klärungsbedarf bzw. neue Erkenntnisse durch die zurzeit laufende Überarbeitung der Norm für die zweite Generation der Eurocodes einzugehen.

Karsten Kathage und Christoph Ortmann, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin erläutern in ihrem Beitrag **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Normen und Bescheide im Stahlbau** die zur Zeit der Beitragsbearbeitung noch aktuelle Version MVV TB 2020/22 im Hinblick auf den Stahlbau. Die überarbeitete Version MVV TB 2021/1 der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen wurde im Januar 2022 veröffentlicht. Zusätzlich werden die aktuellen Normen und Richtlinien für den Stahlbau aufgelistet und eine Zusammenstellung der für den Stahl- und Verbundbau relevanten Bescheide des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt (Stand: September 2021) gegeben.

Über **Neue Entwicklungen in prEN 1993-1-2:2020** berichten Markus Knobloch, Sara Uszball, Lukas Schaper, Ruhr-Universität Bochum und Martin Mensinger, Technische Universität München. Vor dem Hintergrund der Entwicklung der zweiten Generation der Eurocodes wurde eine Entwurfsfassung von prEN1993-1-2 „Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“ ausgearbeitet, die aktuell zur finalen Abstimmung in Europa vorbereitet wird. In diesem Beitrag werden die Weiterentwicklungen von prEN1993-1-2 gegenüber der derzeitigen Norm erläutert und die Anwender:innen frühzeitig mit den wesentlichen strukturellen und technischen Änderungen vertraut gemacht. Die Autor:innen waren unmittelbar an der Ausarbeitung des neuen Normentextes beteiligt, was eine kompetente Vermittlung der Intentionen und Hinter-

gründe der Änderungen im neuen Normentext ermöglicht. Der englische Originaltext wurde auszugsweise von den Verfasser:innen des Beitrags ins Deutsche übersetzt und ist den Erläuterungen vorangestellt.

Im Beitrag **Brandschutztechnische Bemessung von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton** geben Peter Schaumann, Maximilian Mund, Leibniz Universität Hannover und Inka Pehrs, Hagen Ingenieurgesellschaft für Brandschutz mbH, Hannover einen aktuellen Überblick über die heute geltenden normativen Regelungen zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlverbundtragwerken. Gravierende Neuerungen in den zurzeit in der Bearbeitung befindlichen neuen Eurocodes werden aufgezeigt. Zunächst wird der aktuelle bauaufsichtliche Rahmen für Regelbauten beschrieben. Es folgt die Erläuterung der thermischen und mechanischen Einwirkungen sowie der temperaturabhängigen Materialkennwerte von Beton, Bau- und Bewehrungsstahl. Des Weiteren werden die tabellarischen und vereinfachten Bemessungsverfahren nach DIN EN 1994-1-2 vorgestellt. Der Ermittlung der Bauteilwiderstände und den entsprechend den erhöhten Bauteiltemperaturen veränderten Materialeigenschaften kommt dabei besondere Bedeutung zu. Aufgrund der zunehmenden praktischen Bedeutung wird ein gesonderter Abschnitt den computergestützten Bemessungsverfahren gewidmet. Zuletzt werden einige Beispiele detailliert ausgearbeitet.

Im Beitrag **Einwirkungen im Brandfall nach Eurocode 1** von Jochen Zehfuß, Technische Universität Braunschweig werden die Einwirkungen im Brandfall nach Eurocode 1 vorgestellt. Der Brandfall als außergewöhnliche Bemessungssituation ist durch thermische Einwirkungen im Hochtemperaturbereich gekennzeichnet, die eine Auswirkung hinsichtlich thermischer Dehnungen und Zwangskräfte sowie eine temperaturbedingte Reduzierung der Festigkeiten und Steifigkeiten der Baustoffe zur Folge hat. Die thermischen Einwirkungen hängen wesentlich vom Bemessungsbrand ab. Eurocode 1 ermöglicht neben der klassischen Vorgehensweise des Ansatzes mit nominellen Temperaturzeitkurven wie der Einheits-Temperaturzeitkurve auch eine leistungsorientierte Festlegung der Brandeinwirkungen mittels Naturbrandszenarien. Die Anwendung von vereinfachten und erweiterten Naturbrandmodellen, deren Anwendungsbereich und Randbedingungen werden beschrieben und die Anwendung exemplarisch für das Brandszenario eines vollentwickelten Raumbrandes sowie eines lokalen Brandes in Beispielen gezeigt. Im Beitrag werden die absehbaren Neuerungen des in Überarbeitung befindlichen Eurocodes 1 angesprochen und im Beispiel dargestellt.

In ihrem Beitrag zu **Reaktiven Brandschutzsystemen** erläutern Sascha Hothan und Dustin Häßler, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin neueste Erkenntnisse zu reaktiven Brandschutz-

systemen (RBS). Ihre Wirkungsweise basiert auf der Bildung einer thermischen Schutzschicht infolge Reaktion der Bestandteile mittels thermischer Aktivierung durch den Brand selbst. Die so entstehende, schaumartige Schutzschicht verlangsamt die Erwärmung der beschichteten Konstruktion. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Verwendung von RBS auf Stahlkonstruktionen. Neben einer umfassenden Darstellung der aktuellen nationalen und europäischen Regelungen zu RBS werden technologische Besonderheiten und deren Einfluss auf den Regelungsinhalt im Beitrag thematisiert. Dabei werden neben sich abzeichnenden Neuerungen auch die entsprechenden wissenschaftlich-technologischen Grundlagen dargelegt. Eine allgemeine Darstellung von Exposition und Schädigungsmechanismen sowie die Behandlung der Nachweise für die Dauerhaftigkeit soll sachlich informieren und Problemlösungen aufzeigen. Dabei wird insbesondere die Frage nach Nutzungsdauern weit jenseits von 10 Jahren aufgegriffen.

Mit dem Thema **Praxisbeispiele zu erfolgreichen Brandschutzlösungen** beschäftigten sich Jochen Zehfuß, Technische Universität Braunschweig, Jörg Sothmann, Michael Winkler, hhpberlin Ingenieure für Brandschutz GmbH, Hamburg, Georg Spennes, BFT Cognos GmbH, Aachen, Jens Upmeyer, Hagen Ingenieurgesellschaft für Brandschutz mbH, Kleve und Olga Molochnikova, Ingenieure für Brandschutz GmbH, Hamburg. Anhand von 3 Praxisbeispielen werden erfolgreiche Brandschutzlösungen vorgestellt. In einem ersten Beispiel wird der Nachweis für die Konstruktion einer 100-jährigen Stahlkonstruktion eines ehemaligen Gewerbegebäudes gezeigt, das nun als Theater genutzt wird. In einem zweiten Beispiel wird dargestellt, dass das stählerne Tragwerk einer offenen Parkgarage ohne Brandschutzmaßnahmen ausgeführt werden kann, sofern der Nachweis unter Berücksichtigung der thermischen Einwirkung auf der Grundlage von Naturbrandzenarien erfolgt. Im dritten Beispiel wird ein Brandschutznachweis für ein Raumzellengebäude aus Containern ohne Brandschutzbekleidung von außen gezeigt.

Im Beitrag **Bewertung und Instandsetzung von Altstahlkonstruktionen** behandeln Richard Stroetmann, Technische Universität Dresden, Lars Sieber, Thomas Riedel, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTW) und Andreas Taras, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH) unter Mitarbeit von Dipl.-Ing. Jürgen Anders, Institut für Schweißtechnik und Ingenieurbüro Dr. Möll GmbH, Darmstadt und Prof. Dr.-Ing. Gerd Kuscher, Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, Hannover die Grundlagen zu Altstahlkonstruktionen, die für deren Bewertung, Modernisierung und Instandsetzung von Interesse sind. Nach einer Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Herstellungsverfahren und der frühen Normung für Baustähle wird auf die metallurgischen Besonderheiten aus der Herstellung, die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften alter Baustähle

eingegangen. Eine häufig bei Altstahlkonstruktionen anzutreffende Verbindungstechnik stellen Nietverbindungen dar, die hier vorgestellt werden. Ein wichtiger Aspekt ist die Bewertung der Sprödbrechneigung genieteter Stahlkonstruktionen aus Flusstahl. Bei der Beurteilung der Sicherheit bestehender Konstruktionen und der Entscheidung über notwendige Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen ist der Nachweis ausreichender Werkstoffzähigkeit von wesentlicher Bedeutung. Schließlich rundet ein Abschnitt zur Ermüdungsfestigkeit und Restlebensdauer genieteter Altstahlkonstruktionen den Beitrag ab. Neu ist dabei ein Abschnitt, in dem die Ermittlung von Inspektionsintervallen auf Basis von Risswachstumsberechnungen behandelt wird.

Winkelprofile gehören zu den beliebtesten Profiltypen im Bausektor, besonders im Mast- und Turmbau. Über den **Nachweis von Einzel- und mehrteiligen Stäben aus gewalzten gleichschenkligen Winkelprofilen** berichten André Beyer, CTICM, Frankreich, Marios-Zois Bezas, und Jean-Pierre Jaspert, Université de Liège, Belgien sowie Ioannis Vayas, National Technical University of Athens, Griechenland. Im Beitrag werden auf der Grundlage der Ergebnisse des europäischen Forschungsprojekts ANGELHY Bemessungskonzepte erläutert, die den Nachweis von Einzel- und mehrteiligen Stäben aus gewalzten gleichschenkligen Winkelprofilen der Querschnittsklassen 1 bis 4 für einzelne und kombinierte Schnittgrößen erlauben. Bei mehrteiligen Querschnitten erlauben sie eine einfache Erfassung der Abstände zwischen Verbindungen und geben die Möglichkeit Konfigurationen zu behandeln, die aktuell nicht im Eurocode erfasst sind. Diese Regeln sind sowohl für den allgemeinen Gebrauch als auch speziell für Türme und Maste anwendbar und wurden somit für einen Anhang F in der neuen prEN 1993-3 vorgeschlagen. In diesem Beitrag werden die Regeln vorgestellt und ihre Herleitung und Validierung erläutert. Hervorzuheben ist, dass die Nachweise auch sehr konkret an typischen Anwendungsbeispielen gezeigt werden.

Mit dem Thema **Aktuelle Modelle und Methoden zur Windlastermittlung** haben sich Rüdiger Höffer, Ruhr-Universität Bochum, Klaus Thiele, Technische Universität Braunschweig, Francesca Lupi, Ulf Winkelmann, Ruhr-Universität Bochum, Wolfgang Hubert, Niemann Ingenieure GbR, Bochum, Cornelia Kalender, Ruhr-Universität Bochum, Roland Wüchner und Cong Chen, Technische Universität Braunschweig beschäftigt. Zur quantitativen Beschreibung der Windwirkung sind Modelle der Bauwerksaerodynamik erforderlich, deren Qualität direkt das Ergebnis beeinflusst. In jedem Fall ist es von großer Bedeutung, die Voraussetzungen und Geltungsgrenzen der verwendeten Modelle zu kennen. Turbulenzinduzierte Schwingungen und aeroelastische Instabilitäten von Bauwerken sind ebenso ein Schwerpunktthema des Beitrags wie wirbelerregte Schwingungen bei Türmen und Masten. Hinweise werden auch zur Minderung der Schwingungen von Brückenüberbauten im Bauzustand gegeben, einem

in jüngster Zeit intensiv diskutierten Problem. Für diese und andere Themen des Windingenieurwesens werden Modelle dargestellt und erläutert. Dabei wird auch die aktuelle Weiterführung der europäischen Normung berücksichtigt.

Türme und Maste sind funktionale, schlanke Ingenieurtragwerke und wichtiger Teil unserer modernen Infrastruktur. Frank Kemper, Markus Feldmann, Mirko Friehe, alle Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Klaus Thiele, Technische Universität Braunschweig und Dieter Ungermann, Alena Patschin und Bettina Brune, alle Technische Universität Dortmund beleuchten in diesem Beitrag einige Besonderheiten, die für die Planung von Turm- und Mastbauwerken relevant sind, wie Lastansätze (Lasteinwirkungen aus Wind und Eis, Betriebslasten und windbedingte Schwingungseffekte), Bemessungsmodelle und Nachweiskriterien. Hierbei werden gezielt auch strittige Regelungen aufgegriffen und, soweit möglich, hierzu Stellung genommen, indem aktuelle Forschungsarbeiten des Institutes für Stahlbau sowie des Centers for Wind and Earthquake Engineering (CWE) der RWTH Aachen herangezogen werden. Auf die europäischen Regeln für Türme, Maste und Schornsteine (Eurocode 3-3-1 bzw. 3-3-2) wird an den passenden Stellen Bezug genommen. Für die verschiedenen Einsatzgebiete von Masten, wie zum Beispiel für Windkraftanlagen oder

für Freileitungen, gibt es zum Teil parallele Normungsregelungen und spezielle technische Anforderungen aus der Nutzung. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf die kommende Normengeneration prEN 1993-3 und deren Änderungen gegenüber den gültigen Regelungen.

Ich darf mich im Namen des Verlags Ernst & Sohn bei allen Autoren ganz herzlich für ihre qualitativ hochwertige Arbeit bedanken. Den Mitarbeitern des Verlags und im Institut danke ich besonders für ihren großen Einsatz, der trotz aller Schwierigkeiten ein pünktliches Erscheinen des Kalenders möglich macht. Damit bietet der Kalender wieder einen hervorragenden Überblick zu den Schwerpunktthemen Türme und Maste und Brandschutz.

Am **Freitag, 24. Juni 2022** wird der diesjährige Stahlbau-Kalender-Tag in Stuttgart stattfinden, zu dem wir alle Interessierten herzlich einladen. Auch wenn sich gezeigt hat, dass eine Online-Veranstaltung möglich und gut ist, hoffen wir doch sehr, in diesem Jahr wieder in Präsenz tagen zu können. In jedem Fall werden die Autoren dieser Ausgabe zu ihren Themen live vortragen und für Diskussionen zur Verfügung stehen.

Stuttgart, Februar 2022
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Inhaltsverzeichnis

Vorwort III

Autor:innenverzeichnis XXI

1 Stahlbaunormen

DIN EN 1993-1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau 1

Ulrike Kuhlmann, Fabian Jörg

| | | | | |
|---|----|-------|--|----|
| Anmerkung zum Abdruck von DIN EN 1993-1-1 | 5 | 2.2 | Grundsätzliches zur Bemessung mit Grenzzuständen | 17 |
| Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau | 5 | 2.3 | Basisvariable | 18 |
| Nationales Vorwort | 5 | 2.3.1 | Einwirkungen und Umgebungseinflüsse | 18 |
| Hintergrund des Eurocode-Programms | 5 | 2.3.2 | Werkstoff- und Produkteigenschaften | 18 |
| Status und Gültigkeitsbereich der Eurocodes | 6 | 2.4 | Nachweisverfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten | 18 |
| Nationale Fassungen der Eurocodes | 6 | 2.4.1 | Bemessungswerte von Werkstoffeigenschaften | 18 |
| Verbindung zwischen den Eurocodes und den harmonisierten Technischen Spezifikationen für Bauprodukte (EN und ETAZ) | 7 | 2.4.2 | Bemessungswerte der geometrischen Größen | 18 |
| Besondere Hinweise zu EN 1993-1 | 7 | 2.4.3 | Bemessungswerte der Beanspruchbarkeit | 18 |
| Nationaler Anhang zu EN 1993-1-1 | 7 | 2.4.4 | Nachweis der Lagesicherheit (EQU) | 19 |
| 1 Allgemeines | 8 | 2.5 | Bemessung mit Hilfe von Versuchen | 19 |
| 1.1 Anwendungsbereich | 8 | 3 | Werkstoffe | 19 |
| 1.1.1 Anwendungsbereich von Eurocode 3 | 8 | 3.1 | Allgemeines | 19 |
| 1.1.2 Anwendungsbereich von Eurocode 3 Teil 1-1 | 9 | 3.2 | Baustahl | 20 |
| 1.2 Normative Verweisungen | 10 | 3.2.1 | Werkstoffeigenschaften | 20 |
| 1.2.1 Allgemeine normative Verweisungen | 10 | 3.2.2 | Anforderungen an die Duktilität | 22 |
| 1.2.2 Normative Verweisungen zu schweißgeeigneten Baustählen | 10 | 3.2.3 | Bruchzähigkeit | 22 |
| 1.3 Annahmen | 10 | 3.2.4 | Eigenschaften in Dickenrichtung | 22 |
| 1.4 Unterscheidung nach Grundsätzen und Anwendungsregeln | 10 | 3.2.5 | Toleranzen | 23 |
| 1.5 Begriffe | 10 | 3.2.6 | Bemessungswerte der Materialkonstanten | 23 |
| 1.5.1 Tragwerk | 10 | 3.3 | Verbindungsmittel | 23 |
| 1.5.2 Teiltragwerke | 10 | 3.3.1 | Schrauben, Bolzen, Nieten | 23 |
| 1.5.3 Art des Tragwerks | 10 | 3.3.2 | Schweißwerkstoffe | 23 |
| 1.5.4 Tragwerksberechnung | 11 | 3.4 | Andere vorgefertigte Produkte im Hochbau | 23 |
| 1.5.5 Systemlänge | 11 | 4 | Dauerhaftigkeit | 23 |
| 1.5.6 Knicklänge | 11 | 5 | Tragwerksberechnung | 24 |
| 1.5.7 mittragende Breite | 11 | 5.1 | Statische Systeme | 24 |
| 1.5.8 Kapazitätsbemessung | 11 | 5.1.1 | Grundlegende Annahmen | 24 |
| 1.5.9 Bauteil mit konstantem Querschnitt | 11 | 5.1.2 | Berechnungsmodelle für Anschlüsse | 25 |
| 1.6 Formelzeichen | 11 | 5.1.3 | Bauwerks-Boden-Interaktion | 25 |
| 1.7 Definition der Bauteilachsen | 15 | 5.2 | Untersuchung von Gesamttragwerken | 25 |
| 2 Grundlagen für die Tragwerksplanung | 16 | 5.2.1 | Einflüsse der Tragwerksverformung | 25 |
| 2.1 Anforderungen | 16 | 5.2.2 | Stabilität von Tragwerken | 27 |
| 2.1.1 Grundlegende Anforderungen | 16 | 5.3 | Imperfektionen | 29 |
| 2.1.2 Behandlung der Zuverlässigkeit | 17 | 5.3.1 | Grundlagen | 29 |
| 2.1.3 Nutzungsdauer, Dauerhaftigkeit und Robustheit | 17 | 5.3.2 | Imperfektionen für die Tragwerksberechnung | 29 |

| | | | | | |
|--------|---|----|---|--|----|
| 5.3.3 | Imperfektionen zur Berechnung aussteifender Systeme | 33 | 7.2 | Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für den Hochbau | 69 |
| 5.3.4 | Bauteilimperfectionen | 34 | 7.2.1 | Vertikale Durchbiegung | 69 |
| 5.4 | Berechnungsmethoden | 35 | 7.2.2 | Horizontale Verformungen | 69 |
| 5.4.1 | Allgemeines | 35 | 7.2.3 | Dynamische Einflüsse | 69 |
| 5.4.2 | Elastische Tragwerksberechnung | 35 | Anhang A (informativ) | | 70 |
| 5.4.3 | Plastische Tragwerksberechnung | 36 | Verfahren 1: Interaktionsbeiwerte k_{ij} für die Interaktionsformel in 6.3.3(4) | | 70 |
| 5.5 | Klassifizierung von Querschnitten | 36 | Anhang B (informativ) | | 72 |
| 5.5.1 | Grundlagen | 36 | Verfahren 2: Interaktionsbeiwerte k_{ij} für die Interaktionsformel in 6.3.3(4) | | 72 |
| 5.5.2 | Klassifizierung | 36 | Anhang AB (informativ) | | 73 |
| 5.6 | Anforderungen an Querschnittsformen und Aussteifungen am Ort der Fließgelenkbildung | 37 | Zusätzliche Bemessungsregeln | | 73 |
| 6 | Grenzzustände der Tragfähigkeit | 41 | AB.1 | Statische Berechnung unter Berücksichtigung von Werkstoff-Nichtlinearitäten | 73 |
| 6.1 | Allgemeines | 41 | AB.2 | Vereinfachte Belastungsanordnung für durchlaufende Decken | 73 |
| 6.2 | Beanspruchbarkeit von Querschnitten | 41 | Anhang BB (informativ) | | 73 |
| 6.2.1 | Allgemeines | 41 | Knicken von Bauteilen in Tragwerken des Hochbaus | | 73 |
| 6.2.2 | Querschnittswerte | 43 | BB.1 | Biegeknicken von Bauteilen von Fachwerken oder Verbänden | 73 |
| 6.2.3 | Zugbeanspruchung | 44 | BB.1.1 | Allgemeines | 73 |
| 6.2.4 | Druckbeanspruchung | 45 | BB.1.2 | Gitterstäbe aus Winkelprofilen | 74 |
| 6.2.5 | Biegebeanspruchung | 45 | BB.1.3 | Bauteile mit Hohlprofilen | 75 |
| 6.2.6 | Querkraftbeanspruchung | 45 | BB.2 | Kontinuierliche seitliche Abstützungen | 75 |
| 6.2.7 | Torsionsbeanspruchung | 47 | BB.2.1 | Kontinuierliche seitliche Stützung | 75 |
| 6.2.8 | Beanspruchung aus Biegung und Querkraft | 48 | BB.2.2 | Kontinuierliche Drehbehinderung | 75 |
| 6.2.9 | Beanspruchung aus Biegung und Normalkraft | 48 | BB.3 | Größtabstände bei Abstützmaßnahmen für Bauteile mit Fließgelenken gegen Knicken aus der Ebene | 77 |
| 6.2.10 | Beanspruchung aus Biegung, Querkraft und Normalkraft | 50 | BB.3.1 | Gleichförmige Bauteile aus Walzprofilen oder vergleichbaren geschweißten I-Profilen | 77 |
| 6.3 | Stabilitätsnachweise für Bauteile | 51 | BB.3.2 | Voutenförmige Bauteile, die aus Walzprofilen oder vergleichbaren, geschweißten I-Profilen bestehen | 79 |
| 6.3.1 | Gleichförmige Bauteile mit planmäßig zentrischem Druck | 51 | BB.3.3 | Modifikationsfaktor für den Momentenverlauf | 80 |
| 6.3.2 | Gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse | 54 | Anhang C (normativ) | | 82 |
| 6.3.3 | Auf Biegung und Druck beanspruchte gleichförmige Bauteile | 59 | Auswahl der Ausführungsklasse | | 82 |
| 6.3.4 | Allgemeines Verfahren für Knick- und Biegedrillknicknachweise für Bauteile | 61 | C.1 | Allgemeines | 82 |
| 6.3.5 | Biegedrillknicken von Bauteilen mit Fließgelenken | 63 | C.1.1 | Grundanforderungen | 82 |
| 6.4 | Mehrteilige Bauteile | 64 | C.1.2 | Ausführungsklasse | 82 |
| 6.4.1 | Allgemeines | 64 | C.2 | Auswahlverfahren | 83 |
| 6.4.2 | Gitterstützen | 67 | C.2.1 | Maßgebende Faktoren | 83 |
| 6.4.3 | Stützen mit Bindeblechen (Rahmenstützen) | 67 | C.2.2 | Auswahl | 83 |
| 6.4.4 | Mehrteilige Bauteile mit geringer Spreizung | 68 | Literatur zu den Kommentaren | | 85 |
| 7 | Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit | 69 | | | |
| 7.1 | Allgemeines | 69 | | | |

2 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Normen und Bescheide im Stahlbau 87 Karsten Kathage, Christoph Ortmann

| | | | |
|-----|--|-------|---|
| 1 | Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) 89 | 3.1.1 | Verzeichnis Sachgebiet Verbundbau 144 |
| | | 3.1.2 | Verzeichnis Sachgebiet Metallbau – Werkstoffe 146 |
| 2 | Normen und Richtlinien für den Stahlbau 138 | 3.1.3 | Verzeichnis Sachgebiet Metallbau und Metallbauarten 149 |
| 3 | Bescheide des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt (Stand: November 2021) 144 | 3.1.4 | Verzeichnis Sachgebiet Gerüste 179 |
| 3.1 | Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen/ allgemeine Bauartgenehmigungen 144 | 3.2 | Europäische Technische Bewertungen 191 |

3 Neue Entwicklungen in prEN 1993-1-2:2020 203 Markus Knobloch, Sara Uszball, Lukas Schaper, Martin Mensinger

| | | | |
|---------|---|---------|--|
| 1 | Einleitung 205 | 4.3.4 | Kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung bei Bauteilen mit Querschnitten der Klasse 4 229 |
| 1.1 | Zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahlkonstruktionen 205 | | |
| 1.2 | Entstehung der neuen Normengeneration 207 | 4.4 | Aktuelle Forschungen 231 |
| 1.3 | Überblick über die Änderungen 209 | 4.4.1 | Stahlbauteile unter Druck und Biegung 231 |
| 2 | Werkstoffeigenschaften 210 | 4.4.1.1 | Grundlage der Untersuchungen 231 |
| 2.1 | Neuer Normentext 210 | 4.4.1.2 | Anpassung der Abminderungsfaktoren für Biegeknicken und Biegedrillknicken 231 |
| 2.2 | Hintergrund der Änderung 212 | 4.4.1.3 | Anpassung der Interaktionsfaktoren 233 |
| 2.2.1 | Allgemeines 212 | 4.4.1.4 | Statistische Auswertung 235 |
| 2.2.2 | Erweiterung der Anwendungsgrenzen 212 | 4.4.1.5 | Fazit 235 |
| 3 | Emissivität feuerverzinkter Stahlbauteile 215 | 4.4.2 | Biegedrillknicken als Knicken des Druckgurts 235 |
| 3.1 | Neuer Normentext 215 | 4.4.2.1 | Einleitung 235 |
| 3.2 | Hintergrund der Überarbeitung 215 | 4.4.2.2 | Methodik 236 |
| 3.2.1 | Allgemeines 215 | 4.4.2.3 | Überarbeitung des Verfahrens 237 |
| 3.2.2 | Emissivität 215 | 4.4.2.4 | Statistische Auswertung 238 |
| 3.2.3 | Feuerverzinkung 216 | 4.4.2.5 | Fazit 239 |
| 3.2.4 | Emissivität feuerverzinkter Stahlkonstruktionen 216 | 5 | Erweiterte Bemessungsverfahren 239 |
| 3.2.5 | Versuche an der TUM 216 | 5.1 | Neuer Normentext 239 |
| 3.2.5.1 | Kleinbrandversuche 216 | 5.2 | Brandbemessung mit erweiterten Bemessungsverfahren 240 |
| 3.2.5.2 | Großbrandversuche 217 | | |
| 3.2.6 | Zweistufiges Emissionsgrad-Konzept 218 | 6 | Anhang C Nichtrostender Stahl 242 |
| 3.2.7 | Nachweisführung feuerverzinkter Stahlbauteile im Brandfall 218 | 6.1 | Neuer Normentext 242 |
| 4 | Vereinfachte Bemessungsverfahren 219 | 6.2 | Allgemeines 251 |
| 4.1 | Neuer Normentext 219 | 6.3 | Thermische Werkstoffeigenschaften 252 |
| 4.2 | Allgemeines zur vereinfachten Brandbemessung von stabilitätsgefährdeten Bauteilen 226 | 6.3.1 | Wärmeleitfähigkeit von nichtrostendem Stahl 252 |
| 4.3 | Vereinfachte Bemessung von Klasse-4-Querschnitten 227 | 6.3.2 | Spezifische Wärmekapazität von nichtrostendem Stahl 253 |
| 4.3.1 | Allgemeines 227 | 6.4 | Mechanische Werkstoffeigenschaften 254 |
| 4.3.2 | Wirksame Querschnittswerte 228 | 6.4.1 | Spannungs-Dehnungs-Beziehung von nichtrostendem Stahl bei erhöhten Temperaturen 254 |
| 4.3.3 | Imperfektionsbeiwert für Stützen und Träger mit Querschnitten der Klasse 4 228 | 6.4.2 | Thermische Dehnung von nichtrostendem Stahl 255 |
| | | 6.5 | Vereinfachtes Bemessungsverfahren 256 |
| | | 6.5.1 | Allgemeines 256 |
| | | 6.5.2 | Querschnittsklassifizierung 256 |

| | | | |
|---------|---|-------|--|
| 6.5.3 | Beanspruchbarkeit von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl nach vereinfachtem Bemessungsverfahren für den Brandfall 258 | 7.4 | Geschweißte Hohlprofile 264 |
| 6.5.3.1 | Biegeknicken 258 | 8 | Anhang E Träger mit großen Stegöffnungen 267 |
| 6.5.3.2 | Biegedrillknicken 260 | 8.1 | Neuer Normentext 267 |
| 6.5.3.3 | Kombinierte Druck- und Biegebeanspruchung 260 | 8.2 | Träger mit großen Stegöffnungen 270 |
| 7 | Anhang D Verbindungen 262 | 8.2.1 | Allgemeines 270 |
| 7.1 | Neuer Normentext 262 | 8.2.2 | Definitionen nach prEN 1993-1-13 270 |
| 7.2 | Allgemeines 263 | 8.3 | Thermisches Verhalten 270 |
| 7.3 | Temperaturen von Verbindungen im Brandfall 263 | 8.4 | Mechanisches Verhalten 271 |
| | | 9 | Zusammenfassung und Ausblick 272 |
| | | 10 | Literatur 272 |

4 Brandschutztechnische Bemessung von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton 279

Peter Schaumann, Maximilian Mund, Inka Pehrs

| | | | |
|-------|---|--------|---|
| 1 | Einleitung 281 | 6.2 | Bemessungstools für die Anwendung vereinfachter Bemessungsverfahren 305 |
| 2 | Brandschutztechnische Anforderungen 282 | 6.3 | Allgemeine Berechnungsverfahren 305 |
| 2.1 | Allgemeines 282 | 6.4 | Software-Validierung nach DIN EN 1991-1-2/NA, Anhang CC 308 |
| 2.2 | Regelbau 283 | 6.4.1 | Allgemeines 308 |
| 2.3 | Sonderbau 283 | 6.4.2 | SAFIR 309 |
| 3 | Einwirkungen 285 | 6.4.3 | Zusammenfassung 312 |
| 3.1 | Allgemeines 285 | 7 | Zusammenfassung und Ausblick 312 |
| 3.2 | Thermische Einwirkungen 285 | 8 | Literatur 313 |
| 3.2.1 | Wärmetransportmechanismen 285 | 8.1 | Normen und Richtlinien 313 |
| 3.2.2 | Nominelle Temperaturzeitkurven 287 | 8.2 | Veröffentlichungen 314 |
| 3.2.3 | Naturbrandszenarien 287 | 8.3 | Software 315 |
| 3.3 | Mechanische Einwirkungen 288 | 9 | Beispielrechnung 1: Bemessung einer Verbunddecke nach DIN EN 1994-1-2 316 |
| 4 | Materialeigenschaften unter erhöhten Temperaturen 289 | 9.1 | Aufgabenstellung 316 |
| 4.1 | Allgemeines 289 | 9.2 | Einwirkungen im Brandfall 316 |
| 4.2 | Thermische Materialkennwerte 290 | 9.3 | Überprüfung der Anwendungsgrenzen 317 |
| 4.2.1 | Wärmeleitfähigkeit 290 | 9.4 | Kriterium des Raumabschlusses „E“ 317 |
| 4.2.2 | Wärmekapazität 291 | 9.5 | Wärmedämmkriterium „I“ 317 |
| 4.2.3 | Thermische Dehnung 291 | 9.6 | Tragfähigkeitskriterium „R“ – Momententragfähigkeit 318 |
| 4.2.4 | Thermische Materialeigenschaften von Brandschutzmaterialien 292 | 9.6.1 | Allgemeines 318 |
| 4.3 | Mechanische Materialkennwerte 293 | 9.6.2 | Temperaturen im Querschnitt 319 |
| 4.3.1 | Allgemeines 293 | 9.6.3 | Ermittlung der plastische Momententragfähigkeit $M_{f,Rd}^+$ 321 |
| 4.3.2 | Bau- und Betonstahl 293 | 9.7 | Tragfähigkeitskriterium „R“ – Längsschubtragfähigkeit 322 |
| 4.3.3 | Beton 294 | 9.8 | Ergebnis 324 |
| 4.4 | Aufbereitung in der Numerik 294 | 10 | Beispielrechnung 2: Bemessung eines Verbundträgers nach DIN EN 1994-1-2 324 |
| 5 | Bemessung nach DIN EN 1994-1-2 296 | 10.1 | Aufgabenstellung 324 |
| 5.1 | Allgemeines 296 | 10.2 | Nachweis nach EC4-1-2 – Bemessungstabellen 325 |
| 5.2 | Bemessungstabellen 296 | 10.3 | Nachweis mittels vereinfachter Bemessungsverfahren 327 |
| 5.3 | Vereinfachte Bemessungsverfahren 297 | 10.3.1 | Allgemeines 327 |
| 5.3.1 | Allgemeines 297 | | |
| 5.3.2 | Verbunddecken 297 | | |
| 5.3.3 | Verbundträger 299 | | |
| 5.3.4 | Verbundstützen 301 | | |
| 6 | Computergestützte Bemessung von Verbundtragwerken 304 | | |
| 6.1 | Allgemeines 304 | | |

| | | | |
|----------|--|--------|--|
| 10.3.2 | Bestimmung von $M_{pl,Rd}^+$ für den Brandfall 328 | 11.4.2 | Ermittlung der effektiven Biegesteifigkeit im Brandfall 337 |
| 10.3.3 | Nachweis der Querkrafttragfähigkeit 333 | 11.5 | Ermittlung des Bemessungswertes der Knicklast im Brandfall 338 |
| 11 | Beispielrechnung 3: Bemessung einer betongefüllten Stahlhohlprofilstütze nach DIN EN 1994-1-2, Anhang F* 334 | 11.6 | Nachweis 338 |
| 11.1 | Aufgabenstellung 334 | 12 | Beispielrechnung 4: Bemessung eines Flachdeckenträgers nach DIN EN 1994-1-2, Anhang H* 338 |
| 11.2 | Überprüfung der Anwendungsgrenzen 335 | 12.1 | Aufgabenstellung 338 |
| 11.3 | Ermittlung der äquivalenten Temperaturen der Querschnittsteile 335 | 12.2 | Überprüfung der Anwendungsgrenzen 339 |
| 11.4 | Axiale Bemessungslast bei erhöhten Temperaturen 336 | 12.3 | Ermittlung der äquivalenten Temperaturen der Querschnittsteile 340 |
| 11.4.1 | Ermittlung des Bemessungswertes des plastischen Widerstands 336 | 12.4 | Plastische Momententragfähigkeit im Feld 341 |
| | | 12.5 | Nachweis 344 |
| 5 | Einwirkungen im Brandfall nach Eurocode 1 345 | | |
| | Jochen Zehfuß | | |
| 1 | Einführung 347 | 4.4 | Bestimmung der Brandeinwirkungen lokaler Brände 356 |
| 2 | Einwirkungen im Lastfall Brand 347 | 4.4.1 | Allgemeines 356 |
| 2.1 | Allgemeine Grundlagen 347 | 4.4.2 | Berechnung der Brandeinwirkungen für Bauteile außerhalb des Brandherds 356 |
| 2.2 | Thermische Einwirkungen durch Wärmeübergang 348 | 4.5 | Erweiterte Brandmodelle 358 |
| 2.3 | Mechanische Einwirkungen 349 | 4.6 | Anwendung von Naturbrandmodellen 359 |
| 3 | Bemessungsbrände 350 | 4.6.1 | Allgemeines 359 |
| 3.1 | Allgemeines 350 | 4.6.2 | Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate 359 |
| 3.2 | Nominelle Temperaturzeitkurven 353 | 4.6.3 | Ermittlung der Bemessungswerte 360 |
| 3.3 | Naturbrandmodelle 353 | 5 | Anwendungsbeispiele 363 |
| 4 | Leistungsorientierte Festlegung der Brandeinwirkungen 353 | 5.1 | Beispiel 1: Vollentwickelter Raumbrand 363 |
| 4.1 | Vorbemerkung 353 | 5.2 | Beispiel 2: Lokaler Brand mit Stütze außerhalb des Plumes 364 |
| 4.2 | Vereinfachtes Naturbrandmodell für vollentwickelte Raumbrände 354 | 6 | Literatur 366 |
| 4.3 | Brandeinwirkungen auf außenliegende Bauteile 355 | | |
| 6 | Reaktive Brandschutzsysteme 367 | | |
| | Sascha Hothan, Dustin Häßler | | |
| 1 | Einleitung 369 | 4 | Regelungen 376 |
| 2 | Technologische Grundlagen 369 | 4.1 | Nationale und europäische Zulassungen 376 |
| 2.1 | Grundlagen und Wirkungsweise 369 | 4.2 | Anwendung auf Grundlage bauaufsichtlicher Regelungen und Zulassungen 377 |
| 2.2 | Typen und Chemie 370 | 4.2.1 | Biegebeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil 378 |
| 2.3 | Applikation 370 | 4.2.2 | Druckbeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil 379 |
| 3 | Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit 371 | 4.2.3 | Zugbeanspruchte Bauteile mit offenem oder rechteckigem geschlossenem Profil 379 |
| 3.1 | Bauteilgeometrie 371 | 4.2.4 | Zugbeanspruchte Bauteile mit Vollprofil oder kreisrundem geschlossenem Profil 380 |
| 3.2 | Mechanische Beanspruchung 373 | 4.2.5 | Bauteile mit kombinierter mechanischer Beanspruchung 382 |
| 3.3 | Mehrdimensionale Beanspruchung 373 | | |
| 3.4 | Einbaulage 375 | | |
| 3.5 | Trockenschichtdicke 375 | | |
| 3.6 | Einwirkende Temperatur-Zeit-Kurve 375 | | |

| | | | | | |
|----------|---|------------|-------|--|-----|
| 5 | Novellierungen im Normenwerk | 382 | 6.3 | Sanierung und Ausbesserung | 389 |
| 5.1 | Allgemeines zur Normenreihe EN 13381 und zur Gremienzuständigkeit | 382 | 6.4 | Zustandsermittlung und Ertüchtigungsmaßnahmen | 389 |
| 5.2 | Träger und Stützen aus Stahl – EN 13381-8 | 382 | 7 | Aus der Forschung | 390 |
| 5.3 | Zugglieder aus Stahlvollprofilen – EN 13381-10 und neuer Normenteil zu EN 13381 | 383 | 7.1 | Allgemeines | 390 |
| 5.4 | Bauteile aus Aluminium | 384 | 7.2 | Abgeschlossene Forschung | 390 |
| 5.5 | Produktnorm | 384 | 7.2.1 | Verwendung auf Zugstabssystemen und Anschlusskonstruktionen | 390 |
| 6 | Dauerhaftigkeit | 385 | 7.2.2 | Einfluss unterschiedlicher Temperatur-Zeit-Kurven | 391 |
| 6.1 | Exposition und Schädigungsmechanismen | 385 | 7.2.3 | Einfluss der Oberflächenkrümmung | 393 |
| 6.2 | Nachweise der Dauerhaftigkeit | 385 | 7.2.4 | Alterungs- und Witterungsbeständigkeit | 393 |
| 6.2.1 | Allgemeines | 385 | 7.3 | Laufende Forschung | 394 |
| 6.2.2 | Europäisches Verfahren nach EAD | 386 | 7.3.1 | Prüfnorm für Stahlzugglieder | 394 |
| 6.2.3 | Verfahren nach nationalen Zulassungsgrundsätzen des DIBt | 388 | 7.3.2 | Dauerhaftigkeit und Feuerwiderstand | 395 |
| 6.2.4 | Vergleich und Bewertung | 388 | 7.3.3 | In-situ-Prüfverfahren | 396 |
| | | | 7.4 | Ausblick | 397 |
| | | | 8 | Literatur | 398 |
| 7 | Praxisbeispiele zu erfolgreichen Brandschutzlösungen | 401 | | | |
| | Jochen Zehfuß, Jörg Sothmann, Georg Spennes, Jens Upmeyer, Michael Winkler, Olga Molochnikova | | | | |
| 1 | Überblick | 403 | 3.4 | Thermische Einwirkungen im Brandfall | 411 |
| 2 | Theater Wiesendamm in Hamburg – Brandschutznachweis für eine 100-jährige Stahlkonstruktion | 403 | 3.5 | Nachweis des Feuerwiderstands | 414 |
| 2.1 | Projektbeschreibung | 403 | 3.6 | Ausführung | 415 |
| 2.2 | Beschreibung der besonderen brandschutztechnischen Fragestellung | 404 | 3.7 | Zusammenfassung | 416 |
| 2.3 | Brandszenarien | 405 | 4 | Brandschutznachweis für Raumzellengebäude in Stahlkonstruktion | 416 |
| 2.3.1 | Brandszenario der Stützengruppe G2 – Foyer | 405 | 4.1 | Projektbeschreibung | 416 |
| 2.3.2 | Brandszenario der Stützengruppe G3 – notwendiger Flur | 405 | 4.2 | Beschreibung der besonderen brandschutztechnischen Fragestellung | 417 |
| 2.4 | Thermische Einwirkungen im Brandfall | 405 | 4.2.1 | Allgemeines | 417 |
| 2.4.1 | Stützengruppe G2 – Foyer | 405 | 4.2.2 | Nutzung/Nutzerzahl | 417 |
| 2.4.2 | Stützengruppe G3 – notwendiger Flur | 407 | 4.2.3 | Bauordnungsrechtliche Einordnung | 418 |
| 2.5 | Nachweis des Feuerwiderstands | 407 | 4.2.4 | Schutzziel | 419 |
| 2.5.1 | Allgemeines | 407 | 4.2.5 | Angewandte Berechnungsverfahren und Simulationen | 419 |
| 2.5.2 | Versuchsdurchführung | 407 | 4.2.6 | Schutzzielorientierter Nachweis für Tragwerk und Raumabschluss | 419 |
| 2.5.3 | Versuchsauswertung (erhöhte Temperaturen) | 408 | 4.2.7 | Konstruktionsmerkmale | 419 |
| 2.6 | Ausführung (Stahlbau) | 408 | 4.3 | Baurechtlicher Abgleich / Erleichterungen | 419 |
| 2.7 | Zusammenfassung | 409 | 4.4 | Nachweis des Feuerwiderstands | 421 |
| 3 | Neubau eines Parkhauses in Stahl- und Stahlverbundbauweise | 409 | 4.4.1 | Allgemeines | 421 |
| 3.1 | Projektbeschreibung | 409 | 4.4.2 | Thermische Bauteilanalyse | 421 |
| 3.2 | Beschreibung der besonderen brandschutztechnischen Fragestellung | 410 | 4.4.3 | Mechanische Bauteilanalyse | 424 |
| 3.3 | Brandszenarien | 410 | 4.5 | Raumabschluss | 424 |
| | | | 4.6 | Zusammenfassung | 424 |
| | | | 5 | Literatur | 424 |

8 Bewertung und Instandsetzung von Altstahlkonstruktionen 427Richard Stroetmann, Lars Sieber, Andreas Taras, Thomas Riedel
unter Mitarbeit von Jürgen Anders, Gerd Kuscher

- | | | | | | |
|-------|---|-----|-------|---|-----|
| 1 | Allgemeines | 431 | 5 | Bewertung der Sprödbbruchneigung genieteter Stahlkonstruktionen aus Flusstahl | 473 |
| 2 | Verfahren zur Stahlherstellung und Entwicklung der Normung | 434 | 5.1 | Einführung | 473 |
| 2.1 | Roheisenerzeugung und Verwendung von Koks | 434 | 5.2 | Sprödbrechtsicherheit von Bauteilen | 474 |
| 2.2 | Industrielle Stahlerzeugung mit dem Puddelverfahren | 437 | 5.2.1 | Wahl der Stahlgütegruppe nach der DAST-Richtlinie 009 von 1973 | 474 |
| 2.3 | Flusstahlerzeugung nach dem Bessemer-Verfahren | 438 | 5.2.2 | Sprödbrechtsicherheit nach EN 1993-1-10 | 474 |
| 2.4 | Flusstahlerzeugung nach dem Thomas-Verfahren | 439 | 5.2.3 | Bewertung der Sprödbbruchneigung von Bauteilen in Stahlgitter-Freileitungsmasten | 475 |
| 2.5 | Siemens-Martin-Verfahren | 439 | 5.3 | Bruchmechanische Sicherheitsanalyse | 476 |
| 2.6 | Linz-Donawitz-Verfahren | 441 | 5.3.1 | Grundlagen bruchmechanischer Nachweiskonzepte | 476 |
| 2.7 | Verfahrensanteile der Stahlproduktion | 441 | 5.3.2 | Spannungsintensitätsfaktoren für Lochstäbe | 477 |
| 2.7.1 | Weltstahlproduktion | 441 | 5.3.3 | Plastische Grenzlaster von Bauteilen mit Querschnittsschwächungen durch Risse | 480 |
| 2.7.2 | Deutschland vor dem 2. Weltkrieg | 441 | 5.3.4 | Annahme eines rissartigen Fehlers in alten Stahlkonstruktionen | 480 |
| 2.7.3 | Das geteilte Deutschland nach dem 2. Weltkrieg | 442 | 5.4 | Bruchzähigkeit alter Baustähle | 481 |
| 2.8 | Entwicklung der Normung für Baustähle in Deutschland | 443 | 5.4.1 | Bruchmechanische Zähigkeit – Referenztemperatur nach dem Master-Curve-Konzept | 482 |
| 3 | Werkstoffeigenschaften alter Baustähle | 444 | 5.4.2 | Vergleich mit Werkstoffdaten früherer Untersuchungen | 483 |
| 3.1 | Metallurgische Besonderheiten aus dem Herstellungsverfahren | 444 | 5.4.3 | Zusammenhang zwischen Werkstoffzähigkeit und Stahlgüte | 483 |
| 3.2 | Chemische Zusammensetzung | 445 | 5.4.4 | Korrelationen der Werkstoffzähigkeit | 484 |
| 3.3 | Mechanisch-technologische Kennwerte | 447 | 5.5 | Anwendungsbeispiele | 486 |
| 4 | Verbindungstechnik | 451 | 5.5.1 | Allgemeines | 486 |
| 4.1 | Nietverbindungen | 451 | 5.5.2 | Anschlüsse in einem Stahlgittermast | 486 |
| 4.1.1 | Allgemeines | 451 | 5.5.3 | Geschweißter Anschluss des Zuggurts eines Fachwerkträgers | 487 |
| 4.1.2 | Normen und Stahlsorten für Niete | 452 | 6 | Ermüdungsfestigkeit und Restlebensdauer genieteter Bauteile | 491 |
| 4.1.3 | Abmessungen genormter Niete | 454 | 6.1 | Allgemeines und Inhalt des Abschnitts | 491 |
| 4.1.4 | Nachweis von Nietverbindungen | 457 | 6.2 | Gleitwiderstand genieteter Verbindungen | 492 |
| 4.1.5 | Herstellen der Nietverbindungen | 457 | 6.3 | Ermüdungsfestigkeit genieteter Bauteile | 494 |
| 4.1.6 | Arbeits- und Verfahrensprüfungen an ein- und mehrschnittigen Verbindungen | 459 | 6.3.1 | Einflussfaktoren | 494 |
| 4.1.7 | Inspektion und Abnahme von Nietverbindungen | 461 | 6.3.2 | Versuchsergebnisse und statistische Auswertung | 496 |
| 4.1.8 | Alternativen zur Niettechnik | 462 | 6.3.3 | Statistische Auswertung | 498 |
| 4.2 | Schweißen alter Baustähle | 463 | 6.3.4 | Kerbfalkatalog | 499 |
| 4.2.1 | Schweißbarkeit | 463 | 6.4 | Vorgehensweise bei der Ermittlung der Restlebensdauer auf Basis des Kerbfalkatalogs | 501 |
| 4.2.2 | Schweißseignung | 464 | 6.4.1 | Grundlegendes | 501 |
| 4.2.3 | Schweißen von Kehlnähten | 465 | | | |
| 4.2.4 | Schweißen von Stumpfnähten | 466 | | | |
| 4.2.5 | Empfohlene Werkstoffanalysen zur Bewertung der Schweißseignung | 469 | | | |
| 4.2.6 | Empfehlungen zur Vorbereitung und Ausführung der Schweißarbeiten | 470 | | | |
| 4.2.7 | Anwendungsbeispiele | 471 | | | |

| | | | | | |
|--|--|-----|---------|---|------------|
| 6.4.2 | Schadensäquivalentes Schadensspiel $\Delta\sigma_E$ – Anwendungsfall Eisenbahnbrücken | 502 | 7.3.2.1 | Korrelation und Verteilung der Paris-Parameter | 510 |
| 6.4.3 | Nachweisformat und Berechnungsschritte | 505 | 7.3.2.2 | Abhängigkeit bruchmechanischer Materialkennwerte vom Verhältnis $R = K_{\min}/K_{\max}$ | 512 |
| 7 | Ermittlung von Inspektionsintervallen auf Basis von Risswachstumsberechnungen | 506 | 7.4 | Zyklische Beanspruchung von Eisenbahnbrücken | 513 |
| 7.1 | Einführung | 506 | 7.5 | Risswachstum in Nietverbindungen | 514 |
| 7.2 | Risswachstum unter zyklischen Beanspruchungen | 507 | 7.5.1 | Einflussfaktor Verkehrslast | 515 |
| 7.3 | Bruchmechanische Materialparameter von Altstahl | 508 | 7.5.2 | Einfluss der bruchmechanischen Materialparameter | 515 |
| 7.3.1 | Literaturwerte | 508 | 7.5.3 | Einflussfaktor Konstruktionsdetail | 516 |
| 7.3.2 | Neuere, experimentell bestimmte Rissfortschrittskennwerte für Flusstahl | 509 | 7.6 | Anwendung | 517 |
| | | | 7.6.1 | Anwendungsbeispiel | 517 |
| | | | 7.6.2 | Betriebszeitintervallnachweis nach DB-Richtlinie 805.202 | 520 |
| | | | 8 | Literatur | 520 |
| | | | | | |
| 9 | Nachweis von Einzel- und mehrteiligen Stäben aus gewalzten gleichschenkligen Winkelprofilen | | | | 527 |
| André Beyer, Marios-Zois Bezas, Jean-Pierre Jaspard, Ioannis Vayas | | | | | |
| 1 | Einleitung | 531 | 5 | Stabilitätsnachweis für Stäbe aus Einzelwinkelprofilen | 544 |
| 2 | Formelzeichen – Querschnittseigenschaften | 535 | 5.1 | Allgemeines | 544 |
| 3 | Klassifizierung von Querschnitten | 537 | 5.2 | Planmäßig zentrischer Druck | 544 |
| 3.1 | Bemessungsvorschlag | 537 | 5.2.1 | Beanspruchbarkeit gegenüber Biegeknicken | 544 |
| 3.2 | Herleitung und Validierung der c/t -Grenzwerte für die Querschnittsklassen | 537 | 5.2.2 | Herleitung und Validierung des Bemessungsvorschlags | 545 |
| 3.2.1 | Allgemeines | 537 | 5.2.2.1 | Experimentelle Validierung – Labortests der Tsinghua University | 545 |
| 3.2.2 | Klassifizierung unter Drucknormalkraft | 537 | 5.2.2.2 | Experimentelle Validierung – Labortests der Université de Liège | 546 |
| 3.2.3 | Klassifizierung unter Biegung M_u um die starke Achse | 538 | 5.2.2.3 | Numerische Validierung | 546 |
| 3.2.4 | Klassifizierung auf Biegung M_v um die schwache Achse | 539 | 5.3 | Biegedrillknicken unter Momentenbelastung | 547 |
| 3.2.4.1 | Schenkelspitze unter Druck | 540 | 5.3.1 | Beanspruchbarkeit gegenüber Biegedrillknicken | 547 |
| 3.2.4.2 | Schenkelspitze unter Zug | 540 | 5.3.2 | Herleitung und Validierung des Bemessungsvorschlags | 548 |
| 4 | Beanspruchbarkeit der Querschnitte | 541 | 5.4 | Auf Biegung und Druck beanspruchte Stäbe | 549 |
| 4.1 | Allgemeines | 541 | 5.4.1 | Allgemeines | 549 |
| 4.2 | Druckbeanspruchung | 541 | 5.4.2 | Nachweisbeziehungen | 549 |
| 4.2.1 | Bemessungsvorschlag für die Druckbeanspruchbarkeit | 541 | 5.4.3 | Herleitung und Validierung des Bemessungsvorschlags | 550 |
| 4.2.2 | Herleitung und Validierung des Bemessungsvorschlags | 541 | 5.4.3.1 | Experimentelle Validierung – Labortests der NTUA | 550 |
| 4.3 | Biegung um die starke Achse | 542 | 5.4.3.2 | Experimentelle Validierung – Labortests der TU Braunschweig | 551 |
| 4.3.1 | Beanspruchbarkeit auf Biegung um die starke Achse | 542 | 5.4.3.3 | Experimentelle Validierung – Labortests der TU Graz | 551 |
| 4.3.2 | Herleitung und Validierung des Bemessungsvorschlags | 542 | 5.4.3.4 | Numerische Validierung | 552 |
| 4.4 | Biegung um die schwache Achse | 543 | 6 | Stabilitätsnachweis von mehrteiligen Stäben mit geringer Spreizung | 553 |
| 4.4.1 | Beanspruchbarkeit auf Biegung um die schwache Achse | 543 | 6.1 | Allgemeines | 553 |
| 4.4.2 | Herleitung und Validierung des Bemessungsvorschlags | 543 | 6.2 | Biegeknicken von mehrteiligen Stäben mit geringer Spreizung | 554 |

| | | | | | |
|---------|--|-----|---------|---|-----|
| 6.2.1 | Ermittlung der Beanspruchbarkeit für Rücken an Rücken gestellte Doppelwinkel | 554 | 7.3.3.3 | Nachweis des Segments | 569 |
| 6.2.2 | Ermittlung der Beanspruchbarkeit bei übereck gestellten Doppelwinkeln | 554 | 7.4 | Anwendungsbeispiel 2 | 570 |
| 6.2.3 | Beanspruchbarkeit der Verbindungen | 555 | 7.4.1 | Allgemeine Angaben | 570 |
| 6.3 | Validierung des Bemessungsvorschlags | 555 | 7.4.2 | Nachweis nach EN 1993-3-1 | 570 |
| 6.3.1 | Numerisches Modell | 555 | 7.4.2.1 | Nachweis des Diagonalstabs | 570 |
| 6.3.2 | Rücken an Rücken gestellte Doppelwinkel | 556 | 7.4.2.2 | Nachweis des Stiels | 571 |
| 6.3.3 | Übereck gestellte Doppelwinkel | 558 | 7.4.3 | Nachweis nach prEN 1993-3, Anhang F | 571 |
| 7 | Anwendungsbeispiele des Turmbaus – Nachweise für Einzelstäbe | 562 | 7.4.3.1 | Nachweis des Diagonalstabs | 571 |
| 7.1 | Vorgang nach prEN 1993-3 und andere Normen | 562 | 7.4.3.2 | Nachweis des Stiels | 571 |
| 7.2 | Vorgehen nach prEN 1993-3, Anhang F | 563 | 7.5 | Anwendungsbeispiel 3 | 571 |
| 7.3 | Anwendungsbeispiel 1 | 564 | 7.5.1 | Allgemeine Angaben | 571 |
| 7.3.1 | Allgemeine Angaben | 564 | 7.5.2 | Nachweis nach EN 1993-3-1 | 571 |
| 7.3.2 | Nachweis nach EN 1993-3-1 | 565 | 7.5.2.1 | Nachweis des Diagonalstabs | 571 |
| 7.3.2.1 | Allgemeines | 565 | 7.5.2.2 | Nachweis des Stiels | 572 |
| 7.3.2.2 | Nachweis des Diagonalstabs | 566 | 7.5.3 | Nachweis nach prEN 1993-3, Anhang F | 572 |
| 7.3.2.3 | Nachweis des Stiels | 566 | 7.5.3.1 | Nachweis des Diagonalstabs | 572 |
| 7.3.3 | Nachweis nach prEN 1993-3, Anhang F | 567 | 7.5.3.2 | Nachweis des Stiels | 572 |
| 7.3.3.1 | Nachweis des Diagonalstabs L90×90×9 | 567 | 7.6 | Zusammenfassung der Anwendungsbeispiele | 572 |
| 7.3.3.2 | Nachweis des Stiels L160×160×15 | 568 | 8 | Anwendungsbeispiele des Turmbaus – Nachweise für mehrteilige Stäbe mit geringer Spreizung | 573 |
| | | | 8.1 | Allgemeine Angaben | 573 |
| | | | 8.2 | Nachweis der Diagonalen | 573 |
| | | | 9 | Literatur | 575 |

10 Aktuelle Modelle und Methoden zur Windlastermittlung 577

Rüdiger Höffer, Klaus Thiele, Francesca Lupi, Ulf Winkelmann, Wolfgang Hubert, Cornelia Kalender, Roland Wüchner, Cong Chen

| | | | | | |
|---------|--|-----|---------|--|-----|
| 1 | Einleitung | 579 | 2.3 | Bemessungswindstärke für die Bauphase | 589 |
| 2 | Windmodelle und lokale Windfelder | 580 | 3 | Turbulenzinduzierte Schwingungen und aeroelastische Instabilitäten von Bauwerken | 590 |
| 2.1 | Modellierungsgrößen der atmosphärischen Grenzschichtströmung | 580 | 3.1 | Anregungstypen | 590 |
| 2.1.1 | Basiswindgeschwindigkeit | 580 | 3.2 | Bauwerksschwingungen durch die Windböigkeit | 591 |
| 2.1.2 | Wind- und Turbulenzprofile sowie Spitzendruck | 580 | 3.3 | Aeroelastische Instabilitäten | 591 |
| 2.1.3 | Modellfortschreibung im Entwurf der zur Verabschiedung anstehenden Vornorm prEN 1991-1-4:2020 | 582 | 3.3.1 | Aerodynamische Dämpfung | 591 |
| 2.2 | Windfeldverhältnisse am Bauwerksstandort | 583 | 3.3.2 | Galloping | 592 |
| 2.2.1 | Regionale charakteristische Windgeschwindigkeiten | 583 | 3.3.3 | Interaktion Galloping und wirbelerregte Schwingung | 595 |
| 2.2.2 | Einfluss von Bodenrauigkeit und Topografie auf die standortspezifischen Windprofile am Beispiel eines exponierten Bauwerks in stark strukturiertem Gelände | 585 | 3.3.3.1 | Phänomene | 595 |
| 2.2.2.1 | Charakteristische Windgeschwindigkeiten am Bauwerksstandort | 585 | 3.3.3.2 | Wake-Oscillator-Modell | 596 |
| 2.2.2.2 | Standortspezifischer Einfluss der Bodenrauigkeit auf die Böenwindgeschwindigkeiten | 585 | 3.3.4 | Regen-Wind-induzierte Schwingungen | 598 |
| 2.2.2.3 | Untersuchungen zur Orografie | 586 | 3.3.5 | Divergenz | 599 |
| | | | 3.3.6 | Flattern | 599 |
| | | | 4 | Wirbelerregte Schwingungen bei Türmen und Masten | 601 |
| | | | 4.1 | Prozess der Wirbelablösung | 601 |
| | | | 4.2 | Berechnung der wirbelerregten Querschwingungsamplitude | 602 |
| | | | 4.2.1 | Verfahren 1 – Resonanzverfahren | 603 |

| | | | | | |
|-------|--|-----|-------|---|-----|
| 4.2.2 | Verfahren 2 – Spektralmethode | 604 | 6 | Anwendungen von numerischen Simulationen in der Baupraxis | 623 |
| 4.2.3 | Ausblick: Modellierung der Wirbelerregung im Eurocode der zweiten Generation | 606 | 6.1 | Grundlagen zur numerischen Modellierung und Simulation der Windströmung | 623 |
| 4.2.4 | Grundlegende Parameter | 607 | 6.2 | Fehler und Unsicherheiten der eingesetzten Modelle | 625 |
| 4.2.5 | Beanspruchungen durch wirbelerregte Querschwingungen | 609 | 6.3 | Aktuelle Situation der CFD im Windingenieurwesen | 626 |
| 4.2.6 | Ermittlung der Spannungsschwingspiele N | 609 | 6.4 | Überlegungen zur Qualitätssicherung von CFD Berechnungen | 627 |
| 4.3 | Beispiele und Bewertung | 609 | 6.5 | CFD-Anwendung Beispiel I: Westturm Schloss Friedenstein | 628 |
| 4.4 | Anwendung für Türme in Gruppenanordnung | 613 | 6.5.1 | Details der numerischen Simulation | 628 |
| 5 | Minderung der Schwingungen von Brückenüberbauten im Bauzustand | 615 | 6.5.2 | Validierung der Oberflächendruckbeiwerte | 630 |
| 5.1 | Stahlverbundbrücken im Taktschiebeverfahren | 615 | 6.6 | CFD-Anwendung Beispiel II: Brücke Rheinquerung | 632 |
| 5.2 | Hochmoselbrücke bei Ürzig | 616 | 6.7 | Fazit und Ausblick | 635 |
| 5.3 | Aftetalbrücke bei Bad Wünnenberg | 619 | 7 | Danksagungen | 635 |
| 5.4 | Modifikation des Vorbauschnabels zur Unterdrückung der Anregung | 622 | 8 | Literatur | 635 |
| | | | 8.1 | Referenzen | 635 |

11 Türme und Maste 641

Frank Kemper, Markus Feldmann, Mirko Friehe, Klaus Thiele, Dieter Ungermann, Alena Patschin, Bettina Brune

| | | | | | |
|---------|--|-----|---------|---|-----|
| 1 | Einleitung | 643 | 3.2.4.2 | Neue Rohrmaste für Freileitungen | 663 |
| 2 | Begriffe, Einsatzgebiete, Relevanz und Regelungsbereiche | 643 | 3.2.4.3 | Raumoptimierte Freileitungsmaste | 671 |
| 2.1 | Allgemeines | 643 | 3.3 | Abgespannte Maste | 672 |
| 2.2 | Regelwerke | 644 | 4 | Lasteinwirkungen aus Wind und Eis, Betriebslasten und windbedingte Schwingungseffekte | 672 |
| 2.3 | Verkehrsinfrastruktur | 644 | 4.1 | Klimatische Einwirkungsgrößen am Bauwerksstandort | 672 |
| 2.4 | Industrieller Bedarf | 644 | 4.1.1 | Basiswindgeschwindigkeit aus meteorologischen Daten | 672 |
| 2.5 | Kommunikationsinfrastruktur | 644 | 4.1.1.1 | Allgemeines | 672 |
| 2.6 | Energieversorgung | 645 | 4.1.1.2 | Extreme Windgeschwindigkeit | 672 |
| 2.6.1 | Freileitungen | 645 | 4.1.1.3 | Einfluss der Umgebungsrauigkeit | 674 |
| 2.6.1.1 | Allgemeines | 645 | 4.1.2 | Modellierung der Vereisung | 676 |
| 2.6.1.2 | Bestandteile einer Freileitung | 646 | 4.1.2.1 | Vereisungsszenarien | 676 |
| 2.6.2 | Windenergieanlagen | 646 | 4.1.2.2 | Klimatische Randbedingungen für Vereisung | 677 |
| 3 | Konstruktionsformen | 648 | 4.1.2.3 | Bewertung auf Basis der Schneelastnorm | 678 |
| 3.1 | Gittertürme und -maste | 648 | 4.1.2.4 | Bewertung auf Basis meteorologischer Daten | 678 |
| 3.1.1 | Allgemeines | 648 | 4.2 | Aerodynamische Beiwerte | 679 |
| 3.1.2 | Türme für Windenergieanlagen | 649 | 4.2.1 | Kraftbeiwerte für Gittermaste | 679 |
| 3.1.3 | Maste für Freileitungen | 649 | 4.2.1.1 | Stand der Normung | 679 |
| 3.1.3.1 | Bauarten von Freileitungsmasten | 649 | 4.2.1.2 | Windkanaluntersuchungen an unterschiedlichen Gittermasten | 681 |
| 3.1.3.2 | Stromtrassen | 650 | 4.2.2 | Kraftbeiwerte für Rohrtürme | 682 |
| 3.1.3.3 | Mastbilder | 651 | 4.2.3 | Kraftbeiwerte für Anbauten an Maste | 683 |
| 3.1.3.4 | Tragwerke von Freileitungsmasten | 653 | 4.3 | Böenerregte Schwingungen | 685 |
| 3.1.3.5 | Freileitungen | 657 | 4.4 | Wirbelerregte Querschwingungen | 685 |
| 3.1.3.6 | Verbindungselemente von Freileitungen und Freileitungsmasten | 660 | 4.4.1 | Beschreibung des Phänomens | 685 |
| 3.2 | Rohrtürme und -maste | 661 | | | |
| 3.2.1 | Allgemeines | 661 | | | |
| 3.2.2 | Verbindungen der Sektionen | 661 | | | |
| 3.2.3 | Türme für Windenergieanlagen | 662 | | | |
| 3.2.4 | Maste für Freileitungen | 663 | | | |
| 3.2.4.1 | Freileitungsmaste für die Energiewende | 663 | | | |

| | | | | |
|-------|--|-------|---|-----|
| 4.4.2 | Aktuelle Diskussion zu den Verfahren zur Berechnung der Querschwingamplitude | 5 | Sicherheitskonzept und vollständig probabilistische Sicherheitsmarge | 693 |
| 4.5 | Ermüdungsnachweise für windinduzierte Schwingungen | 5.1 | Vergleich der Teilsicherheitsbeiwerte in unterschiedlichen Normenwerken | 693 |
| 4.5.1 | Böenerregte Schwingungen | 5.2 | Vollständig probabilistische Bemessung | 694 |
| 4.5.2 | Wirbelerregte Schwingungen | 5.2.1 | Allgemeines | 694 |
| 4.6 | Maßnahmen zur Reduktion von winderregten Schwingungen | 5.2.2 | Geforderte Zuverlässigkeit | 695 |
| 4.7 | Lasteinwirkungen aus Betrieb | 5.2.3 | Beispiel | 695 |
| 4.7.1 | Betriebszustände von Windkraftanlagen | 5.3 | Typische Grenzzustände von Gittermaststrukturen | 699 |
| 4.7.2 | Seilzug bei Freileitungsmasten | 5.4 | Modellierung der Einwirkungsseite | 700 |
| 4.8 | Einwirkungen und Einwirkungskombinationen nach DIN EN 50341 VDE 0210 | 5.5 | Modellierung der Widerstandsseite | 700 |
| 4.8.1 | Allgemeines | 6 | Ausblick auf die kommende Normengeneration | 701 |
| 4.8.2 | Einwirkungen | 7 | Zusammenfassung | 703 |
| 4.8.3 | Lastfälle nach DIN EN 50341-2-4 VDE 0210-2-4 | 8 | Literatur | 704 |

Stichwortverzeichnis 709

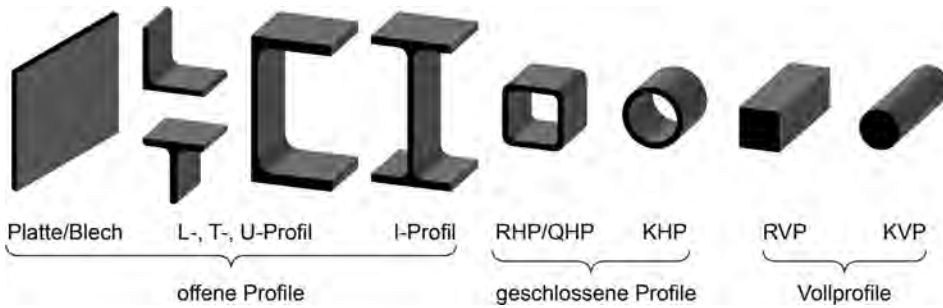


Bild 3. Übersicht der im Stahlhochbau üblicherweise zum Einsatz kommenden Profilarten

Bei RBS ist die alleinige Fokussierung auf den Profilfaktor für die Bestimmung der für einen Feuerwiderstand eines Stahlbauteils erforderlichen TSD nicht ausreichend. Die Leistungsfähigkeit von RBS wird auch durch die spezifische Querschnittsform (z. B. gerade oder gekrümmte Oberfläche) und geometrischen Besonderheiten (z. B. Kanten) des Stahlbauteils beeinflusst, da sich dies auf die Schaumhöhe und die Bildung von Rissen im Schaum auswirken kann. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, ist es erforderlich, auch die Profilart bei der Beurteilung der thermischen Schutzwirkung des RBS mit zu berücksichtigen. Bild 3 zeigt eine Übersicht der im Stahlhochbau üblicherweise zum Einsatz kommenden Profilarten. Unterschieden wird dabei zwischen offenen und geschlossenen Profilen sowie Vollprofilen. Zudem muss gegebenenfalls bei geschlossenen Profilen und Vollprofilen auch nach kreisrund und rechteckig differenziert werden. Sowohl die nationalen Zulassungen als auch die europäischen Bewertungsdokumente weisen daher für die verschiedenen Profilarten (Profilfamilien) jeweils eigene TSD-Tabellen aus. Die in der jeweiligen Tabelle angegebenen TSD können auch bei identischem Profilfaktor in der Regel nicht auf ein Bauteil einer anderen Profilart übertragen werden. Dieser Grundsatz gilt ebenso in Bezug auf die Art der mechanischen Beanspruchung eines Bauteils. Da die Aufschäumung des RBS vornehmlich senkrecht zur Bauteiloberfläche erfolgt, d. h. in Dickenrichtung der Beschichtung, und das seitliche Expansionsvermögen vergleichsweise begrenzt ist, stellen Bauteilkanten und konvex gekrümmte Oberflächen eine besondere Herausforderung für RBS dar. Diese geometrischen Besonderheiten der Bauteile führen häufig zu einer stärkeren Beanspruchung des RBS und zu einer verminderten Schaumhöhe oder intensiveren Rissbildung im Schaum, wodurch die thermische Schutzwirkung verringert wird (s. Bild 4). Zur Beurteilung des Einflusses der Oberflächenkrümmung auf die Leistungsfähigkeit von RBS wurden im Rahmen des Projektes „Novel Tasks“ [8, 9] Brandversuche an beschichteten Tankböden [10] sowie kleinformatigen Hohlkugeln und -zylindern [11] durchgeführt. Eine detaillierte Darstellung der Untersuchungen an den kleinformatigen Bauteilen und

der wesentlichen Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 7.2.3. Der in Bild 6 dargestellte Vergleich zwischen den an einem Halbkugel- bzw. Klöpperboden gemessenen Stahltemperaturen mit denen einer ebenen Stahlplatte zeigt deutlich, dass sich die thermische Schutzwirkung von RBS durch eine gekrümmte Oberfläche erheblich verringert. Dies ist unter anderem auf die infolge der Oberflächenkrümmung zunehmende Rissbildung zurückzuführen (s. Bild 5). Der Vergleich untermauert die Aussage, dass eine Übertragung der erforderlichen TSD

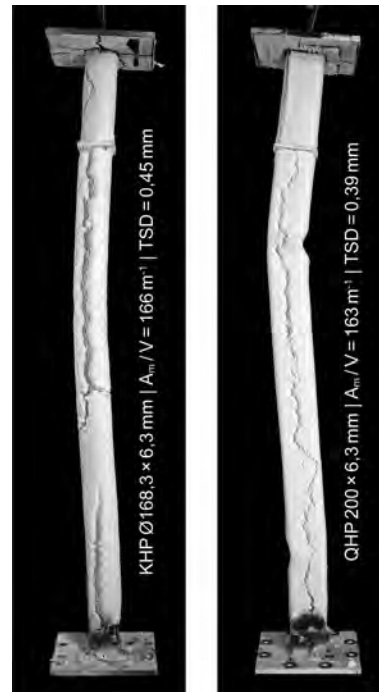


Bild 4. Auftreten von Rissen im Schaum des RBS an mechanisch belasteten Stützen ($L = 3,6 \text{ m}$) mit Kreisrohrprofil bzw. Quadrathohlprofil

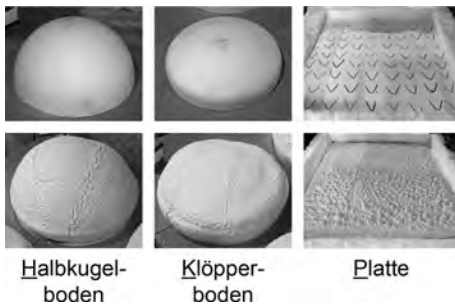


Bild 5. Einfluss der Oberflächenkrümmung auf das Aufschäumen und Rissverhalten von RBS (oben: Probekörper vor dem Brandversuch; unten: Probekörper nach dem Brandversuch; Bauteile mit einem Durchmesser/einer Kantenlänge von 500 mm, einer Wandstärke von 5 mm und TSD von 2 mm)

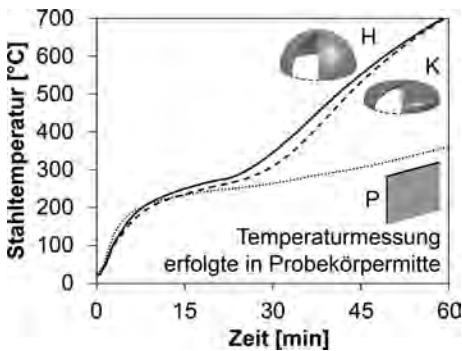


Bild 6. Einfluss der Oberflächenkrümmung auf die Erwärmung der Probekörper aus Bild 3 (H = Halbkugelboden; K = Klöpperboden; P = ebene Platte)

zwischen Bauteilen mit gleichem Profilmfaktor, aber unterschiedlicher Profillart in der Regel nicht möglich ist. Dies bestätigen auch die Untersuchungen in [12, 13], welche gezeigt haben, dass zum Erreichen der gleichen Feuerwiderstandsdauer und bei identischem Profilmfaktor für Zugglieder mit Kreisvollprofil wesentlich höhere TSD erforderlich sind als für Stahlzugglieder mit I-Profil. Zur Verdeutlichung des Phänomens sei auf die in Bild 7 dargestellten Zusammenhänge und die entsprechenden Erklärungen verwiesen.

3.2 Mechanische Beanspruchung

Zusätzlich zur Bauteilgeometrie wird die Leistungsfähigkeit von RBS auch von der auf das Bauteil einwirkenden mechanischen Beanspruchung beeinflusst. Sowohl die Art der Beanspruchung, d. h. Biegung, Druck oder Zug, als auch die Beanspruchungshöhe können die Leistungsfähigkeit des RBS verändern. Insbesondere um die Haftfähigkeit von RBS nachzuweisen, sind

in Deutschland Brandprüfungen an mechanisch belasteten Bauteilen obligatorisch. Die mechanische Belastung des Stahlbauteils führt in der Regel zu einer höheren Beanspruchung des RBS und begünstigt dadurch eine Rissbildung im Schaum sowie eine reduzierte Haftfähigkeit. RBS zeigen daher auf mechanisch beanspruchten Bauteilen meist eine schlechtere thermische Schutzwirkung, sodass bei der Beurteilung von unbelastet geprüften Bauteilen in der Regel eine entsprechende Korrektur vorzunehmen ist. Untersuchungen zum Einfluss der Beanspruchungsart und -höhe auf die Haftfähigkeit und die thermische Schutzwirkung von RBS wurden in [14] und [13] am Beispiel von Stahlzuggliedern durchgeführt. Darüber hinaus weisen auch die nach DIN EN 13381-8 [15] ermittelten TSD-Tabellen von am Markt befindlichen RBS bei gleicher Feuerwiderstandsdauer, Profilmfaktor, Profilmfaktor und Bemessungstemperatur, aber Verwendung als Träger (Biegung) oder Stütze (Druck) jeweils unterschiedlich hohe Werte für die erforderliche TSD aus.

Des Weiteren kann auch der Zeitpunkt der Lastaufbringung auf das zu prüfende belastete Bauteil die Leistungsfähigkeit des RBS beeinflussen. Erfolgt das Aufbringen der mechanischen Beanspruchung nach der Applikation und Aushärtung des RBS im Rahmen einer Werksbeschichtung, so werden die daraus für das Bauteil resultierenden Dehnungen auch auf die Brandschutzbeschichtung übertragen. Insbesondere bei zugbeanspruchten Bauteilen ist es denkbar, dass dadurch Mikrorisse in der Beschichtung entstehen, welche sich negativ auf die Leistungsfähigkeit des RBS auswirken können, z. B. durch eine erhöhte Rissbildung beim Aufschäumen. Erfolgt das Aufbringen der mechanischen Beanspruchung vor der Applikation des RBS im Rahmen einer Baustellenbeschichtung, so ist die Beschichtung, bis auf Beanspruchungen aus den weiteren Ausbaulasten, spannungslos und es ergeben sich eventuell günstigere Ergebnisse [16]. Eine wissenschaftliche Untersuchung hierzu steht allerdings noch aus.

3.3 Mehrdimensionale Beanspruchung

Die beschriebenen geometrischen Einflüsse und die auf ein Bauteil einwirkende mechanische Belastung können zu einer mehrdimensionalen Beanspruchung des RBS führen (s. Bild 7). Die Beanspruchung kann ein-, zwei oder dreidimensional ausfallen. Werden Bauteile durch eine mechanische Einwirkung auf Biegung oder Zug belastet, entsteht aufgrund der damit verbundenen Zugspannungen in Bauteillängsrichtung eine zusätzliche Beanspruchungsdimension für das RBS. Infolgedessen kann es im Schaum des RBS zur Bildung von Rissen in Bauteilquerrichtung kommen.

Unter Ausblendung des Pränomens der Rissbildung des Schaums auf scharfen Profilkanten, bezeichnet als Kantenproblematik, siehe beispielsweise [17], ergibt sich für unbelastete Profile mit vorwiegend ebener Bauteiloberfläche, z. B. bei I-Profilen, eine 1D-Beanspruchung des RBS. Da das Aufschäumen des RBS vorwie-

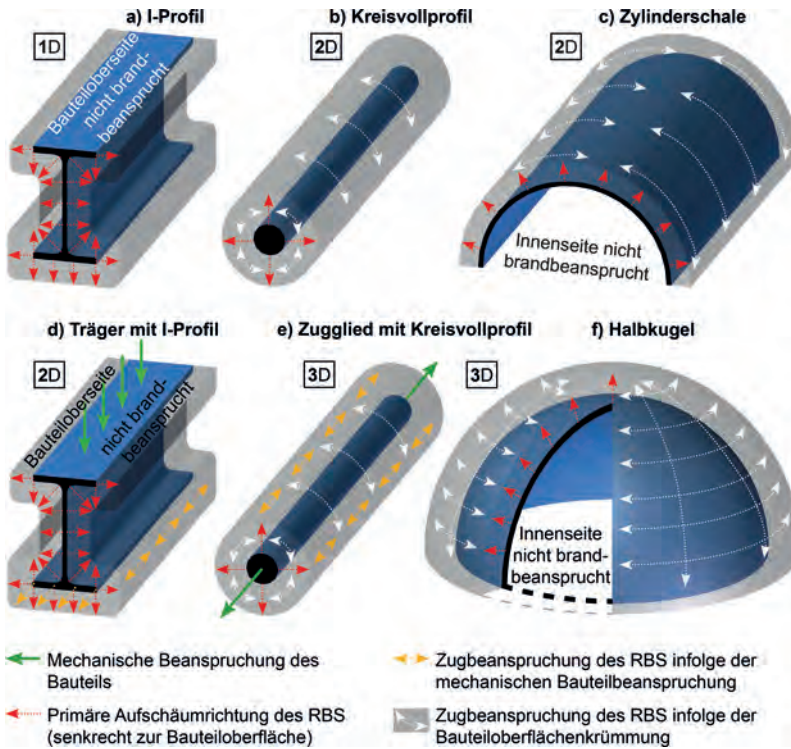


Bild 7. Mehrdimensionale Beanspruchung des RBS als Folge der Probekörpergeometrie und ggf. zusätzlicher mechanischer Bauteilbeanspruchungen

gend in Dickenrichtung stattfindet, d. h. senkrecht zur Bauteiloberfläche, stellt diese Beanspruchung meist keine besondere Anforderung für die Systeme dar (s. Bild 7a). Infolge einer mechanischen Belastung auf Biegung oder Zug (s. Bild 7d) und der daraus resultierenden Dehnung des Bauteils erfährt das RBS eine zusätzliche Beanspruchung in Bauteillängsrichtung, d. h., es ergibt sich eine 2D-Beanspruchung. Um eine Querrissbildung im Schaum zu verhindern, ist daher ein seitliches Expansionsvermögen des RBS erforderlich.

Für Profile mit einer einfach konvex gekrümmten Oberfläche, z. B. Kreisvoll- (KVP) und Kreishohlprofile (KHP) sowie für Zylinderschalen, kommt es bereits ohne eine mechanische Belastung zu einer 2D-Beanspruchung des RBS (s. Bild 7b und 7c). Durch die aus dem Aufschäumprozess resultierende Volumen- und Umfangszunahme des Schaums ist ein Aufschäumen des RBS nicht nur senkrecht zur Bauteiloberfläche, sondern auch in Umfangsrichtung erforderlich. Da das seitliche Expansionsvermögen von RBS begrenzt ist, können radial verlaufende Zugspannungen im Schaum auftreten. Übersteigen diese Spannungen die Festigkeit des Schaums, kommt es zur Bildung von Rissen in Stablängsrichtung, wodurch meist eine Reduzierung der thermischen Schutzwirkung resultiert. Erfolgt zusätzlich eine Belastung des Bauteils auf Zug (s. Bild 7e), so ist das RBS einer weiteren Beanspruchung in Bau-

teillängsrichtung ausgesetzt, d. h., es ergibt sich eine 3D-Beanspruchung.

Eine 3D-Beanspruchung tritt auch bei unbelasteten Profilen mit einer zweifach konvex gekrümmten Oberfläche auf, beispielsweise bei einer Halbkugel (s. Bild 7f). Durch Wirkung einer zusätzlichen mechanischen Belastung erfolgt keine weitere Erhöhung der Beanspruchungsdimension, sondern eine Verstärkung einzelner aus der Bauteilgeometrie resultierender Beanspruchungsanteile.

Generell stellen mehrdimensionale Beanspruchungen, insbesondere 3D-Beanspruchungen, aufgrund der Begünstigung einer Rissbildung besonders hohe Anforderungen an RBS. Mithilfe der beschriebenen theoretischen Ausführungen zur Beanspruchung von RBS lassen sich qualitative Aussagen zur möglichen Rissbildung und ein qualitativer Vergleich zwischen verschiedenen Bauteilen treffen. Da das Aufschäumverhalten und die Rissbildung auch von der Höhe der mechanischen Beanspruchung und Oberflächenkrümmung sowie weiteren Faktoren abhängen, ist eine Vorhersage zur thermischen Schutzwirkung schwer möglich. Für präzise Aussagen sind Brandversuche unverzichtbar, da sie die realen Gegebenheiten der Bauteile am besten abbilden. Die Tatsache, dass beispielsweise ein 3D-Beanspruchungszustand des RBS sowohl bei einer Halbkugel (s. Bild 7f) als auch bei einem Zugstab mit Kreisprofil

(s. Bild 7e) auftritt, legt Vergleiche der aus solchen Versuchen gewonnenen Ergebnisse nahe. Da Brandversuche mit mechanischer Beanspruchung häufig mit höherem Aufwand verbunden sind als solche ohne, kann möglicherweise ein wirtschaftlicher Vorteil genutzt werden. Dies ist dann der Fall, wenn es gelingt, eine Korrelation der Ergebnisse zwischen beiden Versuchskonstellationen herzustellen. Untersuchungen zur möglichen Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse von RBS mit mehrdimensionaler Beanspruchung aus mechanisch unbelasteten Bauteilen mit zweifach gekrümmten Oberflächen auf solche mit mehrdimensionaler Beanspruchung aufgrund von Oberflächenkrümmung und mechanischer Beanspruchung stehen derzeit noch aus. Dennoch wurden, als mögliche Vorstufe dazu, bereits Untersuchungen an unbelasteten, kleinformatigen Prüfkörpern mit mehrsinniger Oberflächenkrümmung durchgeführt. Weitere Informationen zu den Untersuchungen sind Abschnitt 7.2.3 zu entnehmen.

3.4 Einbaulage

Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Einflussgrößen wird die Leistungsfähigkeit von RBS auch von der räumlichen Anordnung des beschichteten Bauteils beeinflusst. In der Baupraxis werden insbesondere für Druck- und Zugglieder unterschiedliche Einbaulagen verwendet, d. h. vertikal, horizontal oder geneigt. Die räumliche Anordnung der Bauteile kann sich auf die Haftfähigkeit, Rissbildung und Gestalt des Schaumkörpers auswirken. Entsprechende Untersuchungen an Zuggliedern mit KVP und KHP [13, 18, 19] haben dies bestätigt. Die Entwicklung eines Anpassungsfaktors zur Berücksichtigung des Einflusses der Einbaulage ist Gegenstand aktueller Forschungen [20] (s. Abschnitt 7.2.1). Der Neigungseinfluss auf die Wirksamkeit des RBS wird derzeit untersucht und ein Vorschlag für eine Normprüfanordnung erarbeitet (s. Abschnitt 5.3). Der Anwendungsbereich laut allgemeiner Bauartgenehmigung (aBG) beschränkt sich daher bisher auf die Einbaulage, mit der auch die mechanisch belasteten Brandversuche durchgeführt wurden. Kann durch Brandprüfungen die Eignung eines RBS auf Bauteilen mit horizontaler und vertikaler Anordnung nachgewiesen werden, so ergeben sich keine Einschränkungen hinsichtlich der Einbaulage. Dabei ist die jeweils größere der sich aus den Fällen horizontaler und vertikaler Anordnung ergebende Trockenschichtdicke (TSD) auf den Fall mit geneigter Stabachse anzuwenden. Da die Brandprüfungen für [21] auf horizontal getesteten Prüfkörpern basieren, darf das RBS auf horizontal und bis zu 30° von der Horizontalen geneigt eingebauten Zuggliedern verwendet werden.

3.5 Trockenschichtdicke

Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von RBS ist die TSD. Generell gilt, je größer die TSD, desto besser die thermische Schutzwirkung des

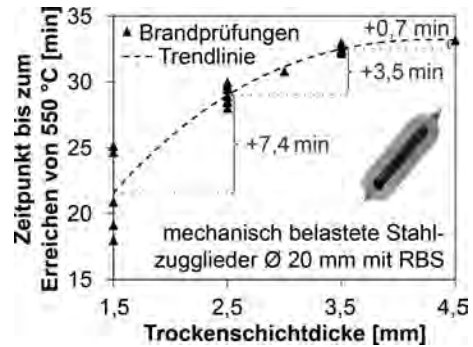


Bild 8. Einfluss der TSD auf die Erwärmung von Zuggliedern [13]

RBS. Eine verbesserte thermische Schutzwirkung wird dabei sowohl im nicht aufgeschäumten Zustand als auch durch meist größere Schaumhöhen im aufgeschäumten Zustand erreicht. Ferner begünstigen große TSD das Rissheilungsvermögen des RBS [12, 13]. Da sich während der Aufschäumphase infolge der großen Volumenzunahme des RBS Risse im Schaum bilden können, die durch noch nicht vollständig reagiertes Beschichtungsmaterial teilweise oder sogar wieder ganz geschlossen werden, bleibt die thermische Schutzwirkung aufrechterhalten. Als Folge wird meist auch die Streuung der Prüfergebnisse reduziert. Die mit zunehmender TSD meist größer werdende Schaumhöhe kann sich jedoch auch negativ auf die Haftfähigkeit des RBS auswirken. Ferner haben die Untersuchungen in [13] gezeigt, dass sich die Erhöhung der TSD unterproportional zur Verbesserung der thermischen Schutzwirkung verhält (s. Bild 8). Aus wirtschaftlicher Sicht ist es daher sinnvoll, neben einer Erhöhung der TSD auch weitere Maßnahmen wie z. B. eine Vergrößerung der Profilgeometrie bzw. Verringerung des Lastausnutzungsgrads in Betracht zu ziehen.

3.6 Einwirkende Temperatur-Zeit-Kurve

Da der Aufschäumprozess von RBS und die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen temperaturabhängig sind, siehe Ausführungen in Abschnitt 2, werden das Verhalten und die thermische Schutzwirkung der Systeme auch von der einwirkenden Temperatur-Zeit-Kurve beeinflusst. Entscheidende Faktoren sind hierbei die Höhe der Brandraumtemperatur und die Aufheizgeschwindigkeit. Generell gilt, je langsamer die Erwärmung, desto langsamer erfolgt die Reaktion bzw. Aufschäumung des RBS. Eine Untersuchung zur Leistungsfähigkeit von RBS bei gegenüber der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) abweichenden Temperaturkurven ist insbesondere vor dem Hintergrund der zunehmenden Anwendung von Naturbrandszenarien erforderlich. Die Ergebnisse kleinmaßstäblicher Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Aufheizgeschwindigkeiten auf das Expansionsverhalten und die

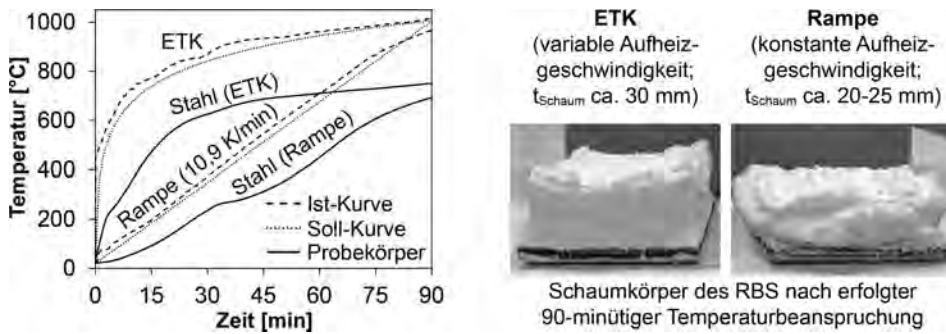


Bild 9. Einfluss unterschiedlicher Temperaturkurven auf die Entwicklung der Stahltemperaturen und das Aufschäumverhalten eines wasserbasierten RBS mit einer TSD von 1 mm

thermische Schutzwirkung von RBS wurden bereits in [22] veröffentlicht. Ferner wurde im Rahmen eines BAM-Projekts [8, 23] untersucht, inwieweit sich bei gleicher Endtemperatur, aber unterschiedlicher Aufheizgeschwindigkeit das Aufschäumverhalten und die thermische Schutzwirkung von RBS verändern (s. Bild 9).

Aus den Temperaturmessdaten in Bild 9 lässt sich erkennen, dass trotz unterschiedlicher Aufheizgeschwindigkeiten des Brandraums bei annähernd gleicher Endtemperatur, nach 90 Minuten Erwärmungsdauer, in etwa gleiche Stahltemperaturen erreicht werden. Die thermische Schutzwirkung des RBS entwickelt sich gewissermaßen „bedarfsgerecht“ entsprechend der einwirkenden Brandraumtemperatur. Auffällig ist jedoch, dass sich deutlich unterschiedliche Schaumhöhen eingestellt haben. Die Schaumhöhe bei der rampenförmigen Brandraumtemperaturkurve fällt deutlich geringer aus als beim ETK-Verlauf. Dies ist folgerichtig, da die Temperaturrampe über die gesamte Erwärmungsdauer unterhalb der ETK verläuft und die Fläche unter der jeweiligen Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve als Maß für die einwirkende Energiemenge angesehen werden kann. Voraussetzung für die Vergleichbarkeit ist selbstverständlich die Durchführung beider Versuche unter denselben Randbedingungen mit Ausnahme des Brandraumtemperatur-Zeit-Verlaufs. Die Dämmwirkung des sich ausbildenden Schaumkörpers ist nicht allein von der Höhe des Schaums abhängig, sondern in erheblichem Maße auch von der Gestalt der Poren wie auch der Oberflächenbeschaffenheit des Schaumkörpers, siehe dazu auch Abschnitt 7.2.2 sowie [5]. Die genannten Eigenschaften werden durch die einwirkende Brandraumtemperatur-Zeit-Kurve beeinflusst.

4 Regelungen

4.1 Nationale und europäische Zulassungen

Da es sich bei RBS um nicht geregelte Bauprodukte handelt, ist deren Anwendung im Allgemeinen durch

Zulassungen geregelt. Bei der zulassungs-basierten Anwendung von RBS ist zwischen nationalen und europäischen Dokumenten zu unterscheiden. Die europäischen Bewertungsdokumente, d. h. Europäische Technische Bewertung (engl. ETA – European Technical Assessment), erlauben das *Inverkehrbringen* der Produkte innerhalb Europas. Die Bewertung von RBS erfolgt seit September 2017 auf Basis des europäischen Bewertungsdokuments EAD 350402-00-1106 [24]. Nach Abschnitt 14.2.2 der Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVV TB [25] ist in Deutschland für die Verwendung von RBS auf Basis einer ETA eine aBG erforderlich. Differenzierte Hinweise zur Auslegung der zur ETA führenden Normen haben bisher keinen Eingang in die MVV TB gefunden, sind jedoch im Rahmen zukünftiger Überarbeitungen zu erwarten. Eine aBG wird vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt und stellt sicher, dass bei Verwendung des Produkts auch die an das Bauwerk gestellten Anforderungen erfüllt werden.

Bei der nationalen Zulassung (abZ) handelt es sich in der Regel um einen *Verwendbarkeitsnachweis*. In dem Dokument befanden sich bisher Informationen bezüglich der Produkteigenschaften und des Anwendungsbereichs des RBS auf Stahlbauteilen. Für die Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) sind bei RBS die Zulassungsgrundsätze des DIBt [26] anzuwenden. Der Zulassungsprozess stellt dabei sicher, dass bei Verwendung des Produkts auch die an das Bauwerk gestellten Anforderungen erfüllt werden. Es ist zu beachten, dass für RBS auch spezielle abZ mit der Anfangsbezeichnung „Z-200“ existieren, welche ergänzend zu einer bereits vorhandenen ETA lediglich eine Emissionsbewertung des Bauprodukts vornehmen. Die im vorliegenden Beitrag beschriebenen Ausführungen zu den abZ beziehen sich nicht auf solche mit der o. g. Bezeichnung.

Ist eine Anwendung von RBS im Rahmen der Zulassung nicht möglich, so kann in Deutschland eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) für Bauarten bzw. eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für Bauprodukte beantragt werden. Hierfür sind in der Regel

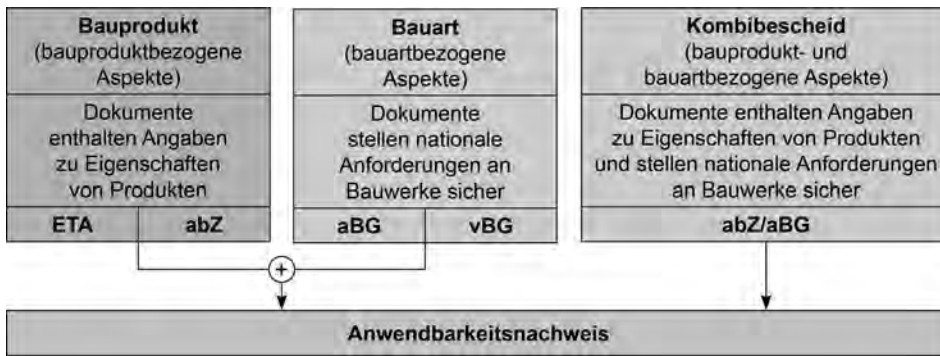


Bild 10. Anwendbarkeitsnachweis: bauaufsichtliche Dokumente

eine gutachterliche Stellungnahme sowie üblicherweise auch Brandprüfungen erforderlich. Ferner wird mit diesem Verfahren lediglich eine projektbezogene Gültigkeit erreicht.

Laut Mitteilung des DIBt vom 7. Juli 2017 [27] erfolgt eine restriktivere Abgrenzung zwischen Anforderungen an *Bauprodukte* und Regelungen für das Zusammenfügen von Bauprodukten zu baulichen Anlagen, sogenannten *Bauarten*. Hintergrund dieser Entwicklung ist das vom Europäischen Gerichtshof getroffene Urteil C-100/13. Demnach ist es unzulässig, an Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung zusätzlich nationale Produktanforderungen zu stellen. Für Bauarten wird statt der abZ oder ZiE eine aBG oder vBG verwendet. Die Erteilung einer aBG behandelt die Kombination des Bauprodukts mit einem Bauteil, was im Ergebnis als Bauart anzusehen ist. Dies führt dann entsprechend der in Bild 10 dargestellten Kombinationen zu einem Anwendbarkeitsnachweis. Im Antragsverfahren werden diesbezüglich drei Fälle unterschieden:

- bauproduktbezogene Aspekte (Fall 1),
- bauproduktbezogene und bauartbezogene Aspekte (Fall 2),
- bauartbezogene Aspekte (Fall 3).





Im Fall 1 wird weiterhin eine abZ erteilt. Für den Fall 3 wird die abZ durch eine aBG ersetzt. Im Fall 2 wird aus der bisherigen abZ ein kombiniertes abZ- und aBG-Dokument. Dieser Kombibescheid hat nur eine Nummer und umfasst sowohl Informationen zum Bauprodukt als auch zur Bauart. Die zunehmende Variabilität und Kombinationsmöglichkeiten der Zulassungen sowie die draus resultierende Komplexität macht es für die Zukunft erforderlich, die Dokumente genau zu studieren und hinsichtlich des geplanten Verwendungszwecks der Produkte bzw. Anwendungsbereichs der Bauart eingehend zu überprüfen. Eine schematische Darstellung der Dokumente und Kombinationsmöglichkeiten zeigt Bild 10.

4.2 Anwendung auf Grundlage bauaufsichtlicher Regelungen und Zulassungen

Der zulassungsbasierte Einsatz von RBS ist auf warmgewalzten Baustahl (Kennzeichnung S) nach der Normenreihe DIN EN 10025 möglich. Da eine Heißbemesung auf Basis der Verfahren und temperaturabhängigen Abminderungsfaktoren nach DIN EN 1993-1-2 [28] derzeit ausschließlich für Baustähle der Festigkeitsklasse S235, S275, S355, S420 und S460 durchgeführt werden kann, sind die in DIN EN 10025-2 [29] genannten Baustähle der Festigkeitsklassen S185 und S500 für die Anwendung von RBS ausgeschlossen. Ein Überblick zu den im Rahmen von bestehenden Zulassungen möglichen Anwendungsbereichen von RBS findet sich in [30–33]. Der vorliegende Beitrag ergänzt die Übersichten um weiterführende Betrachtungen im Hinblick auf die Unterschiede zwischen den nationalen Zulassungen und europäischen Bewertungsdokumenten. Ferner wird auch auf Änderungen gegenüber dem Stand von 2018 Bezug genommen.

Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von RBS und der sich daraus ergebende Beitrag zur Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer für auf Biegung, Druck oder Zug beanspruchte Stahlbauteile erfolgt im Allgemeinen anhand von mechanisch belasteten und unbelasteten Brandprüfungen. In der Regel werden hierfür Träger und/oder Stützen unter dem Einfluss der ETK getestet. Die Durchführung der Brandprüfungen sowie die Beurteilung der Prüfergebnisse erfolgen national anhand der Zulassungsgrundsätze des DIBt [26] und auf europäischer Ebene auf Grundlage der DIN EN 13381-8 [15]. Der in den bauaufsichtlichen Dokumenten angegebene Anwendungsbereich eines RBS hängt maßgeblich vom getesteten Prüfumfang ab. Für die im Bauwesen häufig vorkommenden Stahlprofile ist in Tabelle 2 eine Übersicht des derzeit im Rahmen von nationalen Zulassungen sowie europäischen Bewertungsdokumenten möglichen Anwendungsbereichs für RBS angegeben.

Tabelle 2. Übersicht der derzeit möglichen zulassungsbasierten Anwendung von RBS auf Stahlbauteilen

| Profilart | Beanspruchung | National (abZ) ¹⁾ | Europäisch (ETA) ¹⁾ | Quelle (abZ / ETA + aBG) |
|--|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
|  I-Profil | Biegung | ✓ | ✓ | [26] / [24, 15] |
| | Druck | ✓ | ✓ | [26] / [24, 15] |
| | Zug | ✓ | (✓) ³⁾ | [14, 34] / – |
|  L-, T- und U-Profil | Biegung | ✓ | (✓) ³⁾ | [26] / – |
| | Druck | ✓ | (✓) ³⁾ | [26] / – |
| | Zug | ✓ | (✓) ³⁾ | [34] / – |
|  Hohlprofil | Biegung ²⁾ | ✓ ⁶⁾ | ✓ ⁶⁾ | [26] / [15] |
| | Druck | ✓ | ✓ | [26] / [24, 15] |
| | Zug | ✓ ⁴⁾ | – | [12, 13, 35, 36] / – |
|  Vollprofil | Biegung ²⁾ | – | – | – |
| | Druck ²⁾ | – | – | – |
| | Zug | ✓ ⁴⁾ | – ⁵⁾ | [12, 13, 35, 36] / – |

1) Gemäß MVV TB [25] ist in Deutschland zusätzlich eine aBG erforderlich.

2) Die Verwendung ist unüblich und daher i. d. R. nicht Bestandteil des zulassungsbasierten Anwendungsbereichs.

3) Der Anwendungsbereich der ETA kann durch das DIBt mittels aBG auf Grundlage gutachterlicher Stellungnahme einer kompetenten Stelle erweitert werden.

4) Es existiert bislang lediglich eine aBG [21].

5) Normative Regelungen zur Prüfung dieser Bauteile befinden sich derzeit in Arbeit (CEN/TC127/WG1).

6) Die Aussage gilt für RHP und QHP. Für KHP ist diese Verwendung unüblich und daher i. d. R. nicht Bestandteil des zulassungsbasierten Anwendungsbereichs.

Anhand von Bild 11 werden am Beispiel eines fiktiven Mustertragwerks die prinzipiellen Einsatzmöglichkeiten von RBS für im Stahlbau häufig vorkommende Anwendungsfälle vorgestellt. Entsprechend der verschiedenen mechanischen Beanspruchungsarten, d. h. Biegung, Druck und Zug, sind die typischerweise eingesetzten Profilarten angegeben.

Dabei sind die Ausführungen in Abschnitt 4.2 zu beachten, da nicht jede beliebige Kombination von Beanspruchungsart und Profilform nach Darstellung in Bild 11 für jedes Produkt im zulassungsbasierten Anwendungsbereich liegt. Im Vorfeld der Anwendung sollte daher durch den Planer sowie den Applikateur für das zum Einsatz kommende RBS eine Überprüfung erfolgen.

4.2.1 Biegebeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil

Aufgrund der in den Zulassungsgrundsätzen des DIBt [26] und DIN EN 13381-8 [15] festgelegten Prüfsystematik ist die Anwendung von RBS auf biegebeanspruchten Bauteilen mit offenem¹⁾ Profil im Allgemeinen im Rahmen der abZ bzw. ETA in Verbindung mit einer aBG möglich. Die Beurteilung der thermischen Schutzwirkung des RBS erfolgt dabei anhand von Brandprüfungen an mechanisch belasteten Trägern sowie an unbelasteten Bauteilabschnitten. Die Bauteile werden hierbei, entsprechend der üblichen Einbausitu-

1) I-, T-, U- und L-förmige Walz- und zusammengesetzte Profile

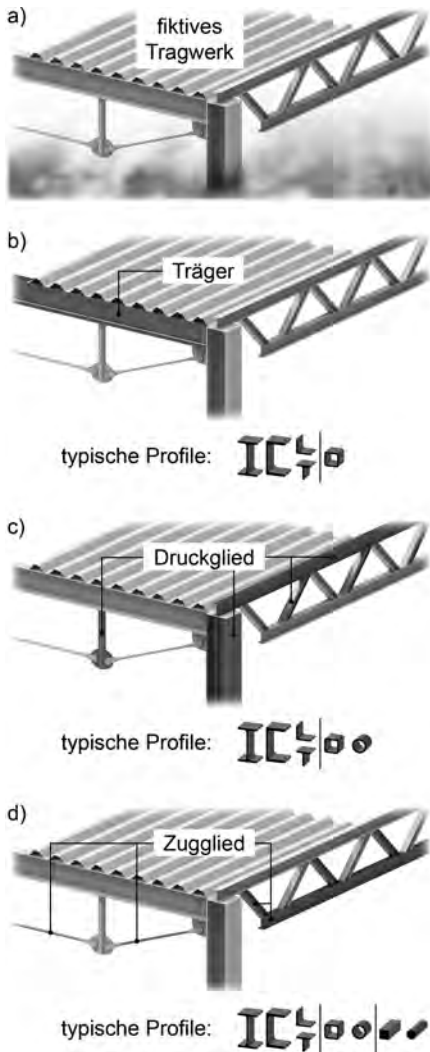


Bild 11. Fiktives Mustertragwerk mit Unterteilung nach der Beanspruchungsart und den jeweils typischerweise eingesetzten Profilarten

ation von Trägern, in horizontaler Einbaulage und mit einer dreiseitigen Brandbeanspruchung getestet. Grundlage für die Anwendung auf den als Einzelstab oder für zusammengesetzte Querschnitte verwendeten L-, T- und U-Profilen bilden die an I-Profilen bestimmten Ergebnisse. Eine Anwendung auf Trägern mit geschlossenem Profil, d. h. rechteckige (RHP) und quadratische Hohlprofile (QHP), ist ebenfalls möglich. Voraussetzung hierfür sind, analog zur Prüfsystematik für offene Profile, entsprechende mechanisch belastete und unbelastete Brandprüfungen mit dieser Profilart. Die Prüfung von RBS auf Trägern mit KHP oder Vollprofilen ist in der Prüfsystematik nicht vorgesehen. Dies ist auch nicht nötig, da es sich hierbei um unübliche An-

wendungsfälle handelt. Für die Anwendung von RBS auf geschraubten Anschlusskonstruktionen von Trägern an Stützen wird auf [37] verwiesen.

4.2.2 Druckbeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil

Die Prüfung von druckbeanspruchten Bauteilen mit offenem oder geschlossenem Profil erfolgt ebenfalls auf der in [26] und [15] festgelegten Prüfsystematik. Eine Anwendung von RBS auf diesen Bauteilen ist daher im Rahmen der abZ bzw. ETA in Verbindung mit einer aBG grundsätzlich möglich. Die thermische Schutzwirkung des RBS wird anhand von Brandprüfungen an mechanisch belasteten Stützen und unbelasteten Bauteilabschnitten beurteilt. Entsprechend der üblichen Einbausituation von Stützen erfolgen die Brandversuche in vertikaler Einbaulage und mit einer vierseitigen (allseitigen) Brandbeanspruchung. Bei druckbeanspruchten Bauteilen mit geschlossenem Profil muss im Allgemeinen eine gesonderte Beurteilung von kreisförmigen und rechteckigen/quadratischen Hohlprofilen erfolgen. Folglich sind für beide Querschnittsformen eigene Brandprüfungen erforderlich, wodurch sich unterschiedliche TSD-Tabellen ergeben. Alternativ kann nach [15] anhand einer Vergleichsprüfung die für das RBS kritischere Querschnittsform identifiziert werden. Die für diese Querschnittsform ermittelten TSD-Tabellen können dann auch auf die jeweils andere Profilform angewendet werden. Diese Vorgehensweise reduziert den Prüfaufwand, allerdings sind dann für die weniger kritische Form des Hohlprofils die höheren TSD zu verwenden. Analog zu den biegebeanspruchten Bauteilen sind auch bei druckbeanspruchten Bauteilen Vollprofile von der Prüfsystematik ausgeschlossen, da es sich hierbei um einen unüblichen Anwendungsfall handelt. Im Allgemeinen sind bei druckbeanspruchten Bauteilen keine Einschränkungen hinsichtlich der Einbaulage vorhanden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das RBS in der Regel sowohl auf biegebeanspruchten (horizontal) als auch auf druckbeanspruchten (vertikal) Bauteilabschnitten getestet wird, vergleiche dazu auch Abschnitt 5.3.

4.2.3 Zugbeanspruchte Bauteile mit offenem oder rechteckigem geschlossenem Profil

Unabhängig von der verwendeten Profilart ist die Anwendung von RBS auf zugbeanspruchten Bauteilen bisher nur unzureichend durch die bestehende Prüfsystematik abgebildet. Folglich sind Stahlzugglieder nicht ohne Weiteres Bestandteil des zulassungsbasierten Anwendungsbereichs von RBS. Seitens der Bauwirtschaft, Planer und Beschichtungshersteller bestand in Deutschland ein Interesse, basierend auf nationalen Zulassungen, RBS auch auf den häufig für Stahlfachwerke eingesetzten Zuggliedern mit offenem Profil zu verwenden. Ausgehend von den im nationalen Zulassungsverfahren vorgesehenen Brandprüfungen an biegebeanspruchten Bauteilen mit I-Profil wurde anhand von numerischen

Vergleichsrechnungen untersucht, inwieweit sich diese Ergebnisse auf zugbeanspruchte Bauteile übertragen lassen. Die Beurteilung erfolgte im Hinblick auf die Haftfähigkeit des RBS durch eine Gegenüberstellung der an einem Zugglied sowie in der Biegezugzone eines Trägers auftretenden Dehnungen. Der Vergleich setzt voraus, dass beide Bauteile die gleiche Querschnittsgeometrie aufweisen. Im Rahmen des an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführten Forschungsvorhabens [14] konnte nachgewiesen werden, dass eine Erweiterung des in der abZ angegebenen Anwendungsbereichs auf Zugglieder mit I-Profil möglich ist. Dies wurde durch spätere Untersuchungen [38] untermauert. Voraussetzung für die Übertragbarkeit ist, dass das RBS das in [26] beschriebene Prüfprozedere erfolgreich durchlaufen hat und entsprechende Brandversuche an mechanisch belasteten Trägern durchgeführt wurden. Darüber hinaus ist der für diese Zugglieder maximal mögliche Lastausnutzungsgrad im Brandfall auf $\mu_{fi} \leq 0,5$ zu begrenzen. Ferner ist zu beachten, dass ein Träger in der Regel einer dreiseitigen und ein Zugglied einer vierseitigen Brandbeanspruchung ausgesetzt ist. Dies führt dazu, dass, auch bei identischem Bauteilquerschnitt, der Profilmfaktor zunimmt und sich infolgedessen höhere TSD ergeben. Eine entsprechende Anpassung des in den abZ angegebenen Anwendungsbereichs ist im Jahr 2011 erfolgt [34].

Da die Prüfsystematik in [26] und [15] in der Regel Brandprüfungen sowohl an biegebeanspruchten (horizontal) als auch druckbeanspruchten (vertikal) Bauteilen mit I-Profil-Querschnitt umfasst, besteht bei Zuggliedern mit offenem Profil keine Einschränkung hinsichtlich der Einbaulage.

Aufgrund der geometrischen Ähnlichkeit mit I-Profilen ist es nach [34] möglich, diese Regelung ohne zusätzliche Brandprüfungen auf L-, T- und U-Profile zu übertragen. Im Rahmen der Zulassungsanpassung wurde auch eine Präzisierung der Bauteilbezeichnungen vorgenommen. Statt der Bezeichnung Träger, Stütze oder Fachwerkstab erfolgt seit 2011 eine Unterteilung nach der statischen Beanspruchung, d. h. Träger, Druckglied oder Zugglied.

Um den Anwendungsbereich der ETA äquivalent zur abZ auf zugbeanspruchte Bauteile mit offenem Profil zu erweitern, ist eine gutachterliche Stellungnahme einer kompetenten Stelle sowie eine daraus durch das DIBt erteilte aBG erforderlich. Dabei wird überprüft, ob die im Rahmen der ETA durchgeführten Brandprüfungen an biegebeanspruchten Bauteilen mit I-Profil mit einem mindestens genau so hohen Lastausnutzungsgrad im Brandfall (μ_{fi}) durchgeführt wurden wie beim nationalen Zulassungsverfahren.

Die in Deutschland, auf Basis von Brandprüfungen an mechanisch belasteten Trägern mit I-Profil, mögliche Erweiterung des zulassungsbasierten Anwendungsbereichs auf Zugglieder mit offenem Profil ist prinzipiell auch für rechteckige und quadratische Hohlprofile möglich. Wichtigste Voraussetzung ist das Vorhanden-

sein einer Brandprüfung an einem mechanisch belasteten Träger mit einem solchen Querschnitt. Da üblicherweise keine Brandversuche an mechanisch belasteten Trägern mit KHP oder Vollprofil durchgeführt werden, sind für die Anwendung von RBS auf Zuggliedern mit diesen Profilformen eigenständige Brandversuche unter reiner Zugbeanspruchung erforderlich. Hierauf wird im nächsten Abschnitt detailliert eingegangen.

4.2.4 Zugbeanspruchte Bauteile mit Vollprofil oder kreisrundem geschlossenem Profil

Im Rahmen der abZ bzw. aBG ist in Deutschland eine Erweiterung auf zugbeanspruchte Bauteile mit Vollprofil oder Hohlprofil möglich. Hierzu sind Brandversuche an mechanisch belasteten Zuggliedern sowie gegebenenfalls an weiteren unbelasteten Bauteilabschnitten erforderlich. Die entsprechenden wissenschaftlichen Grundlagen wurden mit den Untersuchungen in [12, 13, 35] geschaffen (s. Bild 12). Ferner wurde darauf aufbauend durch eine aus dem nationalen DIN-Normenausschuss (NA 005-52-02 AA) heraus gebildete Expertengruppe für RBS (s. a. Abschnitt 5), die vom Erstautor des vorliegenden Beitrags koordiniert wird, in Abstimmung mit dem DIBt ein Vorschlag [36] für ein entsprechendes Prüf- und Bewertungsverfahren erar-

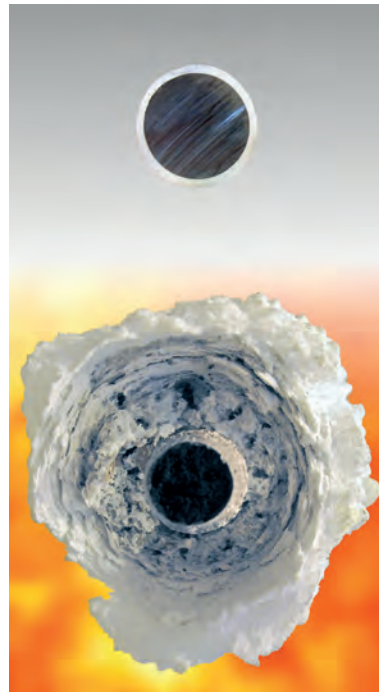


Bild 12. Aufschäumung eines wasserbasierten RBS an einem Stahlzugglied (oben: Querschnitt eines KVP D20 mm mit einer TSD von 2,5 mm vor dem Brandversuch; unten: Querschnitt nach dem Brandversuch mit einer Schaumhöhe von ca. 25 mm)

beitet. Der Prüfvorschlag sieht vor, dass für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des RBS Brandprüfungen an mechanisch zugbeanspruchten Bauteilen durchzuführen sind. Für die Anwendung von RBS auf den o. g. Bauteilen ist dieser Prüfvorschlag Bestandteil der Vorgehensweise, die vom DIBt für die Erteilung einer abZ bzw. abG angewendet wird. Diese bereits in Deutschland etablierte Vorgehensweise dient mitunter als Erfahrungsgrundlage für die entsprechenden europäischen Normungsbemühungen, siehe hierzu Abschnitt 5.3 und 7.3.1. Für die spezielle Anwendung eines RBS auf Stahlzuggliedern mit KVP und KHP wurde die erste und bislang einzige abG [21] (zuvor abZ [39]) durch das DIBt auf der Grundlage von an der BAM durchgeführten Brandprüfungen erteilt. Da die in der Zulassung angegebenen Werte für die TSD ausschließlich auf mechanisch belasteten Brandprüfungen basieren, sind je nach Höhe des Lastausnutzungsgrads im Brandfall unterschiedliche TSD-Tabellen ausgewiesen. Neben dem Abgleich des vorhandenen Lastausnutzungsgrads im Brandfall ist durch eine statische Berechnung nachzuweisen, dass die Standsicherheit der Gesamtkonstruktion infolge der auftretenden Verformungen des Zugglieds für die gesamte Feuerwiderstandsdauer gewährleistet ist, vergleiche dazu auch Abschnitt 5.3. Ein solcher Nachweis ist daher unerlässlich und kann ggf. dazu führen, dass eine niedrigere Bemessungstemperatur für das RBS gewählt werden muss, als bei alleiniger Betrachtung der Tragfähigkeit des Einzelbauteils erforderlich wäre. Dies war beispielsweise in der „Alten Aktienspinnerei“ in Chemnitz der Fall (s. Bild 13). Um ein Durchschlagen der Gewölbedecken im Brandfall zu verhindern, war die Begrenzung der Stahltemperatur und der sich daraus ergebenden Längsverformung der Zuggliedunterspannungen entscheidend.

Generell muss beachtet werden, dass sich aufgrund der Wirkungsweise von RBS eine signifikante Verlangsa-

mung der Erwärmung des Stahlbauteils in der Regel erst ab Stahltemperaturen von mehr als 200 °C einstellt. Bei vorgespannten Zuggliedern kann infolge der thermischen Ausdehnung ein Verlust der Vorspannung auftreten, was zu erhöhten Verformungen führt.

Zugglieder mit Kreisvollprofil, insbesondere Zugstab-systeme, werden häufig für Unterspannungen, Abhängungen sowie für Aussteifungsverbände im Dach- und Wandbereich eingesetzt. Aufgrund des filigranen Querschnitts und der ausgeprägten Oberflächenkrümmung stellen die Kreisvollprofile eine besondere Herausforderung für RBS dar. Daher sind bei gleich hoher Feuerwiderstandsdauer meist höhere TSD erforderlich als bei üblichen Träger- oder Stützenprofilen. Wie bereits bei den druckbeanspruchten geschlossenen Profilen muss auch bei den zugbeanspruchten Voll- und Hohlprofilen eine gesonderte Beurteilung von kreisförmigen und rechteckigen/quadratischen Querschnitten erfolgen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „FIRESTEMIC“ [20] wird aktuell an der BAM untersucht, inwieweit sich Ergebnisse von Zuggliedern mit Kreisvollprofil auf rechteckige/quadratische Vollprofile übertragen lassen, siehe hierzu Abschnitt 7.3.1. Ferner wird untersucht, wie der Einfluss unterschiedlicher Einbaulagen auf die Wirksamkeit des RBS berücksichtigt werden kann. Die Orientierung der Bauteile ist dabei variabel, d. h. horizontal, vertikal oder geneigt.

Neben den Zuggliedern selbst werden derzeit auch die in den Anschlussbereichen verwendeten Spezialbauteile (z. B. Gabelköpfe, Ringscheiben, Knotenbleche usw.) in der nationalen und europäischen Prüfsystematik nicht betrachtet. Um die Feuerwiderstandsfähigkeit eines Zugstabsystems zu gewährleisten, müssen jedoch auch diese Bereiche gegen eine zu schnelle Erwärmung im Brandfall und einen damit verbundenen Festigkeitsverlust geschützt werden. Eine Untersuchung der Fragestellung erfolgte in einem Forschungsvorhaben, dessen Ergebnisse im Abschnitt 7.2.1 dargestellt werden.



Bild 13. „Alte Aktienspinnerei“ in Chemnitz (aktuelle Nutzung des Gebäudes als Bibliothek). Basierend auf einem Naturbrandszenario wurde eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten für die Zuggliedunterspannungen der Gewölbedecken durch den Einsatz eines RBS erreicht; a) Entkernung Westflügel, b) Westflügel nach Sanierung (Fotograf: Till Schuster; Bauherr: Freistaat Sachsen Sächsisches Staatsministerium der Finanzen, vertreten durch den Staatsbetrieb Sächsisches Immobilien- und Baumanagement Niederlassung Chemnitz)