Methode zur effizienten Modellierung von Verbunddeckensystemen im Brandfall

A. Müller, N. Lange, C. Gaigl, M. Mensinger

ZUSAMMENFASSUNG Im Rahmen dieses Aufsatzes wird eine effiziente Methode zur Modellierung von Verbunddeckensystemen im Brandfall, die aus Stahlbeton oder Verbundplatten mit geschützten und ungeschützten Stahlträgern bestehen, aufbauend auf der Methode von Stadler [1] vorgestellt. Diese Methode berücksichtigt durch eine Modellierung des gesamten Verbunddeckensystems mit anschließender geometrisch nicht-linearer Berechnung (Theorie III. Ordnung) die im Brandfall günstig wirkende Membranwirkung. Ziel der Methode ist es, einen möglichst geringen Modellierungsaufwand bei gleichzeitig möglichst wirklichkeitsnahen Ergebnissen zu generieren. Der geringe Modellierungsaufwand wird zum einen über eine Modellierung der Stahlbetonplatte mittels Schalenelementen, die mithilfe von Layer-Elementen einen geschichteten Temperaturverlauf über die Dicke abbilden können, erzielt. Diese geschichteten Layer-Elemente sind in diversen kommerziellen Softwarepaketen, wie beispielsweise in Sofistik [22], implementiert. Zum anderen werden die Stahlträger mit einfachen Stabelementen modelliert. Um die Ergebnisse der vorgestellten Methode validieren zu können, werden Ergebnisse aus Brandversuchen [2], die von der Technischen Universität München durchgeführt wurden, herangezogen. Die vorgestellte Methode ist darüber hinaus weitgehend unabhängig von der thermischen Einwirkung, sodass neben der üblichen Beanspruchung durch die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) [3] ebenso Naturbrandmodelle, wie die parametrisierte Naturbrandkurve nach Nationalem Anhang des Eurocodes 1 Teil 1-2 [4], berücksichtigt werden können.

Efficient Method for Modelling of Composite Slabs in Case of Fire

ABSTRACT This paper presents an efficient method – based on the method by Stadler [1] - for modelling of composite slabs systems consisting of composite slabs or reinforced concrete slabs as well as protected and unprotected steel beams in case of fire. The presented method considers membrane actions due to geometrically non-linear finite element analyses that are performed on a whole composite slab system. The aim is not only to keep the modelling effort low but also to generate realistic results. Both, the reinforced concrete slab and the composite slabs, are modelled by shell elements. Due to layer elements, which had been implemented in commercial finiteelement softwares like Sofistik [22], a non-linear temperature over the slab depth can be taken into account. The steel beams are modelled by ordinary beam elements. Furthermore, experiments run by the Technical University of Munich [2] are used to check whether this method generates realistic results. The method is widely independent of the time-temperature curve which means that not only the standard temperature curve ISO 834 [3] but also natural fire scenarios like the parametric natural fire curve introduced in the German national annex of Eurocode 1 part 1–2 [4] can be considered.

STICHWÖRTER

Stahlverbundbau, Verbunddecken, Brandfall, Modellierung

1 Einleitung

Verbunddecken stellen eine wirtschaftliche Bauweise für Deckensysteme dar. Entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften werden die Materialien Stahl und Stahlbeton optimal ausgenutzt. Bei der Verbunddecke unter Biegebeanspruchung werden die Stahlbetonplatte auf Druck und die Stahlträger auf Zug beansprucht. Als Nachteil von Verbunddecken wird die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit genannt, was auf die an der Deckenunterseite angeordneten Stahlträger zurückzuführen ist. Diese verlieren bei erhöhten Temperaturen im Brandfall schnell ihre Tragfähigkeit, sofern sie ungeschützt bleiben. Brandschutztechnische Schutzmaßnahmen können aufwendig und kostenintensiv sein und damit die Wirtschaftlichkeit der Verbunddecke negativ beeinflussen. Allerdings wird bei vereinfachten Rechenverfahren auf Querschnittsebene, anders als bei einer Betrachtung des gesamten Verbunddeckensystems mit geometrisch nicht-linearer Berechnung (Theorie III. Ordnung), die Tragfähigkeit von Verbunddecken im Brandfall unterschätzt, da sie beispielsweise nicht

die sich aufgrund von großen Verformungen im Brandfall einstellende Membranwirkung berücksichtigen.

Um diese günstig wirkende Membranwirkung quantifizieren zu können und um Daten zur Validierung von Berechnungsansätzen bereitzustellen, wurden in Großbritannien [5] und in der Tschechischen Republik [6], [7] verschiedene Großbrandversuche durchgeführt. In Abschnitt 2 werden zwei weitere Großbrandversuche [2], die an der Technischen Universität München in Verbindung mit der Leibniz Universität Hannover durchgeführt wurden, vorgestellt. Diese Versuche werden zur Validierung der eigenen Modellierungen – wie in Abschnitt 4 beschrieben – herangezogen.

Neben den experimentellen Untersuchungen wurden auch Finite-Element- (FE) Programme, welche die im Brandfall günstige Membranwirkung berücksichtigen können, entwickelt. Vulcan [8], [9], SlabFem [10] und Safir [11] sind solche FE-Programme, die im Rahmen von Forschungsvorhaben von verschiedenen Universitäten entwickelt wurden. Sie greifen auf geschichtete Schalenelemente (Layer-Elemente) zurück. Jedem Layer kann eine Temperatur zugewiesen werden und somit können die verringerten thermischen Materialkennwerte berücksichtigt werden. Diese drei Programme besitzen in Deutschland jedoch nur einen beschränkten Anwenderkreis, während sie in anderen europäischen Ländern teils als Standardsoftware betrachtet werden können. Stadler entwickelte deshalb, aufbauend auf seinen experimentellen Untersuchungen [2], im Rahmen seiner Dissertation [1] eine Methode, um diese Membranwirkung auch mit kommerzieller Software nutzen zu können. Stadler verwendete nicht die Layer-Methode, die zum Zeitpunkt der Erstellung seiner Dissertation noch nicht in üblichen rechnergestützten Verfahren implementiert war. Die über die Dicke der Stahlbetonplatte nicht-lineare Temperaturverteilung berücksichtigte Stadler durch eine thermische Ersatz-Krümmung, eine thermische Ersatz-Dehnung und einen thermischen Ersatz-E-Modul, die er mit einer analytischen Lösung berechnete. Die genaue Beschreibung ist in Abschnitt 4.2 von [1] zu finden. Zwar stellte Stadler Tabellenwerte für Normalbeton, verschiedene Plattendicken sowie die Feuerwiderstandsdauern R30, R60 und R90 bereit, falls allerdings für die untersuchte Platte keine Tabellenwerte vorliegen, müssten diese zeitintensiv über die analytische Lösung ermittelt werden. Für parametrisierte Naturbrandverfahren können in keinem Fall solche Tabellenwerte geliefert werden.

Für die Untersuchungen zu diesem Aufsatz wurde das Programm Sofistik in der Version von 2018 inklusive der Layer-Elemente verwendet. Somit können die oben beschriebenen analytischen Berechnungen entfallen und es kann eine kommerzielle Software, die in Ingenieurbüros breite Anwendung findet, genutzt werden.

2 Experimentelle Untersuchungen

In diesem Kapitel werden die für diesen Aufsatz wesentlichen Aspekte der beiden Brandversuche der Technischen Universität München und der Leibniz Universität Hannover, die am 07. Juli 2010 und 03. September 2010 im Forschungslabor für Haustechnik der Technischen Universität München in Dachau durchgeführt wurden, vorgestellt. Die Versuche stellen eine experimentelle Untersuchung der im Brandfall günstig wirkenden Membranwirkung von Verbunddecken dar. Weiterführende Informationen zu den Brandversuchen lassen sich unter anderem in [2] finden. **Bild 1** zeigt den Grundriss des Brandraumes sowie die Draufsicht der Verbunddecke beim ersten Brandversuch. Entsprechende Angaben zum zweiten Brandversuch können **Bild 2** entnommen werden.

Die Grundrisse sind mit 12,5 m auf 5,0 m bei beiden Versuchen identisch. Allerdings unterscheiden sich die beiden Verbunddecken hinsichtlich ihres Aufbaus. Beim ersten Brandversuch wurden Haupt- und Nebenträger aus IPE 160 und IPE 240 Profilen mit der Stahlgüte S235 verwendet. Die Nebenträger spannen in Längsrichtung und sind ungeschützt. Beim zweiten Brandversuch spannen die ungeschützten Nebenträger jedoch ausschließlich in Deckenquerrichtung. Neben den in Bild 1 und Bild 2 dargestellten Trägern wurden auf die Randträger L-Profile (L 120 x 80 x 8) als verlorene Schalung angeschweißt. Jedoch wurden diese nicht über die volle Länge verschweißt. Zudem unterscheiden sich die Plattenaufbauten bei beiden Versuchen. Beim ersten besteht der Aufbau aus einer 5 cm starken Elementplatte und einer 7 cm starken Ortbetonschicht. Beim zweiten Brandversuch wurde das Verbunddeckensystem Holorib HR51, bestehend



Bild 1. Grundriss des Brandraumes sowie die Draufsicht der Verbunddecke beim ersten Brandversuch Abb.: Mensinger, M.; Schaumann, P.; Stadler, M. et al.: Nutzung der Membranwirkung von Verbundträger-Decken-Systemen im Brandfall. DASt-Forschungsbericht 2012, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 2012 Fig. 1. Plan view of the furnace and top view of the composite slab at test 1 Source: Mensinger, M.; Schaumann, P; Stadler, M. et al.: Nutzung der Membranwirkung von Verbundträger-Decken-Systemen im Brandfall, DASt-Forschungsbericht 2012. Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 2012



Bild 2. Grundriss des Brandraumes sowie die Draufsicht der Verbunddecke beim zweiten Brandversuch *Abb.: Mensinger, M.; Schaumann, P; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen. Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2011*

Fig. 2. Plan view of the furnace and top view of the composite slab at test 2 Source: Mensinger, M.; Schaumann, P.; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen, Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2011



Bild 3. Deckenquerschnitt des ersten Brandversuches (links) sowie des zweiten Brandversuches (rechts) *Abb.: Stadler, M.: Design of Composite Slab Systems in Case of Fire Using Simplified Finite Element Analyses.TU München, Lehrstuhl für Metallbau, genehmigte Dissertation, 2012*

Fig. 3. Cross section of the slab of the first test (left) and of the second test (right) Source: Stadler, M.: Design of Composite Slab Systems in Case of Fire Using Simplified Finite Element Analyses. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, genehmigte Dissertation, 2012

aus einem 0,75 mm galvanisierten Stahlblech und einer Ortbetonergänzung, verwendet. **Bild 3** zeigt den Deckenquerschnitt des ersten Brandversuchs auf der linken Seite sowie den Deckenquerschnitt des zweiten Brandversuchs auf der rechten Seite.



Bild 4. Gemittelte gemessene Brandraumtemperatur beim ersten Brandversuch Abb.: Mensinger, M.; Schaumann, P; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen. Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2011

Fig. 4. Mean gas temperature of the first test Source: Mensinger, M.; Schaumann, P.; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen. Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2011



Bild 5. Gemittelte gemessene Brandraumtemperatur beim zweiten Brandversuch Abb.: Mensinger, M.; Schaumann, P; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen. Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2011

Fig. 5. Mean gas temperature of the second test *Source: Mensinger, M.;* Schaumann, P.; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen. Berlin: Ernst&Sohn Verlag, 2011

Der Verbund zwischen Stahlträgern und Konstruktionsbeton wurde mittels Kopfbolzendübeln hergestellt. Die Verbindung der Stahlträger untereinander wurde mit langen Fahnenblechen beim Anschluss IPE 240 an IPE 240 beziehungsweise mit Stirnplatten beim Anschluss IPE 160 an IPE 240 sichergestellt. Die Nebenträger wurden bei beiden Tests ungeschützt gegenüber der Brandeinwirkung belassen, während die Hauptträger mit einem Beschichtungssystem auf Wasserbasis, das einen Schutz gemäß Feuerwiderstandsklasse R60 bereitstellte, ausgestattet wurden. Hierbei kam das reaktive Brandschutzsystem Sika Unitherm Typ LSA zum Einsatz.

Ziel war es, eine ETK-Beanspruchung zu imitieren. Bei beiden Versuchen konnte dies annähernd bis zur circa vierzigsten Minute des Brandes erzielt werden. Der anschließende Temperaturabfall ist mit dem Verbrauch der Brandlast, welche mit Holzkrippen



Bild 6. Räumlich modelliertes Verbunddeckensystem des ersten Brandversuchs Abb.: Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018 Fig. 6. Three-dimensionally modelled composite slab system of the first test Source: Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018



Bild 7. Grundsätzliches Vorgehen bei der Modellierung einer unterseitig beflammten Verbunddecke im Brandfall *Abb.: Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018*

Fig. 7. Principle approach of the modelling of composite slabs in case of fire Source: Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018

realisiert wurde, zu begründen. **Bild 4** stellt die gemittelte Brandraumtemperatur in Abhängigkeit von der Zeit beim ersten Brandversuch und **Bild 5** beim zweiten Brandversuch dar.

3 Modellierung und Berechnung

In diesem Kapitel wird eine Möglichkeit vorgestellt, wie Verbunddeckensysteme im Brandfall effizient mit kommerzieller Statiksoftware modelliert werden können. Das Verbunddeckensystem wird räumlich modelliert, das heißt es wird nicht, wie bei vereinfachten Rechenverfahren, nur der Querschnitt betrachtet. **Bild 6** zeigt beispielhaft das räumlich modellierte Verbunddeckensystem des ersten Brandversuchs.

Wie die einzelnen Bestandteile des in Bild 6 gezeigten Verbunddeckensystems modelliert wurden, wird nachfolgend in **Bild** 7 am Deckenquerschnitt veranschaulicht und in Abschnitt 3.1 bis 3.4 erläutert.

3.1 Modellierung von Platten

Modellierung von Stahlbetonplatten

Die Stahlbetonplatte wird mittels Schalenelementen modelliert, auf die eine Temperaturbelastung aufgebracht wird. Schalenelemente können eine Temperaturleitung in ihrer Ebene hinreichend genau abbilden. Senkrecht dazu können sie die Temperaturleitung jedoch nicht abbilden, was bei unterseitig beflamm-



Bild 8. Temperaturverlauf nach Testdaten [1] beziehungsweise nach der rechnerischen thermischen Analyse in der Stahlbetonplatte aus dem ersten Brandversuch nach 30-minütiger ETK-Beanspruchung *Abb.: Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018*

Fig. 8. Temperature profile according to test data (blue) [1] and according to thermal analyses (red) after an exposure of the standard time-temperature curve for 30 minutes *Source: Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018*



Bild 9. Symbole für Trapezbleche (links) und für hinterschnittene Profile (rechts) Abb.: DIN EN 1994–1–2, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsche Fassung, Berlin: Beuth-Verlag, Ausgabe Dezember 2010

Fig. 9. Symbols for re-entrant (left) and open through profile steel sheeting (right) Source: DIN EN 1994–1–2, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsche Fassung, Berlin: Beuth-Verlag, Ausgabe Dezember 2010

ten Decken notwendig wäre. Hierfür wären Volumenelemente nötig, die allerdings eine deutlich größere Berechnungszeit in Anspruch nehmen. Hinzu kommt, dass die Knotenkräfte bei Volumenelementen für die Bemessung aufwendig in Biegemomente, Querkräfte und Membrankräfte umgewandelt werden müssten [1]. Aus diesen Gründen kann die Modellierung von Deckensystemen im Brandfall mittels Volumenelementen zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein wirtschaftliches Vorgehen darstellen. Deshalb wird in dieser Arbeit im Hinblick auf die Praxistauglichkeit auf die vereinfachende Layer-Modellierung von Schalenelementen, die mittlerweile in kommerzieller Statiksoftware implementiert ist, zurückgegriffen. Diese Layer-Modellierungen lassen für Schalenelemente geschichtete temperaturabhängige Materialeigenschaften zu, sofern den Schichten eine Temperatur zugeordnet und eine materiell nicht-lineare Berechnung durchgeführt wird. Für jede einzelne Schicht werden die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungsbeziehungen gemäß Absatz 3 des Eurocodes 2 Teil 1–2 [13] für Beton und Betonstahl vom Programm verwendet. Zudem wird die thermische Dehnung gemäß [13] berücksichtigt. Auf der rechten Seite von Bild 7 wurden der qualitative Temperaturverlauf in einer Stahlbetonplatte und die dem

Layer-Element zugeordnete Temperatur veranschaulicht. Um wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielen zu können, ist aufgrund großer Temperaturgradiente bei Schichten, die dem brandbeanspruchten Rand naheliegen, auf eine feinere Unterteilung zu achten.

Für die Layer-Methode muss der Temperaturverlauf im Bauteil bekannt sein. In Anhang A des Eurocodes 2 Teil 1-2 [13] sind Temperaturprofile für verschiedene Bauteile aus Stahlbeton gegeben. Für Platten ist allerdings nur der Temperaturverlauf für eine Plattendicke von 20 cm angegeben. Neben dem analytischen Ansatz von Stadler in [1] besteht die Möglichkeit, den Temperaturverlauf mittels einer thermischen Analyse der rechnergestützten Fluidmechanik zu generieren. Sofistik stellt das Modul Hydra, das die Lösung von Grundwasser- und Wärmemodellen ermöglicht, bereit. Dieses Modul wurde für die Untersuchungen in diesem Aufsatz eingesetzt.

Bild 8 stellt den Temperaturverlauf über die Plattendicke nach 30 Minuten ETK-Beanspruchung anhand einer thermischen Analyse und den Temperaturverlauf anhand von Testdaten beim ersten Brandversuch dar (Abschnitt 2). Für die rechnerische thermische Analyse wurden die thermischen und physikalischen Materialkennwerte für Stahlbeton gemäß Kapitel 3.3 von Eurocode 2 Teil 1-2 [13] herangezogen. Bei der thermischen Analyse wurde die Temperatur an 15 Punkten ausgewertet. Bei der experimentellen Untersuchung des ersten Brandversuchs wurden vier Messstellen in und an der Platte platziert. Um auf einen Temperaturverlauf über die Plattendicke zu schließen, wurden in Bild 8 die ausgewerteten Punkte bei der rechnerischen thermischen Analyse beziehungsweise die Messpunkte beim ersten Brandversuch linear verbunden. Die Testdaten wurden der Dissertation von Stadler [1] entnommen.

Bild 8 macht deutlich, dass die thermische Analyse mittels Hydra auf Basis der normativen Materialkennwerte gemäß [13] wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielt.

Modellierung von Verbundplatten (Trapezbleche, hinterschnittene Profile)

In Anhang D.4 des Eurocodes 4 Teil 1–2 [14] werden Formeln zur Ermittlung der effektiven Dicke einer Verbundplatte h_{eff} bereitgestellt. Hierbei kann die Verbundplatte durch eine einheitliche Dicke ausgedrückt werden. Gleichung 1 und Gleichung 2 zeigen die Formeln zur Bestimmung von h_{eff} gemäß [14]. Die geometrischen Randbedingungen dafür können **Bild 9** entnommen werden.

$$h_{eff} = h_1 + 0.5 h_2 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right)$$

für $h_2/h_1 \le 1.5$ und $h_1 > 40$ mm (1)

$$h_{eff} = h_1 \left[1 + 0.75 \left(\frac{l_1 + l_2}{l_1 + l_3} \right) \right]$$

für $h_2/h_1 > 1.5$ und $h_1 > 40$ mm (2)

Beispielhaft wird nachfolgend h_{eff} für die Platte aus dem zweiten Brandversuch (Abschnitt 2) ermittelt. Die geometrischen Randbedingungen dieser Decke können Bild 3 entnommen werden.

$$h_{\rm eff} = 69 + 0.5 \cdot 51 \cdot \left(\frac{114 + 138}{114 + 36}\right) = 112 \text{ mm}$$

Die Verbundplatte aus dem zweiten Brandversuch kann nun vereinfacht wie eine Stahlbetonplatte (Abschnitt 3.1) mit der effektiven Dicke $h_{eff} = 112 \text{ mm}$ modelliert werden. Die thermische Analyse wird folglich vereinfacht an einem effektiven Betonquerschnitt mit der effektiven Dicke h_{eff} durchgeführt. Anschließend wird in der mechanischen Analyse die Verbundplatte ebenfalls mit der effektiven Dicke ausschließlich als Stahlbetonplatte modelliert und die Layer-Methode wird, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, angewendet.

Das in diesem Kapitel vorgestellte Verfahren zur Modellierung von Verbundplatten greift auf Vereinfachungen zurück. So werden die unterschiedlichen Steifigkeiten der Verbunddecken in Deckenquer- und Deckenlängsrichtung nicht berücksichtigt. Neben der unterschiedlichen Steifigkeit in beide Richtungen stellen sich in der Realität auch leicht unterschiedliche Temperaturverläufe in beide Richtungen ein. In den folgenden Kapiteln werden die Steifigkeiten sowie die Temperaturbelastungen für die Haupttragrichtung der Verbunddecke angesetzt. Die Validierung am zweiten Brandversuch in Abschnitt 4, bei dem Verbunddecken gewählt wurden, zeigt, dass diese Methode hinreichend genaue Ergebnisse liefern kann.

3.2 Verbindung der Platte mit den Stahlträgern

Die Verbindung zwischen Platte und Stahlträger kann entweder vereinfacht starr oder mittels Drehfedern nachgiebig berücksichtigt werden.

3.3 Modellierung der Stahlträger

Unter erhöhter Temperatur ändern sich die Materialeigenschaften von Stahl, was sich in einem geringeren E-Modul, einer geringeren Fließgrenze und einer geringeren Proportionalitätsgrenze widerspiegelt. Zudem kommt es zu einer Ausdehnung infolge eines Anstieges der Stahltemperatur. Normativ sind die Materialeigenschaften von Kohlenstoffstahl infolge erhöhter Temperatur jeweils in den Abschnitten 3 des Eurocodes 3 Teil 1-2 [15] sowie des Eurocodes 4 Teil 1-2 [14] deckungsgleich geregelt.

Die veränderten Materialeigenschaften der Stahlträger werden im Rahmen dieser Untersuchungen über einen temperaturabhängigen E-Modul berücksichtigt. Zudem wird eine thermische Dehnung als äußere Last aufgebracht. Hierfür wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Temperatur im Stahlquerschnitt konstant ist. Dies ermöglicht die Nutzung von einfachen Stabelementen. Eine weitere Methode wäre die Modellierung der Stahlträger mittels Schalenelementen durchzuführen. Dadurch könnte über Layer-Elemente ebenfalls ein Temperaturgradient über die Stahlträgerhöhe berücksichtigt werden. Allerdings besitzen Schalenelemente im Vergleich zu Stabelementen einen deutlich höheren Modellierungsaufwand und die Formeln zur Ermittlung der Stahlträgertemperatur gemäß Abschnitt 4.2.5 des Eurocodes 3 [15] zielen auf eine konstante Stahltemperatur ab.

Die Ermittlung der Stahltemperatur hängt davon ab, ob der Stahlträger ungeschützt bleibt oder mit Brandschutzbekleidungen oder mit reaktiven Brandschutzsystemen geschützt wird.

Für die ersten zwei Fälle stellt der Eurocode 3 Teil 1-2 [15] in Abschnitt 4.2.5 Berechnungsverfahren bereit. Die dabei verwendeten Formeln des Rechenverfahrens können sowohl für Einwirkungen gemäß ETK als auch für parametrisierte Naturbrandverfahren angewendet werden. In [16] wurden diese Formeln an Für reaktive Brandschutzsysteme stellt der Eurocode 3 Teil 1-2 [15] allerdings aktuell keine Formeln zur Temperaturbestimmung bereit. Die tatsächlichen Modellierungen der reaktiven Brandschutzsysteme in FE-Programmen gestalten sich komplex. So besitzen Dämmschichtbildner beispielsweise nicht-lineare und temperaturabhängige Materialkennwerte, wie die Dämmschichtdicke, die Porosität, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit. Reaktive Brandschutzsysteme in kommerziellen FE-Programmen wirklichkeitsnah zu modellieren, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Da bei beiden Brandversuchen ein reaktives Brandschutzsystem zum Einsatz kam, wurde die Stahltemperatur von den Stahlträgern, die mit dem Brandschutzsystem geschützt wurden, mit dem nachfolgend erläuterten Verfahren ermittelt. Für das Verfahren wird die Europäische Technische Bewertung (ETA) des Produkts benötigt. Diese kann über den Hersteller kostenlos bezogen werden. In der ETA geben die Hersteller Tabellen für die erforderliche Trockenschichtdicke in Abhängigkeit der Bemessungstemperatur und des Profilfaktors (synonym wird auch der Begriff U/A-Wert, Ap/V-Wert oder section factor in der Literatur verwendet) für eine 15-, 30-, 45-, 60-, 90- und 120-minütige Beanspruchung nach ETK an. Diese Tabellen wurden für eine drei- und vierseitige Beflammung von Iund H-Profilen entwickelt. Um einen Temperatur-Zeitverlauf für den geschützten Stahlträger unter ETK-Beanspruchung zu generieren, kann die erforderliche Trockenschichtdicke mit der vorhandenen Trockenschichtdicke gleichgesetzt werden. Nach Ermittlung des Profilfaktors kann somit auf die Bemessungstemperatur zu den jeweiligen Zeitpunkten, für die die Tabelle jeweils gültig ist, rückgeschlossen werden. Zwischen den einzelnen Zeitpunkten kann näherungsweise interpoliert werden. In [16] wurde dieses Verfahren an den beiden Brandversuchen validiert. Die mit diesen Verfahren generierten Stahltemperaturen wurden nahezu in allen Fällen - im Vergleich zu den tatsächlich gemessenen Temperaturen - überschätzt, sodass dieses Verfahren auf der sicheren Seite liegt. Allerdings greift dieses Verfahren auf die Herstellertabellen, die ausschließlich für ETK-Beanspruchungen entwickelt wurden, zurück. Raveglia [17] und Tabeling [18] untersuchten im Rahmen ihrer Dissertationen die Temperaturentwicklung von Stahlprofilen, die mit reaktiven Brandschutzsystemen geschützt wurden, im Detail. Des Weiteren stellten Schaumann et al. in Abschnitt 4 von [19] aktuelle Forschungsergebnisse zur Leistungsfähigkeit von reaktiven Brandschutzsystemen bei Naturbränden vor. Für Naturbrandbeanspruchungen ist es nach dem gegenwärtigen Stand nicht möglich, kommerziell nutzbare Verfahren zur Ermittlung einer Temperatur für Stahlträger, die mit einem reaktiven Brandschutzanstrich geschützt sind, anzuwenden.

den beiden Brandversuchen validiert und es konnte gezeigt wer-

den, dass sie Ergebnisse, die auf der sicheren Seite liegen, liefern.

3.4 Eingabe des FE-Modells der beiden Brandversuche

Die vorgestellten Verbunddeckensysteme der beiden Brandversuche wurden mittels des Editors Teddy von Sofistik modelliert. Bild 6 veranschaulicht exemplarisch das FE-Modell des ersten Brandversuchs.

Die Berechnung des Systems erfolgt geometrisch nicht-linear nach Theorie III. Ordnung. Das heißt, es wird, anders als bei der geometrisch linearen Berechnung beziehungsweise nach Theorie II. Ordnung, der Gleichgewichtszustand am System mit großen



Bild 10. Vertikale Verformungen der Stahlträger in Millimeter nach der vorgestellten Methode (oben) und nach gemessenen Versuchsdaten (unten). Erster Brandversuch links und zweiter Brandversuch rechts *Abb.: Stadler, M.: Design of Composite Slab Systems in Case of Fire Using Simplified Finite Element Analyses, Technische Universität München, Lehrstuhl für Metallbau, genehmigte Dissertation, 2012. und Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018*

Fig. 10. Vertical deformations of steel beams according to the presented method (top) and according to test data (bottom). First test on the left and second test on the right *Source: Stadler, M.: Design of Composite Slab Systems in Case of Fire Using Simplified Finite Element Analyses, Technische Universität München, Lehrstuhl für Metallbau, genehmigte Dissertation, 2012. und Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall.TU München, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018*

Verformungen formuliert. Dadurch, dass die im Brandfall resultierenden großen Verformungen so wirklichkeitsnah abgebildet werden können, kann die im Brandfall günstig wirkende Membranwirkung berücksichtigt werden. Weitere Informationen zur Membranwirkung können unter anderem [12] entnommen werden.

Neben der geometrisch nicht-linearen Berechnung wurde ebenfalls eine materiell nicht-lineare Berechnung für die Deckenplatte durchgeführt, da die Layer-Methode dies für den Brandfall erfordert. Bei der materiell nicht-linearen Berechnung bleibt das Materialverhalten nicht mehr linear elastisch und folgt somit nicht mehr dem Hooke'schen Gesetz. Die Berechnung stellt einen iterativen Prozess dar. In jedem Rechenschritt werden die Steifigkeiten der einzelnen finiten Elemente so lange verändert, bis ein Gleichgewichtszustand (Konvergenz) gefunden ist, in dem die Steifigkeitsverteilung und die Schnittgrößen zueinander passen [20]. Für jeden Layer wird in Abhängigkeit seiner spezifischen Temperatur die nicht-lineare Spannungs-Dehnungsbeziehung für Beton und Betonstahl für erhöhte Temperaturen gemäß Eurocode 2 Teil 1–2 [13] hinterlegt. Auch Temperaturausdehnungen des Betons und Betonstahls werden gemäß [13] berücksichtigt.

Um den Effekt des Mitwirkens des Betons zwischen den Rissen (Tension Stiffening) zu berücksichtigen, stehen in Sofistik durch das iterative Berechnungsverfahren mehrere Möglichkeiten bereit. Vereinfacht ist die Modifikation der Stahldehnung, wie in Heft 525 des DAfStB [21] beschrieben, möglich [22]. Anpassungen von Stahl- oder Betonarbeitslinien sind ebenfalls möglich.

Tension Stiffening ist unter erhöhten Temperaturen aktuell noch nicht hinreichend genau erforscht. Vereinfachend wurde Tension Stiffening für die Untersuchungen zu diesem Aufsatz nicht berücksichtigt. Stadler stellt in Kapitel 5.2.4 seiner Dissertation [1] eine Möglichkeit vor, wie Tension Stiffening, das in [23] und [24] für Normaltemperatur beschrieben wird, vereinfacht auf den Brandfall übertragen werden kann. Für die Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen wird ein Der iterative Prozess stellt einen höheren Rechenaufwand gegenüber linear-elastischen Berechnungen dar. Die Stabelemente werden im Gegensatz zu den Deckenplatten linear-elastisch mit dem Modul ASE von Sofistik berechnet. Der Rechenaufwand wäre sonst für das gesamte Deckensystem zu hoch. Alternativ könnte auch nur ein Ausschnitt des gesamten Verbunddeckensystems betrachtet werden und sowohl die Stahlträger als auch die Platte materiell nicht-linear mit der Layer-Methode berechnet werden. Bei der rechnerischen Betrachtung der Verformung mehrfeldriger Verbunddeckensysteme an einem Ausschnitt sind die Festlegungen für die Randbedingungen von großer Bedeutung. Dies gilt insbesondere für die rechnerische Berücksichtigung der Membranwirkung.

4 Validierung

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3 vorgestellte Methode zur Modellierung und Berechnung der Verbunddecken an den experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 2 validiert. Es werden die vertikalen Verformungen, die während der Brandversuche gemessen wurden, mit den numerisch erzielten vertikalen Verformungen verglichen.

Bild 10 zeigt jeweils oben dargestellt die vertikalen Verformungen in Millimeter, die mit der in Abschnitt 3 vorgestellten Methode erzielt wurden, sowie unten, die bei den experimentellen Untersuchungen gemessen wurden. Die Ergebnisse des ersten Brandversuchs sind jeweils auf der linken Seite dargestellt und die des zweiten Brandversuchs auf der rechten Seite.

Bild 10 verdeutlicht, dass die in diesem Aufsatz vorgestellte Methode wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielt. Die Verformungen bei den Randträgern sind bei der vorgestellten Methode geringer als bei den experimentellen Untersuchungen. Dies ist damit zu begründen, dass die auf den Randträgern partiell angeschweißten L-Profile mit den Randträgern schubstarr verbunden wurden. Im Rahmen der Untersuchungen zu diesem Aufsatz wurde diese Vereinfachung zum einen getroffen, da keine näheren Informationen zu den Verschweißungen vorlagen, und zum anderen, um die vorgestellte Methode mit der Methode nach Stadler [1] vergleichbar zu machen. Dieser Vergleich ist in Kapitel 4.4 von [16] dargestellt.

5 Fazit

Im Rahmen dieses Aufsatzes wurde eine Methode für die Modellierungen von Verbunddeckensystemen im Brandfall vorgestellt. Die Methode zeichnet sich zum einen dadurch aus, dass sie weitgehend unabhängig von der Art der thermischen Einwirkung ist und somit, neben der üblicherweise angesetzten ETK, auch Ingenieurmethoden wie parametrisierte Naturbrandkurven berücksichtigen kann. Zum anderen stellt sie aufgrund der Wahl von einfachen Schalenelementen, die durch Layer-Elemente einen geschichteten Temperaturverlauf für die Deckenplatte zulassen und von Stabelementen für die Stahlträger, einen vergleichsweise geringen Modellierungsaufwand dar. Darüber hinaus greift die Methode auf kommerzielle Statiksoftware zurück, sodass zukünftige praktische Anwendungen möglich sind. Außerdem können durch die geometrisch nicht-lineare Berechnung maßgebende günstige Effekte wie die Membranwirkung berücksichtigt werden. Zunächst wurden Teilergebnisse, wie die thermische Analyse für die Stahlbetonplatte, an den Brandversuchen validiert. Hier konnte eine gute Übereinstimmung der gewonnenen Ergebnisse gezeigt werden. In Abschnitt 4 konnte nachgewiesen werden, dass die vorgestellte Methode wirklichkeitsnahe Ergebnisse bereitstellt. So weisen die vertikalen Verformungen der Stahlträger, die mithilfe der Methode ermittelt wurden, nur geringfügige Unterschiede zu den gemessenen Verformungen bei beiden Brandversuchen auf.

Für Querschnittsbereiche der Stahlbetonplatte über geschützten Mittelträgern treten im Brandfall große Rotationen auf. Der Nachweis der Rotationskapazität ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur unter Normaltemperatur normativ geregelt. Im Brandfall sind aufgrund der verringerten Steifigkeit des Betons deutlich größere Rotationen realisierbar. Eine Übertragung des Nachweises der Rotationskapazität unter Normaltemperatur auf den Brandfall würde unwirtschaftliche Ergebnisse erzielen [12]. Hier sind weitere wissenschaftliche Untersuchungen notwendig. Ebenso ist die Berücksichtigung von Tension Stiffening aktuell noch nicht hinreichend genau für den Brandfall untersucht. Wird die erforderliche Rotationskapazität sowie die Duktilität sichergestellt, sind breite praktische Anwendungen dieser Methode möglich. Ein Einsatz einer rissbreitenverteilenden Bewehrung ist deshalb aus Sicht der Autoren erforderlich.

Berücksichtigt man darüber hinaus weitere Forschungsergebnisse zum verringerten Emissionsgrad von verzinkten Stahlkonstruktionen [25] und zum Mindestverdübelungsgrad im Brandfall [26], stehen weiterentwickelte wirtschaftliche Bemessung der Verbunddeckensysteme unter Berücksichtigung der Brandeinwirkung zur Verfügung.

- Literatur
- Stadler, M.: Design of Composite Slab Systems in Case of Fire Using Simplified Finite Element Analyses. Technische Universität München, Lehrstuhl für Metallbau, Dissertation, 2012.
- [2] Mensinger, M.; Schaumann, P.; Stadler, M. et al.: Membranwirkung von Verbunddecken bei Brand – Experimentelle Untersuchungen. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011.
- [3] DIN EN 1991–1–2, Eurocode 1: Einwirkungen aufTragwerke Teil 1–2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen aufTragwerke, Berlin: Beuth-Verlag, Ausgabe Dezember 2010.
- [4] DIN EN 1991–1–2/NA, Nationaler Anhang National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Berlin: Beuth-Verlag, Ausgabe Mai 2015.
- [5] Vassart, O.; Bailey, C. G.; Hawes, M. et al.: Large-Scale FireTest of Unprotected Cellular Beam Acting in Membrane Action. In: Structures in Fire: Proceedings of the Sixth International Conference. Michigan State University, 2010, pp. 398-406.
- [6] Wald, F; Kallerová, P; Chlouba, P; Sokol, Z. et al.: FireTest on an Administrative Building in Mokrsko: Summary of the Results from the Fire Experiment. Tschechische Technische Universität Prag, 2010.
- [7] Wald, F; Jána, T; Horová, K.: Design of joints to composite columns for improved fire robustness: To demonstration fire tests. Tschechische Technische Universität Prag, 2011
- [8] Huang, Z.; Burgess, I. W.; Plank, R. J.: Modeling Membrane Action of Concrete Slabs in Composite Buildings in Fire. I: Theoretical Development. In: Journal of Structural Engineering, Vol. 129 (2003), Iss. 8, pp. 1093-1102.
- [9] Huang, Z.; Burgess, I. W.; Plank, R. J.: Modeling Membrane Action of Concrete Slabs in Composite Buildings in Fire. II: Validations. In: Journal of Structural Engineering, Vol. 129 (2003), Iss. 8, pp. 1103-1112.
- [10] Tesar, C. N.: Zum Tragverhalten von Verbunddeckensystemen im Brandfall. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2008.

- [11] Franssen, J. M.; Kodur, V. K. R.; Mason, J.: Elements of Theory for Safir 2002: A Computer Program for Analysis of Structures Submitted to the Fire. University of Liege, Department Mécanique des matériaux & Structures, 2002.
- [12] Mensinger, M.; Schaumann, P.; Stadler, M. et al.: Nutzung der Membranwirkung von Verbundträger-Decken-Systemen im Brandfall. DASt-Forschungsbericht 2012, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 2012.
- [13] DIN EN 1992–1–2, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsche Fassung, Berlin: Beuth-Verlag. Ausgabe Dezember 2010.
- [14] DIN EN 1994–1–2, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsche Fassung, Berlin: Beuth-Verlag, Ausgabe Dezember 2010.
- [15] DIN EN 1993–1–2, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall. Deutsche Fassung EN, Berlin: Beuth-Verlag, Ausgabe Dezember 2010.
- [16] Lange, N.: Zur Modellierung und Bemessung von Verbunddeckensystemen im Brandfall. München, Technische Universität, Lehrstuhl für Metallbau, Master-Thesis, 2018.
- [17] Raveglia, E. A.: Grundlagen der Bemessung von intumeszierenden Brandschutzsystemen im Stahlbau. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2008.
- [18] Tabeling, F.: Zum Hochtemperaturverhalten dämmschichtbildender Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen. Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2014.
- [19] Schaumann, P.; Weisheim, W.: Aktuelle Forschung und Verwendbarkeit von reaktiven Brandschutzsystemen im Stahlbau. In: Stahlbau 88 (2019) Heft 1, S. 11-21.
- [20] Wagner, M.: Lineare und nichtlineare FEM. Eine Einführung mit Anwendungen in der Umformsimulation mit LS-DYNA. Springer-Verlag, Berlin, 2017.
- [21] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Heft 525, Erläuterung zu DIN 1045–1. Beuth-Verlag, Berlin, 2003
- [22] Sofistik AG: ASE, Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen, ASE Manual, Version 2018–4, Software Version SOFiSTiK 2018. Oberschleißheim, 2018.
- [23] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045–1 (Fassung 2008) und EN 1992–1–1 (Eurocode 2). Springer Verlag, 2010.
- [24] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. März 2009.
- [25] Mensinger, M.; Gaigl, C.: Feuerwiderstand verzinkter Stahlkonstruktionen. In: Stahlbau 88 (2019), Heft 1, S. 3-10.
- [26] Pfenning, S.; Mensinger, M.; Zehfuß, J. et al.: Mindestverdübelung von Verbundträgern im Brandfall. In: Stahlbau 88 (2019), Heft 3, S. 234-246.



Dr.-Ing. André Müller

andre.mueller@zm-i.de

Abb.: Zilch + Müller Ingenieure GmbH

Nils Lange, M.Sc.

nils.lange@tum.de

Zilch + Müller Ingenieure GmbH Erika-Mann-Straße 63, 80636 München

Christian Gaigl, M.Sc.

c.gaigl@tum.de

Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger

mensinger@tum.de

TU München, Lehrstuhl für Metallbau Arcisstr. 21, 80333 München