

# Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme im Stahlbau

Leitfaden des Arbeitsausschusses Brandschutz

Januar 2026 (1. Auflage)

bauforumstahl e.V.  
Sohnstraße 65  
40237 Düsseldorf  
[sekretariat@bauforumstahl.de](mailto:sekretariat@bauforumstahl.de)  
[www.bauforumstahl.de](http://www.bauforumstahl.de)

### © Copyright - Klausel

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Autoren, der Verlag und der Hersteller können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen keine Haftung übernehmen. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind daher ausgeschlossen. Für alle Hinweise und Verbesserungsvorschläge sind Herausgeber und Verlag stets dankbar. Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung von elektronischen Medien.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, besonders die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Bildentnahme, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Nachspeicherung und Auswertung von Datenverarbeitungsunterlagen, bleiben auch bei Verwendung von Teilen des Werkes, der Verlag vorbehalten. Rechtsansprüche aus der Benutzung der vermittelten Daten sind ausgeschlossen. Bei gewerblichen Zwecken dienender Vervielfältigung ist an den Verlag gemäß § 54 UrhG eine Vergütung zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

**Herausgeber:**  
**bauforumstahl e. V., Düsseldorf**

Vertrieb:  
Stahlbau Verlags- und Service GmbH, Düsseldorf

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	4
2	Begriffe.....	4
3	Funktionsweise .....	5
4	Zulassung .....	5
5	Dauerhaftigkeit.....	6
5.1	Allgemein .....	6
5.2	Bewertung der Dauerhaftigkeit nach dem deutschen Zulassungsverfahren ....	6
5.3	Erweiterung der Nutzungsdauer auf 25 Jahre.....	8
5.4	Praktische Anwendung .....	8
5.5	Bestimmungen für Nutzung, Unterhalt und Wartung.....	9
6	Regelanwendung .....	9
6.1	Festlegung von Trockenschichtdicken und Nachweis der Feuerwiderstandsdauer .....	9
7	Anwendung bei Trägern, Stützen, Zuggliedern und Fachwerkträgern .....	10
7.1	Allgemein .....	10
7.2	Biegebeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil.....	11
7.3	Druckbeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil .....	12
7.4	Zugbeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil .....	12
7.5	Zugbeanspruchte Bauteile mit Vollprofil.....	13
8	Sonderfälle .....	14
8.1	Bauteile mit kombinierter mechanischer Beanspruchung .....	14
8.2	Bauteile mit L-, T-, U-Profil .....	14
8.3	Stahlträger mit Stegöffnungen .....	14
9	Umgang mit anschließenden Bauteilen.....	14
9.1	Schraubenverbindungen .....	14
10	Heißbemessungsbeispiel .....	15
11	Qualitätssicherung/Abnahme in der Ausführung .....	17
	Literaturverzeichnis .....	18

## 1 Einleitung

Die Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme im Stahlbau ist seit mehreren Jahrzehnten in Deutschland eine geregelte Maßnahme, um unterschiedliche Brandschutzanforderungen tragender Stahlbauteile zu erfüllen. Trotzdem gibt es immer wieder Diskussionen über damit im Zusammenhang stehende Aspekte der Verwendung.

Vor diesem Hintergrund rief der DSTV-Arbeitsausschuss Brandschutz Ende 2024 eine Ad-hoc-Gruppe ins Leben, um den Stand der Technik auf diesem Gebiet ausführlich zu dokumentieren.

Das Ergebnis ist dieser Leitfaden, der wiederkehrende Fragestellungen zur Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen aufgreift und darauf die richtigen Antworten gibt sowie den Bezug zu den zugehörigen Regelwerken herstellt.

Die Interessengemeinschaft Brandschutz-Beschichtungen, hat mit der IGSB-Richtlinie 01 „Reaktive Brandschutzbeschichtungen auf Stahlbauteilen“ [1] ein eigenes Schriftstück veröffentlicht.

## 2 Begriffe

### Ausnutzungsgrad im Brandfall

Der Ausnutzungsgrad von Bauteilen  $\mu_0$  nach DIN EN 1993-1-2 zum Zeitpunkt  $t = 0$  ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ) [2]. Der Ausnutzungsgrad von Bauteilen  $\mu_{fi}$  nach aBG zum Zeitpunkt  $t = 0$  ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ) ist äquivalent dem Ausnutzungsgrad  $\mu_0$ .

### Profilart

offene, geschlossene oder Vollprofile

### Querschnittsform

kreisrunde, rechteckige oder quadratische Profile

### Profilmfaktor ( $A_m/V$ )

Verhältnis der beflamnten Bauteiloberfläche zu Bauteilvolumen

### Trockenschichtdicke (TSD)

Dicke des intumeszierenden Anstrichs nach der Trocknungszeit

### Reaktives Brandschutzsystem (RBS)

Eine ausführliche Beschreibung zu RBS findet sich im Stahlbau-Kalender 2022: Türme und Maste, Brandschutz [3]. In dem ca. 30-seitigen Beitrag werden alle wesentlichen Aspekte zu RBS behandelt: Wirkungsweise, Typen, Applikation, Einflussgrößen, Regelungen, Anwendung, Normen, Dauerhaftigkeit und Forschung.

### 3 Funktionsweise

Reaktive Brandschutzsysteme (RBS), auch intumeszierende Beschichtungen (IC = Intumescent Coatings) genannt, werden dazu verwendet den Feuerwiderstand von Stahlkonstruktionen zu erhöhen. Durch die profilfolgende Applikation von RBS lassen sich auch die architektonischen Anforderungen an die Stahlkonstruktion erfüllen. Ferner führen die geringen Beschichtungsdicken zu vernachlässigbaren Zusatzlasten für die Konstruktion.

Infolge erhöhter Temperaturen im Brandfall erfolgt eine chemische Reaktion des RBS, wodurch sich dieses um ein Vielfaches der ursprünglichen Dicke ausdehnt und eine thermische Schutzschicht um das Stahlbauteil ausbildet. Die resultierende Wärmeleitfähigkeit der thermischen Schutzschicht verändert sich während des Aufschäumprozesses. Der Effekt der Intumescenz ist irreversibel. Durch die Reaktion und Expansion des RBS wird die Erwärmung des Stahlbauteils und der daraus resultierende temperaturbedingte Festigkeitsverlust des Stahls zeitlich verzögert. Folglich lässt sich eine höhere Feuerwiderstandsdauer als bei einer ungeschützten Stahlkonstruktion erreichen. Die mögliche Feuerwiderstandsdauer hängt von der Geometrie und Massigkeit des Stahlprofils, der einwirkenden Brandbeanspruchung und der applizierten Dicke und Zusammensetzung des verwendeten RBS ab.

### 4 Zulassung

Abbildung 1 beschreibt den häufig vorkommenden Fall des Ablaufs eines Zulassungsverfahrens für die Verwendung eines reaktiven Brandschutzsystems in Deutschland auf Basis einer europäischen technischen Bewertung (engl. European Technical Assessment - ETA). Ausgangspunkt sind Brandprüfungen und Bewertungen einer europäischen notifizierten Stelle entsprechend dem europäischen Bewertungsdokument (engl. European Assessment Document) EAD 350402-00-1106 [4] in Verbindung mit der europäischen Prüfnorm EN 13381-8 [5]. Auf Grundlage der Bewertungen wird von einer europäischen Bewertungsstelle (Technical Assessment Body – TAB) eine ETA erstellt, anhand der eine CE-Kennzeichnung des Produkts erfolgen kann. Die ETA wird auf Antrag des Herstellers als Basis für die Erteilung einer allgemeinen Bauartgenehmigung – aBG durch das DIBt zugrunde gelegt. Eine aBG ist für die Anwendung eines reaktiven Brandschutzsystems in Deutschland erforderlich, da mit der ETA Produkteigenschaften bescheinigt werden und das Inverkehrbringen in den europäischen Binnenmarkt ermöglicht wird, jedoch nicht die nationalen (deutschen) Anforderungen an Bauwerke berücksichtigt sind. Für detailliertere Ausführungen sowie Informationen zum bisherigen nationalen Zulassungswesen in Form von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sei auf die Abschnitte 6.4, 6.5 und die Literatur verwiesen.

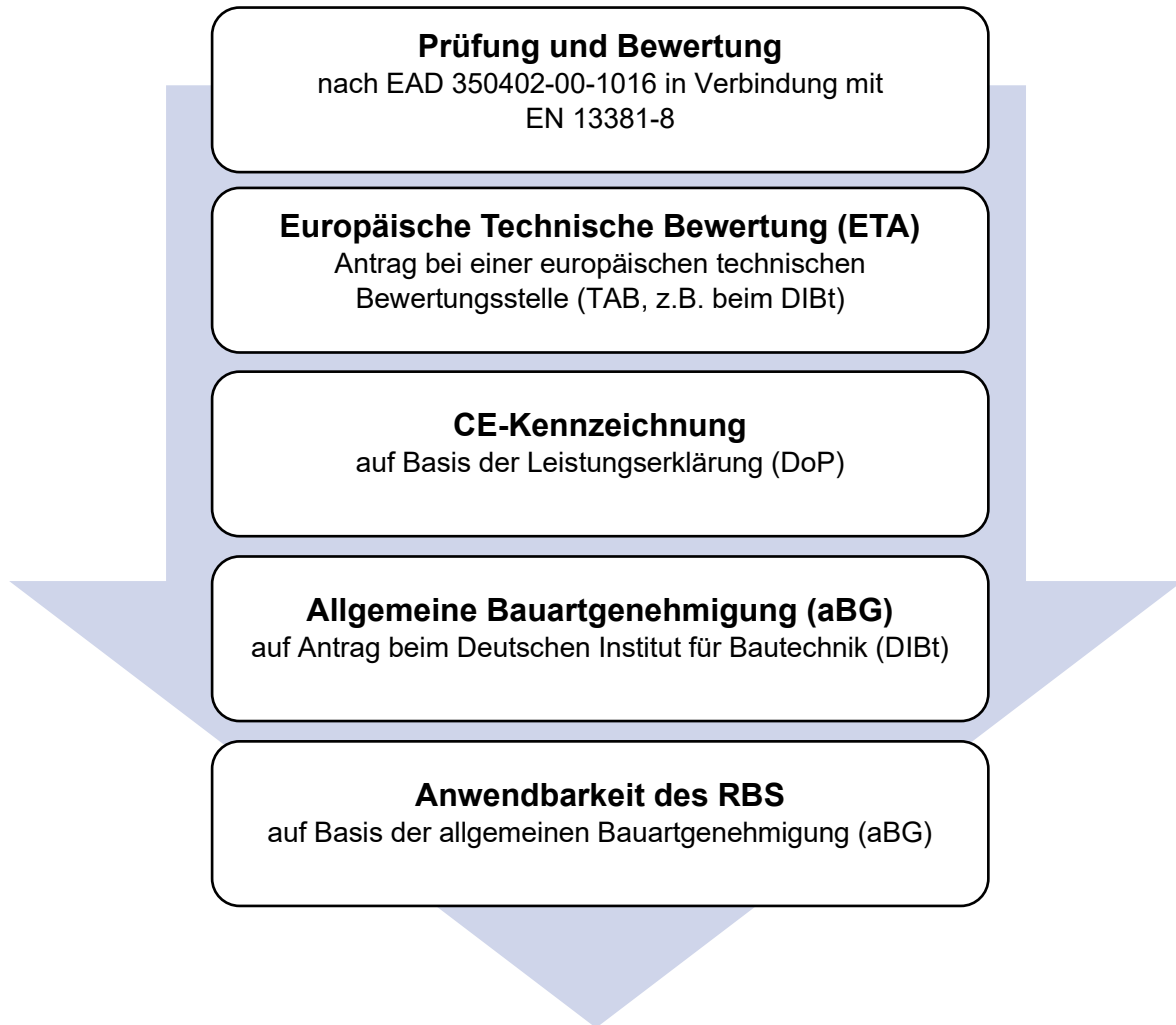


Abbildung 1: Zulassungsverfahren für reaktive Brandschutzsysteme im Stahlbau

## 5 Dauerhaftigkeit

### 5.1 Allgemein

Die Alterung von RBS wird durch klimatische Einflussfaktoren hervorgerufen. Der Nachweis der Dauerhaftigkeit erfolgt auf nationaler und europäischer Ebene für RBS auf unterschiedliche Weise. Ausführliche Informationen zum Nachweis der Dauerhaftigkeit sind nachfolgend beschrieben.

### 5.2 Bewertung der Dauerhaftigkeit nach dem deutschen Zulassungsverfahren

Die Zulassung von RBS auf nationaler Ebene in Deutschland basiert auf den Zulassungsgrundsätzen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) aus dem Jahr 1997 [6]. In den Zulassungen (abZ) heißt es: *„Zum Nachweis, dass die Eigenschaften des reaktiven Brandschutzsystems durch Alterung nicht beeinträchtigt werden, sind Alterungsprüfungen gemäß Abschnitt 2.1.2 an Proben, die 2, 5 und 10 Jahre*

ausgelagert wurden, durchzuführen. Die Ergebnisse dürfen von den beiden Zulassungsprüfungen festgestellten Werten nicht wesentlich abweichen. Bei wesentlichen Abweichungen kann die Zulassung widerrufen werden.“

Es erfolgen zunächst beschleunigte Kurzzeitbewitterungen unter Laborbedingungen, die nach bestandener Brandprüfung zu einer auf 2 Jahre befristeten Zulassung führen. Die Art der Bewitterung ist dabei vom Anwendungskategorien abhängig, d.h. Innen- oder Außenbereich. Nach 2 Jahren sowie weiteren 3 Jahren und abschließend weiteren 5 Jahren werden real bewitterte Prüfkörper entsprechend des angestrebten Anwendungsbereiches einer Brandprüfung unterzogen und bewertet. Sofern durch die Langzeitbewitterung keine Sachverhalte bekannt werden, die einen Verlust der Wirksamkeit des RBS belegen, ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit erbracht und die Geltungsdauer der Zulassung wird entsprechend verlängert. Ferner wird seitens des DIBt davon ausgegangen, dass bei einem Bestehen der Langzeitbewitterung mit keinen stofflich bedingten Ausfällen zu rechnen ist, weshalb die Nutzungsdauer auch über den Zeitraum von mehr als 10 Jahren gewährleistet ist. Folglich kann die Zulassung entsprechend verlängert werden, was durch eine Vielzahl an ausgeführten Projekten bestätigt wurde. Generell ist für die Dauerhaftigkeit des RBS eine fachgerechte Ausführung und dem Anwendungsbereich adäquate Nutzung erforderlich.

### Bewertung der Dauerhaftigkeit nach dem europäischen Bewertungsverfahren

Auf europäischer Ebene werden RBS auf Basis des Europäischen Assessment Documents (EAD 350402-00-1106) bewertet. Dabei werden vier verschiedene Anwendungskategorien unterschieden, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Anwendungskategorien gemäß EAD

Anwendungskategorien	Typ	Anwendungsszenarien	Bewitterungsbedingungen min. – max. Temperatur rel. Luftfeuchtigkeit
Trockener Innenbereich	Z <sub>2</sub>	rel. Luftfeuchtigkeit < 85 %, keine Temperatur unter 0°	5 – 40 °C 50 – 80 %
Feuchter Innenbereich (hohe Luftfeuchtigkeit)	Z <sub>1</sub>	rel. Luftfeuchtigkeit ≥ 85 %, keine Temperatur unter 0°	23 – 40 °C 50 – 100 %
Halbexponierter Bereich	Y	wie Innenbereich, Temperatur unter 0° möglich, kein Regen, begrenzte UV- Strahlung	-20 – 70 °C 20 – 95 %
Außenbereich (sämtliche Bedingungen)	X	alle klimatischen Bedingungen enthalten (Innen, halbexponiert und der Witterung ausgesetzt)	50 °C < 15 % (UV) + 25 °C Sprühwasser und Belastung nach Typ Y

Im Gegensatz zum nationalen deutschen Zulassungsverfahren wird auf europäischer Ebene auf die Bewitterung und Bewertung von real bewitterten Prüfkörpern verzichtet. Es werden ausschließlich beschleunigte Kurzzeitbewitterungen durchgeführt. Im Anschluss an die Kurzzeitbewitterungen erfolgt eine Brandprüfung, bei der die Zeit bis zum Erreichen einer Stahltemperatur von 500 °C nicht kleiner als 85 % der Zeit einer vergleichbaren nicht gealterten Referenzprobe ausfallen darf. Wird diese Anforderung

erfüllt, gilt die Dauerhaftigkeit als nachgewiesen. Die nach EAD bewerteten Bauprodukte erhalten in Deutschland einen Verwendbarkeitsnachweis in Form einer aBG, wobei die Dauerhaftigkeitsbewertung aus dem europäischen Verfahren übernommen wird.

Das EAD bewertet die Prüfanforderungen für die unterschiedlichen Anwendungskategorien auf der Grundlage einer anzunehmenden Nutzungsdauer von 10 Jahren. Der Antragsteller hat die Möglichkeit bei der Bewertungsstelle (TAB = Technical Assessment Body) für das RBS eine Nutzungsdauer von 25 Jahren zu erlangen, wenn ausreichend dokumentierte Nachweise dies belegen.

### **5.3 Erweiterung der Nutzungsdauer auf 25 Jahre**

Die Herausforderung eines Nachweises der Dauerhaftigkeit gemäß EAD für eine Nutzungsdauer von 25 Jahren ist das Fehlen validierter Nachweisverfahren. Wenn eine Erweiterung der Nutzungsdauer nicht auf der Grundlage eines einzelnen Nachweisverfahrens möglich ist, kann alternativ ein adäquater Nachweis auf Basis einer Kombination verschiedener Verfahren bzw. Methoden geführt werden. Verschiedene RBS konnten den Nachweis der Dauerhaftigkeit im trockenen Innenbereich ( $Z_2$ ) für eine Nutzungsdauer von 25 Jahren bereits erbringen. Das zugrunde liegende Konzept der Nachweisführung wurde mit der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) und einer TAB-Stelle abgestimmt. Die europäischen Bewertungsdokumente (ETA) der Produkte wurden entsprechend angepasst. Die allgemeinen Bauartgenehmigungen (aBG) [7] bestätigen zudem, dass im deutschen Bauartgenehmigungsverfahren der Nachweis der Dauerhaftigkeit ebenfalls geführt wurde, so dass bei fachgerechter Ausführung eine Nutzungsdauer von mindestens 25 Jahren gegeben ist.

Vergleichbar abgestimmte Nachweiskonzepte für eine Verlängerung der Nutzungsdauer nach EAD über die Anwendungskategorie  $Z_2$  hinaus liegen bisher nicht vor. Aufgrund der Anforderungsprofile sind diese auch nicht ohne Weiteres zu definieren. Eine Nachweisführung durch Verknüpfung des EAD mit einer Korrosionsschutznorm z. B. nach DIN EN ISO 12944-6 [8] ist nicht ausreichend. Zum einen sieht das EAD diese Verknüpfung als Nachweisführung normativ nicht vor und zum anderen sind RBS im klassischen Sinn keine Korrosionsschutzbeschichtungen, da RBS in der Regel keine korrosionsschutzaktiven Pigmente enthalten.

### **5.4 Praktische Anwendung**

Grundsätzlich lassen sich RBS in zwei Kategorien unterteilen. 1-komponentige Systeme basieren auf der physikalischen Trocknung, d.h. Verdunstung von Wasser oder Lösungsmittel. Bei mehrkomponentigen Systemen erfolgt eine chemische Vernetzung von Harz- und Härter-Komponenten. Die zur Ausbildung der thermischen Schutzschicht im Brandfall notwendigen reaktiven Substanzen weisen bei beiden Kategorien von RBS eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Wasserlöslichkeit auf. Das für das RBS eingesetzte Bindemittel hat daher einen entscheidenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und der Resistenz gegenüber Bewitterungseinflüssen.

Generell ist die polymere Chemie der mehrkomponentigen RBS äußerst dauerhaft und unempfindlich gegen den Einfluss von Feuchte und Nässe, weshalb diese Produkte insbesondere im Außenbereich Anwendung finden. Zu beachten ist, dass einige Polymere nicht UV-stabil sind, z.B. Polymere auf Epoxidbasis, weshalb es zu einer farbveränderten Kreidung der Oberfläche kommen kann. Ist diese unerwünscht, muss die Oberfläche der Brandschutzbeschichtung mit einem UV-stabilen Decklack geschützt werden. Je nach projektspezifischen Anforderungen ist der Decklack auch zum Erhalt der Dauerhaftigkeit und Farbgebung erforderlich.

1-komponentige RBS sind insbesondere vorteilhaft, wenn die Applikation auf der Baustelle stattfinden soll und zumindest ein temporärer Schutz gegen Bewitterung vorhanden ist. Geht die Anforderung über den trockenen Innenbereich ( $Z_2$ ) hinaus, also auch bei einer befristeten Lagerung beschichteter Bauteile auf der Baustelle, muss das RBS mit einem Decklack geschützt werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Schutz gegen Bewitterungseinflüsse nur dann dauerhaft ist, wenn der Decklack unbeschädigt bleibt bzw. im Fall einer mechanischen Beschädigung umgehend ausgebessert wird. Inzwischen gibt es auch weiterentwickelte 1-komponentige RBS einzelner Hersteller, die eine zeitweise Lagerung beschichteter Bauteile auf der Baustelle ermöglichen, ohne dass ein zusätzlicher Schutz durch einen Decklack erforderlich ist. Wie lange und unter welchen Randbedingungen diese Lagerung möglich ist, ist mit dem jeweiligen Produkthersteller abzuklären. Bei der Anwendung im trockenen Innenbereich ( $Z_2$ ) ist die Verwendung eines Decklacks nur notwendig, wenn besondere farbgebende Anforderungen an die Oberfläche zu erfüllen sind.

## **5.5 Bestimmungen für Nutzung, Unterhalt und Wartung**

Bei allen Überlegungen und Nachweisen zur Dauerhaftigkeit darf ein grundsätzliches Element bzgl. der Anwendung von Brandschutzprodukten nicht außer Acht gelassen werden. Lange Nutzungsdauern können nur erreicht werden, wenn die Brandschutzprodukte fachgerecht ausgewählt, angewendet und zudem regelmäßig inspiziert werden, siehe Kapitel 11. In den nationalen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) oder den allgemeinen Bauartgenehmigungen (aBG) werden Bestimmungen für die Nutzung, den Unterhalt und die Wartung definiert. So hat der Verarbeiter seinen Auftraggeber darauf hinzuweisen, dass die Brandschutzwirkung auf Dauer nur sichergestellt ist, wenn sich das Brandschutzprodukt in einem ordnungsgemäßen Zustand befindet. Das bedeutet, dass die Brandschutzprodukte für Kontroll- und evtl. Instandsetzungsarbeiten zugänglich sein müssen. Kommt der Betreiber eines Bauwerks seiner Verpflichtung nicht nach, sind lange Nutzungsdauern auch nicht zu erwarten.

## **6 Regelanwendung**

### **6.1 Festlegung von Trockenschichtdicken und Nachweis der Feuerwiderstandsdauer**

Die erforderliche Trockenschichtdicke (TSD) des reaktiven Brandschutzsystems (RBS) wird in Abhängigkeit der zu erzielenden Feuerwiderstandsklasse, der Profilart,

dem Profilkfaktor, der mechanischen Beanspruchungsart sowie ggf. der Einbaulage und des Lastausnutzungsgrads im Brandfall aus den für die Anwendung relevanten bauaufsichtlichen Dokumenten (ETA, abZ, aBG) entnommen. Die in den TSD-Tabellen angegebene Feuerwiderstandsdauer ist für den jeweiligen Anwendungsfall durch einen Nachweis der Tragfähigkeit des Bauteils nach DIN EN 1993-1-2 [2] sowie weiteren Anforderungen der aBG zur Standsicherheit zu bestätigen.

Eine Erhöhung der TSD ermöglicht eine verbesserte thermische Schutzwirkung des RBS und somit eine höhere Feuerwiderstandsdauer für das Stahlbauteil. Es ist zu beachten, dass sich aufgrund der Wirkungsweise von RBS eine signifikante Verlangsamung der Erwärmung des Stahlbauteils erst ab Stahltemperaturen oberhalb von 200 °C einstellt. Zur Berücksichtigung der Profیلgeometrie wird auf den Profilkfaktor  $A_m/V$  zurückgegriffen. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis zwischen der beflaminten Oberfläche des Bauteils  $A_m$  und dem Bauteilvolumen  $V$ . Der Profilkfaktor schafft eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Bauteilgeometrien. Ein hoher Profilkfaktor lässt in der Regel auf ein filigranes Bauteil und ein niedriger Wert auf ein massiges und kompaktes Bauteil schließen. Da sich schlanke Profile in der Regel schneller erwärmen als gedrungene Querschnitte, sind mit ansteigendem Profilkfaktor meist höhere TSD erforderlich.

Die angestrebte Feuerwiderstandsdauer, die Profیلart, die mechanische Beanspruchungsart und die Einbaulage ergeben sich in der Regel aus den Festlegungen für das zu schützende Bauteil. Ferner sind vom Tragwerksplaner die Stahlsorte, die Festigkeitsklasse, der Bauteilquerschnitt, der Profilkfaktor, der Lastausnutzungsgrad im Brandfall und eine Bemessungstemperatur zu wählen. Anhand dieser Angaben kann aus der hierfür passenden TSD-Tabelle die erforderliche TSD bestimmt werden. Anschließend muss für den Brandfall der Nachweis der Tragfähigkeit des Bauteils sowie der Nachweis der Standsicherheit der Gesamtkonstruktion erbracht werden. Im Allgemeinen erfolgt dies mittels einer Heißbemessung [1]. Können die Nachweise nicht erfüllt werden, kann eine Herabsetzung der Bemessungstemperatur eine einfache und wirksame Lösung darstellen, da dies zwar zu einer höheren TSD führt aber am Bauteil selbst keine Änderungen erfordert. Es sind auch andere Änderungen möglich.

## 7 Anwendung bei Trägern, Stützen, Zuggliedern und Fachwerkträgern

### 7.1 Allgemein

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 anhand von mechanisch belasteten und unbelasteten Brandprüfungen. Der in den bauaufsichtlichen Dokumenten angegebene Anwendungsbereich ergibt sich aus dem zugrundeliegenden Prüfumfang. Üblicherweise werden Träger und/oder Stützen einer Brandbeanspruchung nach Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) ausgesetzt [9]. Für die zu testenden Bauteile werden die typischerweise eingesetzten Profیلarten verwendet, d.h. I- und H-Profile für die Gruppe der *offenen Profile* sowie rechteckige, quadratische oder kreisrunde

Hohlprofile für die Gruppe der *geschlossenen Profile*. Der Anwendungsbereich von RBS umfasst daher in der Regel Träger und Stützen mit den genannten Profilarten. Üblicherweise ist damit auch eine Beschränkung der Anwendbarkeit des RBS auf warmgewalzten Baustahl S235, S275 und S355 verbunden. Unabhängig von der verwendeten Profilart sind Brandversuche an Zuggliedern mit RBS bisher selten, weshalb aktuell wenige RBS diesen Anwendungsbereich beinhalten. Gleiches gilt für zug- oder druckbeanspruchte kreisrunde oder rechteckige/quadratische Vollprofile.

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. Dieser Effekt wird bisher ausschließlich bei Zuggliedern berücksichtigt. In den Zulassungen für Trägern und Stützen gibt es keine Einschränkung hinsichtlich der Einbaulage. Wird bei diesen Bauteilen von der typischen Einbaulage abgewichen, wird empfohlen die TSD-Tabellen für Bauteile mit passender Einbaulage ebenfalls mit zu berücksichtigen und die höhere TSD auszuwählen. Analog ist bei einer allseitigen Beflammung der ungünstigere Wert aus Trockenschichttabellen für Träger und Stützen zu wählen.

Mit dem Ziel den gesamten Anwendungsbereich von tragenden Bauteilen im Stahlbau abzudecken, haben einzelne Hersteller Zulassungen für ihre Produkte für alle drei Beanspruchungsarten, d.h. Biegung, Druck und Zug, und den üblicherweise eingesetzten Profilarten erwirkt. Hierzu zählt auch die Anwendung auf Fachwerkträgern, welche aus druck- und zugbeanspruchten Stäben bestehen, sowie der Einsatz für Zugglieder mit Vollprofil, welche häufig als Aussteifungselement oder Unterspannung genutzt werden. Nachfolgende Ausführungen folgen der Einteilung der Bauteile in den Zulassungen.

## **7.2 Biegebeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil**

Die Beurteilung der thermischen Schutzwirkung des RBS erfolgt anhand von Brandprüfungen an unbelasteten Bauteilabschnitten und mechanisch belasteten Referenzträgern. Die Bauteile werden, entsprechend der üblichen Einbausituation, in horizontaler Einbaulage und mit einer dreiseitigen Brandbeanspruchung getestet. Aufgrund der Biegebeanspruchung handelt es sich bei den geprüften Bauteilen in der Regel um offene Profile, d.h. I- und H-Profile. Folglich umfasst der Anwendungsbereich vornehmlich diese Profilart mit den genannten Randbedingungen.

Eine Anwendung von RBS auf Trägern mit geschlossenem Profil, d.h. rechteckige und quadratische Hohlprofile, ist grundsätzlich möglich. Voraussetzung hierfür sind, analog zur Prüfsystematik für offene Profile, entsprechende mechanisch belastete und unbelastete Brandprüfungen mit dieser Profilart. Träger mit kreisrundem Hohlprofil oder Vollprofil sind unüblich und daher nicht in der Prüfsystematik und dem Anwendungsbereich vorgesehen.

### 7.3 Druckbeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil

Die thermische Schutzwirkung des RBS wird anhand von Brandprüfungen an unbelasteten Bauteilabschnitten und mechanisch belasteten Referenzstützen beurteilt. Entsprechend der üblichen Einbausituation erfolgen die Brandversuche in vertikaler Einbaulage und mit einer allseitigen Brandbeanspruchung. Da in der Baupraxis sowohl Stützen mit offenem und geschlossenem Profil vorkommen, werden RBS meist auf beiden Profilarten getestet. Es ergeben sich den Profilarten zugehörige TSD-Tabellen. Bei Stützen mit geschlossenem Profil sind kreisförmige und rechteckige/quadratische Hohlprofile separat zu beurteilen, woraus unterschiedliche TSD-Tabellen resultieren. Alternativ kann anhand einer Vergleichsprüfung die für das RBS kritischere Querschnittsform identifiziert werden. Die für diese Querschnittsform ermittelte TSD-Tabelle kann dann auch auf die jeweils andere Form angewendet werden. Druckbeanspruchte Bauteile mit Vollprofile sind von der Prüfsystematik ausgeschlossen, da es sich hierbei um einen unüblichen Anwendungsfall handelt.

### 7.4 Zugbeanspruchte Bauteile mit offenem oder geschlossenem Profil

Brandprüfungen an Zuggliedern mit offenem oder geschlossenem Profil erfolgen bisher selten. Entsprechende Prüfmöglichkeiten mit mechanischer Belastungseinrichtung sind in Deutschland vorhanden, jedoch existiert keine nationale oder europäische Prüfnorm. Stahlzugglieder sind daher nicht ohne Weiteres Bestandteil des zulassungsbasierten Anwendungsbereichs von RBS. Dies führt in der Praxis insbesondere bei der Anwendung von RBS für Fachwerkträgern und den dort vorhandenen Zuggliedern zu Problemen. Abgestimmt mit dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ist im Rahmen des nationalen Zulassungsverfahrens eine Erweiterung des Anwendungsbereiches von RBS auf Zugglieder auf zwei Wegen möglich:

**Träger-Zugglied-Vergleich:** Es erfolgt eine vergleichende Betrachtung, bei der untersucht wird, inwieweit die Ergebnisse von Trägern auf Zugglieder übertragen werden können [10-13]. Dies ist möglich, da der Untergurt bei einem Träger eine Zugbeanspruchung aufweist. Wichtigste Voraussetzung für den Vergleich ist, dass das für Träger vorgeschriebene Prüfprozedere erfolgreich durchlaufen wurde und entsprechende Brandversuche an mechanisch belasteten Trägern vorliegen. Dies ist häufig für geschlossene Profile ein Problem, insbesondere kreisrunde Hohlprofile, da keine entsprechenden Prüfdaten an Trägern vorhanden sind, siehe Kapitel 7.2. Weiterhin muss beachtet werden, dass aufgrund der gewählten Vergleichsbetrachtung der für Zugglieder mögliche Lastausnutzungsgrad im Brandfall auf  $\mu_{fi} \leq 0,5$  begrenzt ist. Ferner ist zu berücksichtigen, dass ein Träger in der Regel einer dreiseitigen und ein Zugglied einer allseitigen Brandbeanspruchung ausgesetzt ist. Bei identischem Bauteilquerschnitt ist der Profilmfaktor eines Zuggliedes folglich höher als bei einem Träger, weshalb sich für das Zugglied eine höhere TSD ergibt. Der Träger-Zugglied-Vergleich erfolgt im Rahmen einer gutachterlichen Stellungnahme einer kompetenten Prüfstelle auf Basis bestehender Prüfdaten für Träger. Bei einer positiven Bewertung durch das DIBt wird die Erweiterung des Anwendungsbereiches auf Zugglieder mit offenem oder geschlossenem Profil mittels einer kurzen textlichen Ergänzung im Zulassungstext kenntlich gemacht. Anhand des Profilmfaktors für eine allseitige

Brandbeanspruchung des Zuggliedes wird die erforderliche TSD aus den TSD-Tabellen für Träger und Stützen unter Beachtung der entsprechenden Profilart ermittelt. Die jeweils höhere TSD ist dabei maßgebend. Dies liegt darin begründet, dass die TSD-Tabellen der Träger keine allseitige Brandbeanspruchung beinhalten und die TSD-Tabellen der Stützen den Einfluss einer Zugbeanspruchung nicht berücksichtigen. Ferner wird damit den möglichen Einbaulagen von Zuggliedern, d.h. von horizontal bis vertikal, Rechnung getragen.

**Brandversuche an Zuggliedern:** Es werden Brandprüfungen an zugbeanspruchten Bauteilen durchgeführt und ausgewertet, siehe beispielsweise die in [14] veröffentlichten Untersuchungen. Die Vorgehensweise ist damit analog zu Zuggliedern mit Vollprofil, siehe Kapitel 7.5. Der Ansatz ist allgemeingültig, an keine Vorbedingungen geknüpft und ermöglicht einen Lastausnutzungsgrad im Brandfall von  $\mu_{fi} \leq 0,65$ . Ferner wird damit die thermische Schutzwirkung des RBS und der Feuerwiderstand von Zuggliedern auf direktem Weg ermittelt. Das Erfordernis einer zusätzlichen Heißbemessung ist nicht gegeben, da der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall anhand des Lastausnutzungsgrades erfolgt. Dies ist eine deutliche Vereinfachung gegenüber dem Vorgehen bei den TSD-Tabellen für Träger und Stützen. Ein Nachweis der Verformungen der Gesamtkonstruktion ist weiterhin erforderlich. Mit dem beschriebenen Ansatz ist es möglich Zugglieder mit geschlossenem Profil, insbesondere kreisrunde Hohlprofile, in den Anwendungsbereich aufzunehmen. Die Erweiterung des Anwendungsbereiches wird in der Zulassung durch eigene TSD-Tabellen speziell für Zugglieder mit offenem oder geschlossenem Profil kenntlich gemacht.

## 7.5 Zugbeanspruchte Bauteile mit Vollprofil

Im Rahmen des nationalen Zulassungsverfahrens ist in Deutschland eine Erweiterung des Anwendungsbereiches von RBS auch auf Zugglieder mit Vollprofil möglich [15]. Seit 2015 gibt es RBS mit einer entsprechenden nationalen Zulassung für diesen Anwendungsbereich. Grundlage hierfür sind Brandversuche an mechanisch belasteten Zuggliedern mit Vollprofil sowie gegebenenfalls unbelasteten Bauteilabschnitten [16]. Die unbelasteten Bauteile dienen der Beurteilung der Einbaulage der Zugglieder, d.h. horizontal, vertikal oder geneigt. Eine ausführliche Heißbemessung ist nicht erforderlich, da die Prüfung und Bewertung des RBS auf Basis mechanisch belasteter Brandprüfungen erfolgt. Der Nachweis der Tragfähigkeit im Brandfall kann anhand des Lastausnutzungsgrades geführt werden. Dies ist eine deutliche Vereinfachung gegenüber dem Vorgehen bei den TSD-Tabellen für Träger und Stützen. Darüber hinaus muss die Standsicherheit der Gesamtkonstruktion infolge der auftretenden Verformungen für die gewählte Feuerwiderstandsdauer nachgewiesen werden. Bei vorgespannten Zuggliedern kann infolge der thermischen Ausdehnung ein Verlust der Vorspannung auftreten, was zu erhöhten Verformungen führt. Bei Vollprofilen muss eine separate Beurteilung von kreisförmigen und rechteckigen/quadratischen Querschnitten erfolgen. Aufgrund des filigranen Querschnitts und der ausgeprägten Oberflächenkrümmung stellen Kreisvollprofile eine besondere Herausforderung für RBS dar. Daher erfordern diese Zugglieder eine höhere TSD als die üblichen Träger- oder Stützenprofile. Derzeit erfolgt in den Zulassungen für Zugglieder eine Beschränkung der Anwendbarkeit des RBS auf

warmgewalzten Baustahl S235, S275 und S355. Eine zukünftige Erweiterung auf Stähle mit einer höheren Festigkeitsklasse und kaltverformte Stähle ist grundsätzlich möglich. Aktuell sind jedoch die genannten Einschränkungen zu beachten. Ferner dürfen die Anschlussbereiche der Zugglieder nicht außer Acht gelassen werden, siehe Kapitel 9.4.

Basierend auf der in Deutschland etablierten Vorgehensweise zur Erlangung einer Zulassung entsteht derzeit eine europäische Prüfnorm [16], welche nach Fertigstellung und Einbindung in [4], analog zu Trägern und Stützen die Erstellung einer ETA für diesen Anwendungsbereich eröffnet.

## **8 Sonderfälle**

### **8.1 Bauteile mit kombinierter mechanischer Beanspruchung**

Die zugrundeliegende Prüfsystematik für die Bewertung von RBS sieht keine Kombination der mechanischen Beanspruchung vor. In den Anwendungsdokumenten für RBS (abZ, aBG, ETA) finden sich hierzu ebenfalls keine Informationen. Dennoch können RBS auch auf einem Bauteil mit einer kombinierten mechanischen Beanspruchung eingesetzt werden. Für den Bereich mit kombinierter mechanischer Beanspruchung muss, unter Berücksichtigung des Profilmfaktors, die jeweils größere der sich aus den unterschiedlichen Beanspruchungsarten ergebenden TSD gewählt werden. Beispielsweise ist für eine allseitig beflammete Stütze mit einer Druck- und Biegebeanspruchung der größere Wert aus den TSD-Tabellen für Träger und Stützen bei gleichem Profilmfaktor zu verwenden. Damit handelt es sich um eine konservative und somit auf der sicheren Seite liegende Herangehensweise.

### **8.2 Bauteile mit L-, T-, U-Profil**

Werden im Rahmen der Brandprüfungen nach der DIN EN 13381-8 [4] Bauteile mit I- oder H-Profil bewertet, so sind die resultierenden Trockenschichtdickentabellen auch für T-, U-, L- förmige Walz- und zusammengesetzten Profile anwendbar. Diese Regelung ist auch Bestandteil der nationalen Zulassungsdokumente.

### **8.3 Stahlträger mit Stegöffnungen**

Der brandschutztechnische Nachweis von RBS in der Anwendung auf Lochstegträgern erfolgt nach DIN EN 13381-9:2015 [17].

## **9 Umgang mit anschließenden Bauteilen**

### **9.1 Schraubenverbindungen**

Grundsätzlich gelten für Schraubenverbindungen die gleichen Brandschutzanforderungen wie für die angeschlossenen Bauteile. Demzufolge sind diese Bereiche in gleicherweise zu beschichten. In Frankreich wurden Versuche mit unbeschichteten Schrauben durchgeführt, die belegen, dass durch das Aufschäumen des RSB in den Bereichen um den Schraubenkopf eine isolierende Wirkung erzielt wird [18].

## 10 Heißbemessungsbeispiel

### Nachweis eines Verbandsstabs Ø 16 mm für den „Heißfall“, R30

#### Ausgangssituation

Die Längsaussteifung einer Stahlhalle erfolgt über Diagonalverbände aus Rundstäben S235 JR, Ø 16 mm, die ausschließlich Zugbeanspruchungen weiterleiten. Die Brandschutzanforderungen an tragende Bauteile sind R30.

#### Lastfälle

- LF 1: Eigenlast (inklusive Hüllkonstruktion)
- LF 2: Schneelast (Standort < 1000m)
- LF 3: Wind in parallel zur Giebelseite
- LF 4: Wind in senkrecht zur Giebelseite
- LF 5: Imperfektionen - Stützenschiefstellung
- LF 6: Kran

#### Einwirkungskombinationen

##### 1. Kaltfall

- *Ständige und vorübergehende Bemessungssituation* (für max. H!), LK-STR:

$$1,35 \text{ LF1} + 0,75 \text{ LF2} + 1,5 \text{ LF4} + \text{LF5 (maßgebende EK)}$$

- *Außergewöhnliche Bemessungssituation*, Krananprall LF6, LK-A-K:

$$\text{LF1} + 0,20 \text{ LF4} + \text{LF5} + \text{LF6}$$

##### 2. Heißfall

- *Außergewöhnliche Bemessungssituation (Brandereignis)*, LK-Fi:

$$\text{LF1} + 0,20 \text{ LF4} + \text{LF5 (Krananprall braucht nicht berücksichtigt werden!)}$$

#### Bemessung Heißfall

1. Ermittlung der Stabkraft für LK-Fi (bei 20°C):

$$N_{fi,d} = 4,8 \text{ kN}$$

2. Ermittlung des U/A-Verhältnisses (4- seitige Beflammung → keine Abschattungseffekte)

$$d_a = 16 \text{ mm}$$

$$U_a = \pi d_a = 50,27 \text{ mm}$$

$$A_a = \frac{\pi}{4} d_a^2 = 201 \text{ mm}^2$$

$$\frac{U_a}{A_a} = 250 \text{ m}^{-1} > 10 \text{ m}^{-1}$$

3. Ermittlung der Bauteiltemperatur nach 30 min Brandeinwirkung (z. B. Nomogramme, Exceltabellen)

$$\theta_a = 833,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

4. Bestimmung des Abminderungsfaktors

$$k_{y,\theta} = 0,09$$

5. Ermittlung der Tragfähigkeit nach 30 min Brandeinwirkung

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} A_a \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,09 \cdot 201 \frac{235}{1,0} = 4,41 \text{ kN}$$

6. Nachweis (R30):

$$\frac{N_{fi,d}}{N_{fi,\theta,Rd}} = 1,09 > 1,0 \text{ Nachweis nicht erfüllt!}$$

⇒ *Konstruktive Optionen für den R30-Nachweis:*

- i. Höherfeste Stahlsorte verwenden
- ii. Feuerverzinken
- iii. Querschnitt vergrößern
- iv. Brandschutzanstrich

⇒ i. Höherfeste Stahlsorte verwenden:

- S355 mit  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ , Bauteiltemperatur bleibt gleich  
 → *keine erneute Temperaturermittlung notwendig!*

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} A_a \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 0,09 \cdot 201 \frac{355}{1,0} = 6,67 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{fi,d}}{N_{fi,\theta,Rd}} = 0,72 < 1,0 \text{ Nachweis erfüllt!}$$

## 7. Alternative: Nachweis auf Temperaturebene

- S355 mit  $f_y = 355 \text{ N/mm}^2$ , Bauteiltemperatur bleibt gleich → *keine erneute Temperaturermittlung notwendig!*
- Ausnutzungsgrad „heiße“ Bemessungssituation zum Zeitpunkt  $t = 0$ :

$$E_{fi,d} = N_{fi,d} = 4,8 \text{ kN}$$

$$R_{fi,d,0} = N_{fi,Rd,0} = A_a \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} = 201 \frac{355}{1,0} = 71,4 \text{ kN}$$

Ausnutzungsgrad zum Zeitpunkt  $t = 0$ :

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = 0,07 > 0,013$$

Kritische Temperatur:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] = 896 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nachweis (R30):

$$\theta_a = 833,2 \text{ } ^\circ\text{C} < \theta_{a,cr} = 896 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ Nachweis erfüllt!}$$

## 11 Qualitätssicherung/Abnahme in der Ausführung

Durch die Qualitätssicherung soll die Ausführungsqualität der Brandschutzbeschichtung gemäß den Anforderungen der Zulassungen und Herstellerspezifikationen des Brandschutzsystemherstellers gewährleistet werden. Beschichtungsaufträge sind nur an Beschichtungsunternehmen zu vergeben, die für die Ausführung dieses Gewerkes speziell durch die Hersteller der reaktiven Brandschutzsysteme qualifiziert worden sind. Im Rahmen der Qualitätssicherung ist eine Ausführungsdokumentation durch geeignete Zwischenkontrollen von dem verantwortlichen Fachbauleiter des ausführenden Beschichtungsunternehmens durchzuführen und nach Abschluss der Arbeiten dem Auftraggeber zur Dokumentation in den Revisionsunterlagen zu übergeben. Weitere Unterlagen dieser Dokumentation sind:

- Fachunternehmererklärung
- Technisches Datenblatt des Beschichtungssystem
- Schichtdickenprotokolle

- Beschichtungsprotokolle (insbesondere eine Klimatafel des Beschichtungsortes mit dem zugehörigen Ausführungsdatum und dem Nachweis der jeweiligen Bauteiltemperatur)
- Pflege, Wartungs- und Reparaturanleitung
- Verpflichtung zur Kennzeichnung
- CE-Kennzeichnung, DoP (Unterschiede zu europäischen Produkten aufnehmen)

Der Auftragsgeber hat bei Baustellenbeschichtungen in geeigneten Zeitabständen die Ausführungsqualität der Brandschutzbeschichtung im Rahmen der Baustellenüberwachung zu kontrollieren.

## Literaturverzeichnis

- [1] IGSB-Richtlinie 01, Reaktive Brandschutzbeschichtungen auf Stahlbauteilen, erschienen 2025, <https://www.igsb.eu/downloads/>
- [2] DIN EN 1993-1-2, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall;
- [3] Hothan, S.; Häßler, D.: Reaktive Brandschutzsysteme. Stahlbau Kalender 2022; Türme und Maste, Brandschutz; Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann; Ernst & Sohn; 2022
- [4] European Assessment Document EAD 350402-00-1106, <https://www.eota.eu>
- [5] DIN EN 13381-8:2013-08, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 8: Reaktive Ummantelung von Stahlbauteilen; Deutsche Fassung EN 13381-8:2013
- [6] DIBt: Zulassungsgrundsätze für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen, DIBt Mitteilungen, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1997
- [7] <https://www.dibt.de/de/service/zulassungsdownload/suche>
- [8] DIN EN ISO 12944-6:2018-06: Beschichtungssysteme - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 6: Laborprüfungen zur Bewertung von Beschichtungssystemen (ISO 12944-6:2018); Deutsche Fassung EN ISO 12944-6:2018
- [9] DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009
- [10] Hothan, S., Grundlagen zur Erweiterung des Anwendungsbereichs für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen im nationalen Zulassungsverfahren, DIBt-Mitteilungen (42), 187–189, Ernst & Sohn, 2011
- [11] Hothan, S.; Häßler, D.; Zur Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern, Bauphysik 34 (6), 2012
- [12] Häßler, D.; Hothan, S.; Überblick zur Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern, Stahlbau 87 (1), 2018
- [13] Häßler, D.; Becker, A.; Fürst, R.; Hothan, S: Fire resistance testing of steel tension members with hollow section protected by intumescent coating. Proceedings of the 13th International Conference on Structures in Fire (SiF24), Coimbra, Portugal, 2024, [https://doi.org/10.30779/cmm\\_sif24](https://doi.org/10.30779/cmm_sif24)
- [14] Häßler, D.; Hothan, S., Überblick zur Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern, Stahlbau 87 (1), 2018

- [15] Häßler, D.; Hothan, S., Vom Brandversuch zum Feuerwiderstand: Neues Prüf- und Bewertungsverfahren für filigrane Stahlzugglieder mit reaktivem Brandschutzsystem, Stahlbau 87 (1), 2018
- [16] E DIN EN 13381-11:2025-01, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 11: Brandschutzmaßnahmen für Stahl-Vollstäbe unter Zugbeanspruchung basierend auf einer Brandprüfung unter mechanischer Belastung; Deutsche und Englische Fassung prEN 13381-11:2025
- [17] DIN EN 13381-9:2015-09, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 9: Brandschutzmaßnahmen für Stahlträger mit Stegöffnungen; Deutsche Fassung EN 13381-9:2015
- [18] Longdon, P., J.; Houyoux, C.; Zhao, B.; Chico, B.; Development of alternative technologies for off-site applied intumescent coatings; RFCS-Report, Brussels, 2005