

## Über die Entwicklung von Anwendungsregeln für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern

Dr.-Ing. Sascha Hothan \*  
Ing.(TU) Dustin Häßler, Mestre, M.Sc. \*\*

\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachbereich 7.3 – Brandingenieurwesen, Deutschland, [sascha.hothan@bam.de](mailto:sascha.hothan@bam.de)

\*\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Fachbereich 7.3 – Brandingenieurwesen, Deutschland, [dustin.haessler@bam.de](mailto:dustin.haessler@bam.de)

### Kurzfassung:

Der vorliegende Beitrag stellt den Entwicklungsstand von Anwendungsregeln für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern zusammenfassend dar. Dabei wird insbesondere auf die jüngsten Veränderungen in den normativen Grundlagen und bauaufsichtlichen Regelungen eingegangen und im Hinblick auf Sicherheitsaspekte bewertet.

Die Verringerung der Teilsicherheit für den Bauteilwiderstand nicht stabilitätsgefährdeter Bauteile im Regelwerk für die Kaltbemessung von Stahltragwerken ist hier als besonders kritisch anzusehen, da hierdurch ein systematisches Sicherheitsdefizit für den Brandfall verursacht wird.

Weiterhin werden neuste Forschungsergebnisse bei der Entwicklung von Bewertungsregeln von reaktiven Brandschutzsystemen auf Vollkreisprofilen unter Zugbeanspruchung vorgestellt und diskutiert. Die Untersuchungen behandeln die Fragestellung, inwieweit Prüfungen mit Zugbeanspruchung an Kreisvollprofilen erforderlich sein werden.

**Stichworte: Stahlkonstruktion, Brandschutz, Reaktive Brandschutzsysteme, Zugglieder**

### 1 Einleitung

Unter reaktiven Brandschutzsystemen auf Stahlbauteilen werden Beschichtungen für den baulichen Brandschutz verstanden, die in der Regel aus einer Grundierung, einem Dämmschichtbildner als reaktive Komponente und gegebenenfalls einem Decklack bestehen, siehe dazu [1]. Im Brandfall schäumt die reaktive Komponente infolge der Erwärmung auf und bildet eine Dämmschicht, die eine weitere Erwärmung verzögert und eine Verbesserung des Feuerwiderstandes ermöglicht.

Da es sich bei reaktiven Brandschutzsystemen um nicht geregelte Bauprodukte bzw. Bauarten handelt, wird deren Anwendung durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) auf Grundlage nationaler Zulassungsgrundsätze bzw. europäische technische Zulassungen (ETA) nach europäischen Zulassungsgrundsätzen geregelt. Ferner besteht in Deutschland die Möglichkeit einer Zustimmung im Einzelfall. Bewertungsgrundsätze für die Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern existieren weder in den nationalen noch den europäischen Zulassungsgrundsätzen.

Dennoch wird aktuell über die nationalen Zulassungen eine Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen ermöglicht, was auf Untersuchungen an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung zurückgeht [2]. In [3] werden die für Zugglieder derzeit geltenden Anwendungsregelungen ausführlich beschrieben. Eine Einordnung in den aktuellen Kontext und Bewertung hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes in der Außergewöhnlichen Bemessungssituation (Brandfall) wird im Rahmen dieses Beitrags vorgenommen.

Weil für Zugglieder mit reaktiver Brandschutzbeschichtung keine experimentellen Versuchsdaten vorliegen, werden an der BAM im Rahmen eines vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geförderten Forschungsprojektes [4] numerische Simulationen zur Beurteilung der Notwendigkeit von belasteten und unbelasteten Prüfungen an Stahlzuggliedern vorgenommen. Für die numerischen Untersuchungen wurden in Anlehnung an [2] sowohl Biegeträger, als auch Zugglieder analysiert. Dabei wurden mechanische und thermische Beanspruchungen auf die numerischen Modelle aufgebracht. Die numerischen Simulationen wurden mit Hilfe des FE-Programms ABAQUS durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen ist es zum einen, herauszufinden inwieweit sich bereits bestehende Brandversuche an mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Biegeträgern auf Zugglieder übertragen lassen. Zum Vergleich der Haftfähigkeit der reaktiven Beschichtung auf den verschiedenen Bauteilen werden die im Querschnitt auftretenden Dehnungen herangezogen. Entsprechende Untersuchungen wurden bereits in [2] und [3] veröffentlicht. Für das hier vorgestellte numerische Modell werden verschiedene Modifikationen am ursprünglichen Biegeträger vorgenommen. Dadurch wird eine noch realitätsnähere Wiedergabe der im Brandversuch auftretenden Spannungen und Dehnungen erreicht.

Für Zugglieder mit Profilen bei denen keine Brandprüfungen an Biegeträgern üblich sind, z.B. Vollquerschnitte, muss die Haftfähigkeit und die Dämmwirkung des reaktiven Brandschutzsystems anhand von belasteten oder unbelasteten

Brandversuchen nachgewiesen werden. Allerdings existieren gegenwärtig weder in Deutschland, noch europaweit Regelungen über Art, Umfang und Aufbau von belasteten und unbelasteten Prüfungen an Zuggliedern. Daher besteht ein weiteres Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen darin, zu klären inwieweit belastete Brandprüfungen an mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Zuggliedern, notwendig sind, oder ob auch durch unbelastete Prüfungen eine ausreichende Beurteilung der Systeme möglich ist. Insbesondere sollen die für Zugstäbe typischen Vollkreisquerschnitte mit ihren kleinen Querschnittsabmessungen untersucht werden.

## 2 Bewertung der derzeitigen Zulassungsregelungen sowie normativen Grundlagen

Die aktuelle Zulassungsregelung in den abZ des DIBt besagt, dass reaktive Brandschutzsysteme, bei durchgeführten belasteten Prüfungen an Biegeträgern, auf Zugstäbe der gleichen Profilform bis zu einem Lastausnutzungsgrad des Zugglieds im Brandfall von  $\mu_{fi} = 0,5$  verwendet werden dürfen. Der angegebene Lastausnutzungsgrad bezieht sich dabei auf die elastische Grenzlast und die Anwendung ist auf gewisse Formen offener und geschlossener Profile begrenzt. Vollquerschnitte sind ausgenommen, siehe [1].

Grundlage dieser Regelung ist ein Vergleich der maximal auftretenden rechnerischen Gesamtdehnungen bei einem in Zulassungsversuchen getesteten Biegeträger und denen eines Zugglieds, siehe dazu [2]. Verglichen mit einem Zulassungsversuch wurden dabei einige vereinfachende Annahmen getroffen, die in ihrer Gesamtheit zunächst als konservativ angesehen werden. In den Berechnungen wurde ein Dreipunkt-Biegeversuch mit einer allseitigen Beflammung, also gleichmäßiger Querschnittstemperatur zugrunde gelegt und die Biegebelastung anhand der elastischen Grenzlast des Trägerquerschnitts berechnet. Zulassungsversuche werden jedoch als Vierpunkt-Biegeversuche bei dreiseitiger Beflammung und der plastischen Grenzlast des Trägerquerschnitts durchgeführt. Dies gilt für die Querschnittsklassen 1 und 2, welche bei den für Brandprüfungen üblichen Walzquerschnitten in der Regel vorliegen. Die Annahmen in den Berechnungen führen also eher zu einer Unterschätzung der in Zulassungsversuchen auftretenden Randdehnungen. Da diese Berechnungen die Vergleichsgrundlage zu den an Zuggliedern berechneten Dehnungen darstellen, führt die Annahme zu einer Verringerung des bei Zuggliedern erlaubten Lastausnutzungsgrades.

Demgegenüber steht jedoch eine Mehrzahl von Punkten, die sich aus der bisherigen Prüfpraxis sowie Änderungen der normativen Grundlagen für die Bemessung von Stahltragwerken und der Prüfung von reaktiven Brandschutzsystemen ergeben.

Entsprechend dem Normenentwurf E DIN EN 13381-8:2008-03 [5] war die Biegebeanspruchung im Brandversuch zu 60% der Momenten Tragfähigkeit des Querschnitts nach DIN V ENV 1993-1-1:1993-04 festzulegen. Für die Querschnittsklassen 1 und 2 sowie einen für Walzträger üblichen plastischen Formbeiwert  $\alpha_{pl} = 1,14$  ergibt sich damit

$$M_{\text{Vers. Entwurf}} = 0,6 \cdot \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{Y_{M0}} = 0,6 \cdot \frac{W_{el} \cdot \alpha_{pl} \cdot f_{yk}}{Y_{M0}} = 0,6 \cdot \frac{W_{el} \cdot 1,14 \cdot f_{yk}}{1,1} = 0,62 \cdot M_{el}. \quad (1)$$

Dabei war mit der charakteristischen Stahlfestigkeit  $f_{yk}$  zu rechnen. Überfestigkeiten des Materials, welche zu einem im Versuch tatsächlich vorliegenden geringeren Lastausnutzungsgrad und somit einer Verfälschung des Ergebnisses zu geringeren Verformungen und somit günstigeren Bedingungen für die Haftfähigkeit des Beschichtungssystems führen können, wurden nicht berücksichtigt. Da die tatsächliche Höhe möglicher Überfestigkeiten des Materials nicht bekannt ist, kann der Einfluss nicht quantifiziert werden und stellt somit einen nicht zu beziffernden Unsicherheitsfaktor dar. Der in [2] für die Vergleichsberechnungen zugrunde gelegte Referenz-Lastausnutzungsgrad der Biegetragglieder im Brandfall ergab sich aus den Regelungen nach DIN V ENV 1993-1-1:1993-04 in Verbindung mit dem zugehörigen Nationalen Anwendungsdokument (NAD) und DIN V ENV 1993-1-2:1997-05 mit zugehörigem NAD sowie der Beschränkung auf die elastische Grenzlast mit

$$M_{\text{Vers}} = \mu_{fi} \cdot M_{el} = \eta_{fi} \cdot \left[ \frac{Y_{Mfi}}{Y_{M0}} \right] \cdot M_{el} = 0,7 \cdot \frac{1,0}{1,1} \cdot M_{el} = 0,636 \cdot M_{el} \quad (2)$$

zu  $\mu_{fi} = 0,636$ . Dieser Wert gilt auch für Lasten der Kategorie E (Lageräume). Er ist allerdings Größer als der nach Gl. (1) berechnete Lastausnutzungsgrad von  $\mu_{fi} = 0,62$ , führt für Zugglieder zu einem höheren erlaubten Lastausnutzungsgrad und ist demnach nicht mehr als konservativ anzusehen. (Würde die Verwendung für die Nutzungskategorie E ausgeschlossen, ergibt sich mit  $\eta_{fi} = 0,65$  der Wert  $\mu_{fi} = 0,591$ .) Der Vergleich der rechnerisch ermittelten Gesamtdehnungen eines Querschnitts unter Vierpunkt-Biegung und einem Referenz-Lastausnutzungsgrad von  $\mu_{fi} = 0,62$  zeigt allerdings, dass die derzeitige Zulassungsregelung mit einem maximal erlaubten Lastausnutzungsgrad eines Zugglieds im Brandfall von  $\mu_{fi} = 0,5$  nicht zu höheren Dehnungen im Zugglied als im Biegeträger führt, siehe dazu Bild 1. Die Unsicherheit in Bezug auf die tatsächlich im Versuch auftretenden Materialfestigkeiten lässt sich damit jedoch nicht ausräumen.

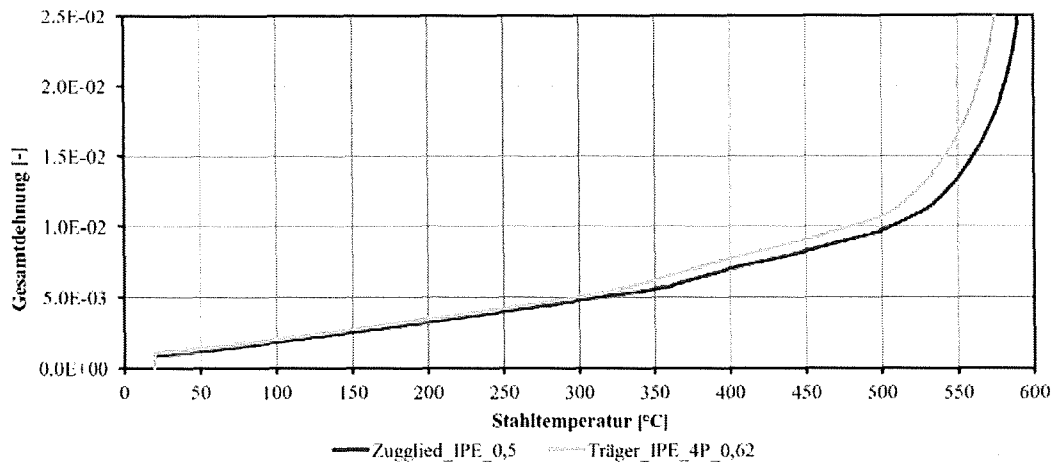


Bild 1: Vergleich der Gesamtdehnungen in der Randfaser eines Trägers unter Vierpunkt-Biegebeanspruchung mit einem Lastausnutzungsgrad von  $\mu_{fi} = 0,62$  bezogen auf die elastische Grenztragfähigkeit mit denen eines Zugglieds mit  $\mu_{fi} = 0,5$

Mit der Einführung von DIN EN 1993-1-1:2010-12 [6] in Verbindung mit DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12 [7] wurde der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M0}$  von 1,1 auf 1,0 reduziert. In der Konsequenz dürfen Stahltragwerke im Vergleich zu den Vornormen mit 10% mehr Last in der Kaltbemessung beaufschlagt werden. Stabilitätsnachweise sind davon ausgenommen. Streng genommen verlieren somit sämtliche Brandversuche ihre Gültigkeit, da ihnen im Vergleich zur jetzt gängigen Bemessungspraxis ein zu geringer Lastausnutzungsgrad zugrunde liegt. Aus Gl. (1) wird im neuen Normenkontext unter Beachtung von DIN EN 13381-8:2013-08 [8]

$$M_{Vers} = 0,6 \cdot \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 0,6 \cdot \frac{W_{el} \cdot \alpha_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 0,6 \cdot \frac{W_{el} \cdot 1,14 \cdot f_y}{1,0} = 0,684 \cdot M_{el}. \quad (3)$$

Im Vergleich zum Normenentwurf E DIN EN 13381-8:2008-03 [5] ist hier die tatsächlich vorliegende Materialfestigkeit  $f_y$ , entsprechend dem Konformitätszertifikat für die entsprechende Charge des Werkstoffes oder aus Versuchen anzusetzen. Die Unsicherheit aus möglichen Materialüberfestigkeiten im Versuch wurde damit beseitigt.

Für reaktive Brandschutzsysteme, deren belastete Zulassungsversuche in Zukunft auf Grundlage von Gl. (3) durchgeführt werden, kann die derzeitige Zulassungsregelung für Zugglieder problemlos übernommen werden, da der zugrunde liegende Referenz-Lastausnutzungsgrad mit  $\mu_{fi} = 0,636$  geringer ist als der Wert nach Gl. (3).

Im Hinblick auf Zulassungsversuche auf Grundlage von Gl. (1) und einer Anwendung auf Tragwerke, die nach DIN EN 1993-1-1:2010-12 [6] bemessen werden, ist die derzeitige Zulassungsregelung zu überprüfen, da hier ein Sicherheitsdefizit von 10% nicht ausgeschlossen werden kann. Für die nahe Zukunft sind weitere Vergleichsberechnungen vorgesehen, die eine dreiseitige Beflammung und die dabei vorhandene ungleichmäßige Temperaturverteilung bei belasteten Trägerquerschnitten in Brandversuchen berücksichtigen. Ob das zutage getretene Sicherheitsdefizit damit kompensiert werden kann, ist derzeit nicht abzuschätzen. Daher empfehlen die Autoren, in solchen Fällen die Kaltbemessung weiterhin mit einem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_{M0} = 1,1$  durchzuführen.

Für eine mögliche zukünftige Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf Zugstabsystemen bestehend aus kreisrunden Vollprofilen mit abZ oder ETA spielt diese Problematik keine Rolle, da in diesen Verwendbarkeitsnachweisen der Materialteilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M1}$  vorgeschrieben ist, der zumindest in Deutschland auch weiterhin zu 1,1 festgelegt ist.

### 3 Numerische Vergleichsuntersuchungen an Biegeträgern und Zuggliedern aus Stahl

#### 3.1 Modellbildung

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein IPE 80 mit einer Länge von 1140 mm sowie ein Vollkreisprofil mit einem Durchmesser von 20 mm (VKP D20) und einer Länge von 1500 mm modelliert.

Für beide Modelle wurden bewusst Diskretisierungen mit dreidimensionalen Volumenelementen gewählt, um in späteren Untersuchungen Imperfektionen, die sich z. B. aus Beschädigungen ergeben können und resultierende ungleichmäßige Temperaturfelder berücksichtigen zu können. Versuche haben gezeigt, dass signifikante Temperaturunterschiede auch bei relativ filigranen Querschnitten wie einem VKP D20 auftreten [4].

Das IPE-Profil wurde unter Berücksichtigung des gleichen Lastausnutzungsgrades  $\mu_{fi} = 0,636$  im Brandfall sowohl als Einfeld-Biegeträger, als auch als Zugglied untersucht. Für das Vollkreisprofil erfolgte die Berechnung lediglich als Zugglied, dafür jedoch mit drei verschiedenen Lastausnutzungsgraden ( $\mu_{fi} = 0,272; 0,454; 0,636$ ). Die Materialeigenschaften der untersuchten Profile entsprechen der Stahlfestigkeit S355. Eine Verfestigung des Stahls unter



### 3.2 Einfluss der Belastungsart auf den Dehnungs-Temperatur-Verlauf eines Profils – Vergleich zwischen Biegeträger und Zugglied

Für Vergleichszwecke wurde das IPE 80 Profil sowohl unter Biegung als auch unter Zugbeanspruchung untersucht. Für beide Belastungsarten wurde als Bemessungslast die elastische Querschnittstragfähigkeit sowie der gleiche Lastausnutzungsgrad im Brandfall von  $\mu_{fi} = 0,636$  angenommen. Weiterhin wurde für beide untersuchten Modelle ein allseitig konstant über den Längs- und Querschnitt wirkendes Temperaturfeld nach Gl. (4) gewählt. Anhand der numerisch berechneten Dehnungs-Temperatur-Verläufe ist in Bild 4 zu erkennen, dass die Dehnungen des Zuggliedes ab einer Temperatur von ca. 300 °C wesentlich größer sind, als die des Biegeträgers. Dies bedeutet, dass sich Aussagen zur Haftfähigkeit des reaktiven Brandschutzsystems für an Biegeträgern durchgeführte Brandprüfungen nur bis ca. 300 °C auf ein Zugglied des gleichen Profils anwenden lassen. Für höhere Temperaturen ist aufgrund der größeren Dehnungen die Haftfähigkeit der reaktiven Beschichtung auf Zuggliedern durch zusätzliche Prüfungen nachzuweisen.

Die in Bild 4 dargestellten Dehnungen des Biegeträgers beziehen sich auf die Randfaser am Untergurt des Profils in Trägermitte. Mit steigender Temperatur bleibt der Verlauf der Randdehnung des Trägers unterhalb der Dehnung des Zuggliedes, da dieser über die Möglichkeit der Aktivierung plastischer Querschnittsreserven verfügt. Im Gegensatz dazu wird bei Zuggliedern der komplette Querschnitt gleichmäßig beansprucht. Plastische Querschnittsreserven sind daher nicht vorhanden.

### 3.3 Einfluss der Querschnittsform auf das numerische Verhalten von Zuggliedern

Bei gleichmäßiger Temperaturverteilung im jeweiligen Querschnitt und gleichem Lastausnutzungsgrad ergibt sich erwartungsgemäß kein Unterschied in den Dehnungs-Temperatur-Verläufen unterschiedlicher Querschnittsformen. Anhand der Dehnungs-Temperatur-Verläufe am Beispiel eines IPE 80 und eines Vollkreisprofils VKP D20 mit Lastausnutzungsgrad im Brandfall von  $\mu_{fi} = 0,636$  ist dies deutlich in Bild 4 erkennbar. Durch das Finite-Elemente Programm ABAQUS wird lediglich die Querschnittsfläche berücksichtigt, jedoch nicht die Form des Querschnitts. Diese Aussage gilt allerdings nur unter den eingangs genannten Voraussetzungen. Bei ungleichmäßiger Temperaturbeanspruchung treten zusätzliche Zwängungen auf, deren Größe durch die Querschnittsform des Zuggliedes beeinflusst wird. Wie bereits bei der Modellbildung erläutert, sind die vorliegenden Modelle für zukünftige Untersuchungen in der Lage, die genannten Effekte zu berücksichtigen.

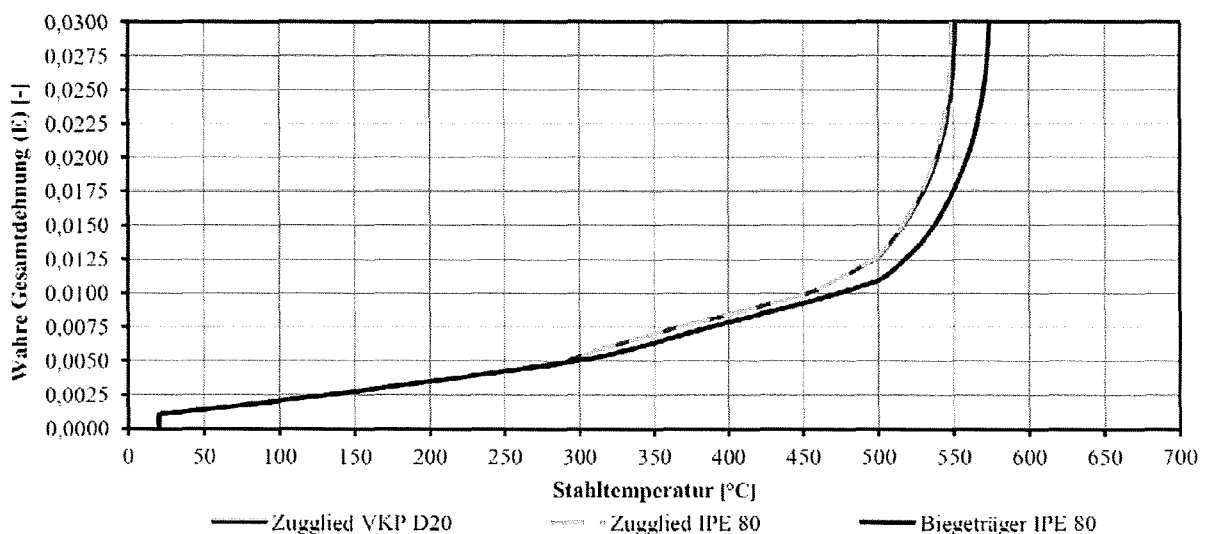


Bild 4: Vergleich der Dehnungs-Temperatur-Verläufe für unterschiedliche Profile und Belastungsarten (Lastausnutzungsgrad im Brandfall  $\mu_{fi} = 0,636$ )

### 3.4 Einfluss des Lastausnutzungsgrades im Brandfall auf das numerische Verhalten von Zuggliedern

Der Einfluss des Lastausnutzungsgrades im Brandfall  $\mu_{fi}$  auf das numerische Verhalten von Zuggliedern wurde anhand von drei unterschiedlichen Ausnutzungsgraden ( $\mu_{fi} = 0,272; 0,454; 0,636$ ) für das Vollkreisprofil VKP D20 untersucht. Das Temperaturfeld wurde für alle drei Zugstäbe konstant über den Längs- und Querschnitt entsprechend Gl. 4 angenommen.

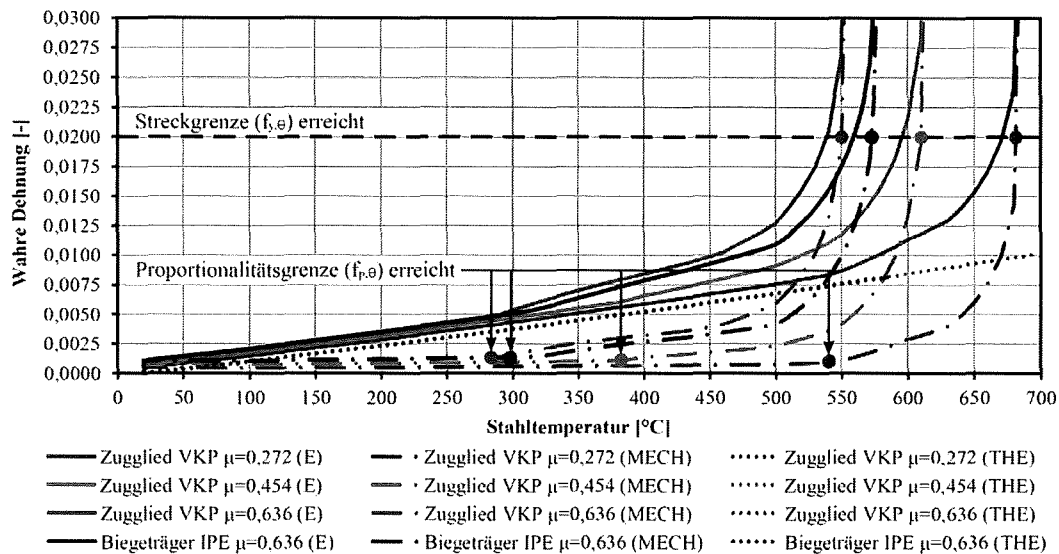


Bild 5: Vergleich der Dehnungs-Temperatur-Verläufe für Zugglieder mit unterschiedlichen Lastausnutzungsgraden im Brandfall ( $\mu_{\bar{n}} = 0,272; 0,454; 0,636$ )

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Form der Dehnungs-Temperatur-Verläufe in Bild 5 dargestellt. Die im Zugglied vorhandene Gesamtdehnung (E) setzt sich aus der Summe von mechanischer (MECH) und thermischer Dehnung (THE) zusammen. Mechanische Dehnungen entstehen durch äußere Belastungen oder Zwängungen und berechnen sich aus der Summe von elastischer (EE) und plastischer Dehnung (PE). Thermische Dehnungen werden durch Temperaturunterschiede hervorgerufen. Aus dem Diagramm in Bild 5 ist zu erkennen, dass sich die Dehnungs-Temperatur-Verläufe der untersuchten Zugglieder bis ca. 280 °C kaum unterscheiden. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass aufgrund der identischen Temperaturfelder der Zugglieder die thermische Dehnung für alle Zugstäbe gleich groß ist. Die geringen Abweichungen in den Dehnungskurven sind das Ergebnis der unterschiedlichen Zugspannungen in den Stäben und der dadurch entstehenden mechanischen Dehnung. Bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze des Stahls  $f_{p,\theta}$  befinden sich die Spannungen der Zugstäbe im elastischen Bereich und können nach dem hookeschen Gesetz aus dem Quotient von Spannung zu Elastizitätsmodul berechnet werden. Plastische Dehnungen entstehen erst nach dem Erreichen der Proportionalitätsgrenze. Aufgrund des für Stahl großen Elastizitätsmoduls ergeben sich trotz der unterschiedlichen Spannungen der Zugglieder nur sehr kleine Unterschiede in der mechanischen Dehnung. Der geringe Anstieg der elastischen Dehnung zwischen der Anfangstemperatur von 20 °C und 280 °C ist auf die nach DIN EN 1993-1-2:2010-12 erforderliche Reduzierung des Elastizitätsmoduls um 20 % zurückzuführen. Weiterhin lässt sich feststellen, dass beim Erreichen der Proportionalitätsgrenze der Anteil der mechanischen Dehnungen an den Gesamtdehnungen vergleichsweise gering ist.

Nach dem Erreichen der Proportionalitätsgrenze kommt es zu einer relativ schnellen Zunahme der mechanischen Dehnungen. Hauptursache dafür sind die beginnenden plastischen Dehnungen. Bei einer mechanischen Dehnung von 0,02, dies entspricht der Fließdehnung  $\varepsilon_{y,\theta}$ , wird im Zugglied die Streckgrenze bzw. Fließgrenze  $f_{y,\theta}$  erreicht. Für einen Lastausnutzungsgrad im Brandfall von  $\mu_{\bar{n}} = 0,636$  beträgt die Stahltemperatur bei Erreichen der Streckgrenze etwa 550 °C. Durch eine Reduzierung des Lastausnutzungsgrades können auch höhere Temperaturen erzielt werden.

Eine Bemessung von Zuggliedern bis zur Streckgrenze kann nur im Kaltfall als elastisch angesehen werden. Im Brandfall, müssen für die Bemessung bis zur Streckgrenze aufgrund der temperaturbedingten Abminderungen der Spannungs-Dehnungs-Kennlinien neben der elastischen Dehnung auch plastische Anteile berücksichtigt werden. Die plastischen Dehnungen sind, abhängig vom Lastausnutzungsgrad, um ein vielfaches größer, als der elastische Anteil. Entsprechend den in DIN EN 1993-1-2:2010-12 vorgegebenen Spannungs-Dehnungs-Verläufen ist bei einer Heißbemessung bis zu Streckgrenze mit einer mechanischen Dehnung von 0,02 zu rechnen.

Auch nach dem Erreichen der Streckgrenze ist eine weitere Zunahme der Spannungen im Zugglied bis zur maximalen Zugfestigkeit des Stahls  $f_{u,\theta}$  möglich. Allerdings setzt dies eine Berücksichtigung der Verfestigung des Stahls bei höheren Temperaturen voraus. Ab einer Stahltemperatur von mehr als 300 °C nimmt der Spannungsunterschied zwischen Streckgrenze und maximaler Zugfestigkeit rapide ab. Dadurch beträgt die mögliche Temperaturerhöhung zwischen Streckgrenze und maximaler Zugfestigkeit weniger als 25 °C. Der genaue Wert ist vom jeweiligen Lastausnutzungsgrad im Brandfall abhängig. Jedoch muss bei Erhöhung der zulässigen Spannungen auf das Niveau der maximalen Zugfestigkeit beachtet werden, dass die plastischen Dehnungen weiter stark zunehmen. Nach DIN EN 1993-1-2:2010-12 beträgt die mechanische Dehnung bei Erreichen der maximalen Zugfestigkeit  $\varepsilon_{u,\theta} = 0,15$ . Inwieweit derartige große Dehnungen vom reaktiven Brandschutzsystem aufgenommen werden können ist fraglich. Für die Bemessung von Zuggliedern im Brandfall ist eine Berücksichtigung der maximalen Zugfestigkeit des Stahls deshalb nicht empfehlenswert.

### 3.5 Numerischer Vergleich zwischen belasteten und unbelasteten Zuggliedern

Derzeit liegen keine Informationen für belastete Brandprüfungen an mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Zuggliedern vor. Für offene und geschlossene Profile kann unter den in Abschnitt 2 erläuterten Randbedingungen eine Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Zuggliedern auf der Grundlage von belasteten Brandversuchen an Biegeträgern nachgewiesen werden. Für Zugglieder mit Vollkreisquerschnitt lässt sich diese Verfahrensweise aufgrund der fehlenden Brandversuche jedoch nicht anwenden.

Belastete Brandprüfungen sind im Vergleich zu unbelasteten Prüfungen wesentlich kostenintensiver und zeitaufwendiger. Zudem ist gegenwärtig Art, Umfang und Aufbau von belasteten und unbelasteten Prüfungen an Zuggliedern sowohl in Deutschland, als auch europaweit, nicht geregelt. Die Autoren dieses Beitrags beabsichtigen nach Abschluss der Forschungen einen entsprechenden Normungsprozess anzustoßen.

Generell ist zu klären, inwieweit belastete Brandprüfungen an mit reaktiven Brandschutzsystemen beschichteten Zuggliedern, notwendig sind, oder ob auch durch unbelastete Prüfungen eine ausreichende Beurteilung der Systeme möglich ist. Insbesondere sind dabei die für Zugstäbe typischen Vollkreisquerschnitte mit ihren kleinen Querschnittsabmessungen zu untersuchen.

Ein Vergleich zwischen belasteten und unbelasteten Zuggliedern ist aufgrund der fehlenden experimentellen Datenbasis zurzeit nur auf Grundlage von numerischen Simulationen möglich. In Abschnitt 3.4 wurden bereits die Dehnungs-Temperatur-Verläufe für verschiedene Zugglieder vorgestellt. Die Gesamtdehnung unbelasteter Zugglieder ist identisch mit den thermischen Dehnungen aus der Temperaturbeanspruchung. Mechanische Dehnungen sind aufgrund der fehlenden äußeren Belastung nicht vorhanden. Für belastete Zugglieder ergibt sich die Gesamtdehnung aus der Summe von thermischen und mechanischen Dehnungen. Folglich treten für belastete Zugglieder immer größere Gesamtdehnungen auf, als für unbelastete Zugstäbe. Die Größe der mechanischen Dehnungen ist abhängig von der betrachteten Stahltemperatur und dem Lastausnutzungsgrad des Zuggliedes. Die Gesamtdehnungen belasteter Zugglieder sind bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze nur wenig größer, als die von unbelasteten Zugstäben. Aufgrund der Begrenzung der Spannungen auf die Proportionalitätsgrenze sind, besonders für hohe Lastausnutzungsgrade, nur vergleichsweise geringe Stahltemperaturen zulässig. Dadurch ergeben sich sehr hohe Anforderungen an die Dämmwirkung der reaktiven Brandschutzsysteme. Eine Anhebung der zulässigen Spannungen im Zugglied auf die Streckgrenze des Stahls erlaubt wesentlich größere Stahltemperaturen. Allerdings vergrößern sich dadurch die mechanischen Dehnungen auf 0,02. Beim Erreichen der Streckgrenze sind die mechanischen Dehnungen um mehr als 15-fache größer, als die der Proportionalitätsgrenze. Im Vergleich zu unbelasteten Zuggliedern sind die Gesamtdehnungen belasteter Zugstäbe bei einer Bemessung bis zur Streckgrenze um mehr als doppelt so groß.

Auf Grundlage der vorgestellten numerischen Untersuchungen können Brandprüfungen an unbelasteten Zuggliedern die Haftfähigkeit von reaktiven Brandschutzsystemen auf belasteten Zugstäben näherungsweise nur bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze und der dazugehörigen Stahltemperatur abbilden. Die Zulassung höherer Stahltemperaturen macht eine Anhebung der zulässigen Spannungen auf das Niveau der Streckgrenze erforderlich. Aufgrund der dadurch stark anwachsenden Gesamtdehnungen des Zuggliedes ist eine Beurteilung der Haftfähigkeit der reaktiven Beschichtung nur anhand von belasteten Brandprüfungen möglich. Aufgrund der Tatsache, dass in der numerischen Simulation nicht die Haftfähigkeit des reaktiven Brandschutzsystems, sondern lediglich die auftretenden Dehnungen von Zuggliedern betrachtet wurden, ist eine Überprüfung durch Brandversuche zwingend erforderlich. Nur dadurch ist eine qualifizierte Beurteilung des Aufschäumverhaltens und der Dämmwirkung sowie der Haftfähigkeit von reaktiven Brandschutzsystemen auf Zuggliedern möglich.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der aktuellen Regelung in den nationalen Zulassungen für reaktive Brandschutzsysteme wird eine eingeschränkte Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf Stahlzuggliedern mit offenen und geschlossenen Profilen ermöglicht. Diese Regelung stützt sich auf Vergleichsuntersuchungen zwischen Biegeträgern, wie sie für Zulassungsprüfungen üblich sind und Zuggliedern.

Durch die Verringerung der Teilsicherheit für den Bauteilwiderstand für nicht stabilitätsgefährdete Bauteile im aktuellen Regelwerk für die Kaltbemessung von Stahltragwerken ist ein systematisches Sicherheitsdefizit für den Brandfall erzeugt worden, da sämtliche bis dato durchgeführten Brandversuche mit einer zu geringen Prüflast im Vergleich zu dem jetzt möglichen Lastniveau durchgeführt wurden. Durch die Korrektur von systematischen Fehlern bei der Berechnung der Prüflast mit DIN EN 13381-8:2013-08 für reaktive Brandschutzsysteme kann dieses Sicherheitsdefizit nicht ausgeräumt werden. Daher empfehlen die Autoren, sofern Anforderungen hinsichtlich des Feuerwiderstands bestehen, die Kaltbemessung weiterhin mit einem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_{M0} = 1,1$  durchzuführen.

Jüngste Untersuchungen zum Erfordernis von belasteten Brandversuchen an Stahlzuggliedern mit Kreisvollprofil zeigen, dass Versuche ohne mechanische Beanspruchung die für die Beurteilung des reaktiven Systems wichtigen Dehnungsverhältnisse näherungsweise nur bis zum Erreichen der Proportionalitätsgrenze des Stahls und der dazugehörigen Stahltemperatur abbilden.

Gegenstand zukünftiger Untersuchungen werden Berechnungen an Biegetraggliedern mit dreiseitiger Beflammung zur Verbesserung oder Bestätigung der derzeitigen Zuassungsregelung in den abZ sein. Ferner werden Im Rahmen des Forschungsvorhabens [4] Versuche an Zuggliedern unterschiedlicher Profilformen und insbesondere Kreisvollprofilen durchgeführt werden um die bisher durch Berechnungen erlangten Erkenntnisse zu bestätigen und Prüfvorschriften für die Zukunft zu entwickeln. Diese können dann die Grundlage einer europäischen Normungsaktivität für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern bilden.

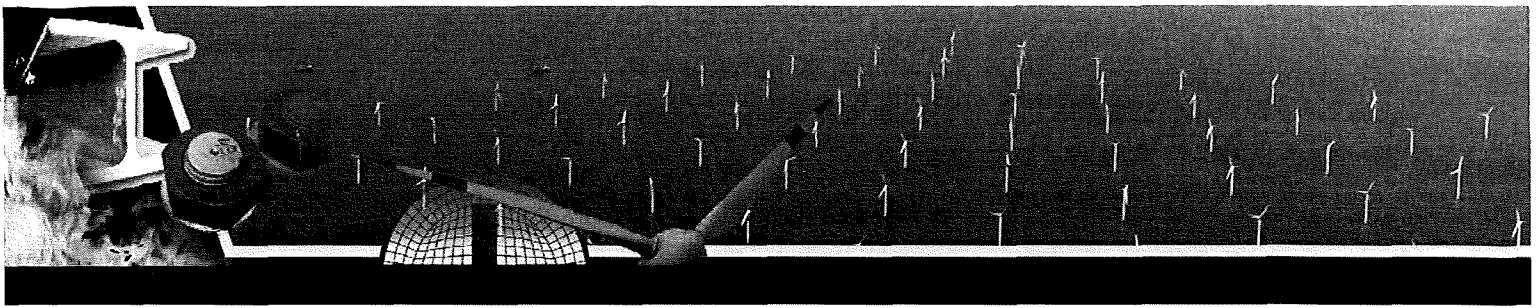
## 5 Danksagung

Dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) wird für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens [4] besonders gedankt.

## 6 Literatur

- [1] Stopp, V.; Proschek, P.: Reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen mit reiner Zugbeanspruchung. DIBt Mitteilungen, H. 6, S. 190-191, Berlin: Ernst & Sohn, 2011.
- [2] Hothan, S.: Grundlagen zur Erweiterung des Anwendungsbereiches für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen im nationalen Zulassungsverfahren. DIBt Mitteilungen, H. 6, S. 187-189, Berlin: Ernst & Sohn, 2011.
- [3] Hothan, S.; Häßler, D.: Zur Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern. Bauphysik, H. 6, S. 275-285, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [4] Hothan, S.; Häßler, D.: Numerische und versuchstechnische Untersuchungen zur Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf Zuggliedern aus Stahl, Zwischenbericht mit erster und zweite Ergänzung zum BAM-Vh 7539, Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, 2012 und 2013.
- [5] Entwurf DIN EN 13381-8: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen – Teil 8: Reaktive Ummantelungen von Stahlbauteilen; Deutsche Fassung EN 13381-8:2008; Berlin: Beuth-Verlag, März 2008.
- [6] DIN EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009; Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2010.
- [7] DIN EN 1993-1-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Berlin: Beuth-Verlag, Dezember 2010.
- [8] DIN EN 13381-8: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen – Teil 8: Reaktive Ummantelungen von Stahlbauteilen; Deutsche Fassung EN 13381-8:2013; Berlin: Beuth-Verlag, August 2013.





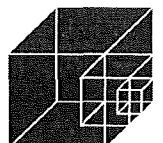
# Festschrift Peter Schaumann

Hannover 2014

11  
102  
1004

Leibniz  
Universität  
Hannover

Institut für Stahlbau  
Institute for Steel Construction



**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Institut für Stahlbau  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 9A  
30167 Hannover

**Schriftleitung und Organisation:**

Dipl.-Ing. Sebastian Kelma  
Dipl.-Ing. Inka Kleibömer  
Institut für Stahlbau  
Leibniz Universität Hannover  
Appelstr. 9A  
30167 Hannover  
Tel.: 0511 - 762 3781  
Email: stahlbau@stahl.uni-hannover.de

© 2014

Autoren

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Mit Genehmigung des Autors/ des Herausgebers ist es gestattet, dieses Heft ganz oder teilweise zu vervielfältigen.

All rights reserved, and in particular the translation into foreign languages. No part of this article may be reproduced without the written permission of the author/ editor.

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 International Lizenz.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NonDerivatives 4.0 International License.



DOI: 10.2314/GBV:77999762X