

# Brandbemessung von Stahltragwerken mit der Finite-Elemente-Methode

Brandschutztechnisch komplett ungeschützte Stahlkonstruktionen sind in der Baupraxis nicht etabliert. Insbesondere in Verbindung mit Verbunddecken lassen sich mit erweiterten Finite-Elemente-Modellen jedoch oft ungeschützte Stahlkonstruktionen realisieren. Falls durch die Bemessung kein Wegfall der Brandschutzmaßnahmen möglich ist, können diese optimiert werden, z. B. hinsichtlich der Schichtdicken von dämmschichtbildenden Brandschutzanstrichen. Analytische Methoden oder vereinfachte Verfahren resultieren in der Praxis meist in Konstruktionen mit eher konservativen Brandschutzmaßnahmen und vernachlässigen physikalische Phänomene wie z. B. die thermischen Dehnungen und Zwängungen. Im vorliegenden Aufsatz wird die Bemessung im Brandfall mit numerischen Methoden und dem Fokus auf die praktische Anwendung dargestellt. Zur Beurteilung werden Tragfähigkeitskriterien mithilfe des Spannungs-Dehnungsverhaltens der Werkstoffe und der Schrauben angesetzt. Die praktische Anwendung von Finite-Elemente-Modellen wird anhand ausgewählter Beispiele mit Teilsystemen oder Einzelbauteilen gezeigt – sowohl mit dem Ziel des kompletten Verzichts auf Brandschutzmaßnahmen als auch einer Optimierung der Schichtdicken dämmschichtbildender Brandschutzanstriche.

**Stichworte** Stahltragwerk; Heißbemessung; Membrantragwirkung; Finite-Elemente-Methode; Optimierung; dämmschichtbildender Brandschutzanstrich

## Structural fire design of steel constructions by finite element method

Completely unprotected steel structures in terms of fire are not established in building practice. However, especially in connection with composite slabs, it is often possible to realise unprotected steel structures with the aid of advanced finite element models. If the structural design does not enable an omission of fire protection measures, these can be optimised, for example the thicknesses of intumescent fire coatings. Analytical methods or simplified procedures often result in constructions with rather conservative fire protection measures and neglect physical phenomena such as the thermal expansions and constraints. In this paper, the structural fire design using numerical methods is presented with the focus on practical application. For the assessment, load-bearing criteria are developed with the help of the stress-strain behaviour of the materials and bolts. The practical application of finite element models is shown on selected examples with subsystems or individual components – with the aim of completely dispensing with fire protection measures or optimising the thicknesses of intumescent coatings.

**Keywords** steel structure; structural fire design; membrane action; finite element method; optimisation; intumescent fire coating

## 1 Einführung

Verbundkonstruktionen mit Verbunddecken und Stahlträgern sind etabliert und ermöglichen durch ihre Tragwirkung eine effiziente und wirtschaftliche Bauweise. Den konstruktiven Brandschutz gewährleisten Verbunddecken durch eine entsprechende konstruktive Durchbildung und sind für diese bauaufsichtlich zertifiziert. Für das Gesamtsystem sind jedoch die als Auflager dienenden Stahlträger ebenfalls mit der gleichen Feuerwiderstandsdauer auszubilden.

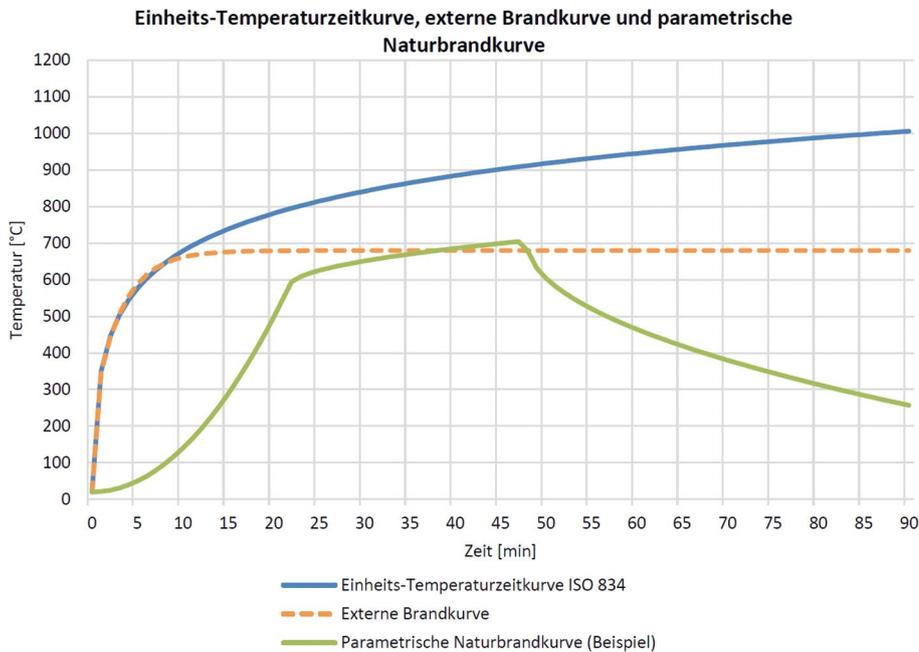
In der Ingenieurpraxis werden die Stahlkonstruktionen i. d. R. brandschutztechnisch geschützt ausgeführt. Unter Ansatz des sich im Brandfall in der Decke einstellenden Membrantragverhaltens [1] können mithilfe analytischer Bemessungsmethoden in Teilen ungeschützte Stahlkonstruktionen realisiert werden. Bei den analytischen Methoden erfolgen die Nachweise der Verbunddecke und Stahlträger voneinander getrennt. Damit werden kombinierte Tragmechanismen und Wechselwirkungen vernachlässigt.

Im vorliegenden Aufsatz wird eine Bemessung im Brandfall mithilfe von Finite-Elemente-Modellen im Sinne allgemeiner Bemessungsverfahren gemäß EN 1991-1-2 [2] erläutert. Dabei wird der Fokus auf die Modellierung, wesentliche Randbedingungen sowie Beurteilungskriterien für die Tragfähigkeit gelegt. Für den Umgang mit Anschlüssen und Schrauben wird aufgrund der nicht vollständigen Erfassung in den Normen ein eigener vereinfachter Ansatz vorgeschlagen.

## 2 Grundlagen zur Bemessung im Brandfall

### 2.1 Thermische Einwirkungen

Normativ stehen als thermische Einwirkung im Brandfall nominelle Temperaturzeitkurven zur Verfügung. Entgegen dem Brandverhalten in der Realität haben sie einen Verlauf mit einer stetig über die Zeit ansteigenden Temperatur, ohne Berücksichtigung der Schwelbrandphase zu Beginn oder der Abkühlung zum Ende des Brands. Die Einheitstemperaturzeitkurve nach ISO 834 [2] aus der



**Bild 1** Temperaturzeitkurven für die Bemessung im Brandfall [4]  
Temperature time curves for structural fire design [4]

Klassifizierung in Feuerwiderstandsklassen mithilfe von Brandprüfungen von Bauteilen hat sich zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Brandversuchen international etabliert. Für spezielle Anwendungsfälle stehen die externe Brandkurve (für die Brandeinwirkung auf Außenbauteile) und die Hydrocarbon-Brandkurve (z. B. für die Simulation von Tunnelbränden) zur Verfügung [2].

Neben den nominellen Temperaturzeitkurven können auch Naturbrandmodelle zum Einsatz kommen. In vereinfachten Naturbrandmodellen wird ein Temperatur-Zeitverlauf aus den Ventilationsverhältnissen, der Brandlastdichte, der Brandraumgeometrie und den thermischen Eigenschaften der Umfassungsbauteile ermittelt und als thermische Einwirkung angesetzt. Dazu ist bspw. die Anwendung einer parametrisierten Temperaturkurve möglich [3]. Exemplarisch sind in Bild 1 die Einheitstemperaturzeitkurve, die externe Brandkurve sowie eine exemplarisch für eine Büronutzung ermittelte parametrische Naturbrandkurve gegenübergestellt.

Allgemeine Naturbrandmodelle werden mithilfe von numerischen Brandsimulationen erstellt und können ebenfalls als Grundlage für die thermische Einwirkung verwendet werden. Vereinfachte oder allgemeine Naturbrandansätze bedingen die Annahme von Brandszenarien, die u. a. von der Gebäudenutzung abhängen.

Der Einsatz der Einheitstemperaturkurve in Verbindung mit dem R-Kriterium der betrachteten Bauteile bietet sich an, wenn der Nachweis allgemeingültig bleiben und somit unabhängig von Brandszenarien oder Gebäudenutzungen sein soll. Die genaue Abstimmung der Brandeinwirkung auf die Gebäudeparameter durch die Verwendung von Brandszenarien ermöglicht jedoch einen realitätsnäheren und in vielen Fällen günstigeren Temperaturverlauf

über die Zeit und somit eine wirtschaftlichere Bemessung der Bauteile für den Brandfall. Dies ist jedoch ggf. mit Einschränkungen der Nutzungsflexibilität verbunden.

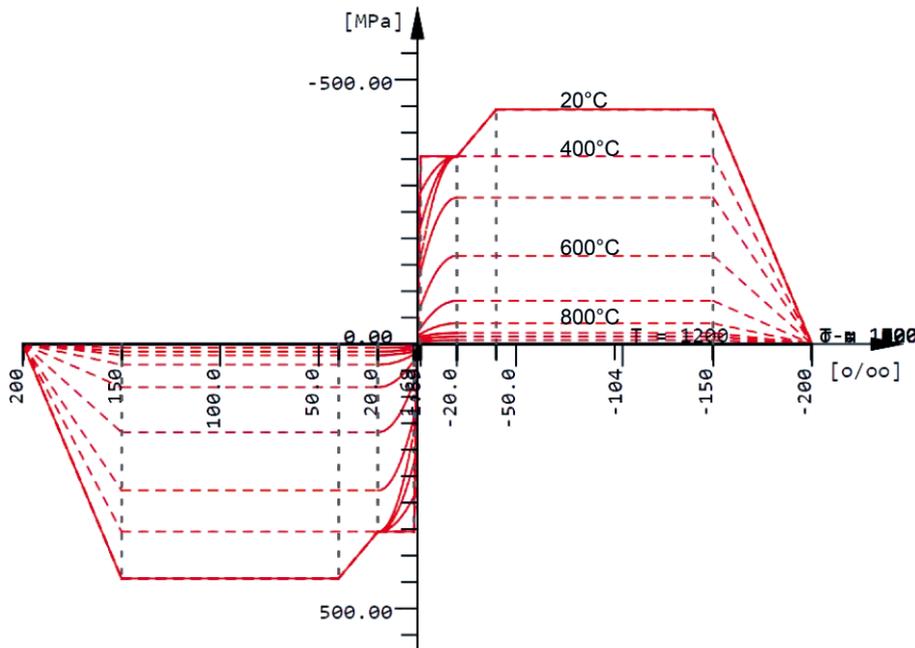
## 2.2 Temperaturabhängige mechanische Eigenschaften der Werkstoffe

Eine Finite-Elemente-Berechnung eines Tragwerks bedingt die Formulierung temperaturabhängiger Werkstoffgesetze in Form nichtlinearer Spannungs-Dehnungsbeziehungen für alle im System enthaltenen Werkstoffe. Die Teile 1-2 der jeweiligen Eurocodes enthalten für Baustahl, Betonstahl und Beton entsprechende Spannungs-Dehnungslinien, jedoch nicht für Stahlbauschrauben oder Schweißnähte.

In Bild 2 ist exemplarisch das Werkstoffgesetz für Baustahl S355 für verschiedene Temperaturniveaus dargestellt, so wie es innerhalb einer Finite-Elemente-Software angesetzt wird. Diesem liegt das temperaturabhängige Werkstoffgesetz für Baustahl gemäß EN 1993-1-2 [5] inkl. Verfestigungsbereich zugrunde.

## 2.3 Temperaturabhängige mechanische Eigenschaften der Schrauben

In EN 1993-1-2 [5] sind für Stahlbauschrauben keine Spannungs-Dehnungsbeziehungen oder Kraft-Verformungslinien enthalten. Die temperaturabhängigen Schraubeneigenschaften werden über Abminderungsfaktoren der Grenzkkräfte für Zug und Abscheren definiert. Diese basieren auf Versuchsreihen von Kirby [6] an Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 mit Durchmesser M20 unter einer Temperatureinwirkung von bis zu 800 °C. Für Raumtemperatur sind in ISO 898-1 [7] Mindestwerte



**Bild 2** Temperaturabhängiges Werkstoffgesetz Baustahl S355 [4]  
Temperature dependent material law steel S355 [4]

für die Bruchdehnung festgelegt. Diese reicht von 9% bei Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 über 12% bei Festigkeitsklasse 8.8 und 20% bei Festigkeitsklasse 5.6 bis zu 22% bei Festigkeitsklasse 4.6. Für Schubverformungen von Schrauben fehlen entsprechende normative Regelungen. Das Tragverhalten von Schrauben unter Abscherbelastung bei Raumtemperatur wurde von Henriques [8] untersucht. Dort werden für ausgewählte Schraubenwerkstoffe und Durchmesser Grenzwerte für die aufnehmbare Querverformung ermittelt. Diese basieren auf dem Verhältnis zwischen dem Abscherwiderstand und der Steifigkeit gemäß EN 1993-1-8 [9] und sind in Tab. 1 dargestellt.

In Aufsätzen von Hanus, Zilli, Franssen [10, 11] wird dieser Ansatz um den Aspekt Temperatureinwirkung erweitert und Kraft-Verformungslinien auch für Abscheren abgeleitet. Der Schwerpunkt der beiden Aufsätze liegt jedoch bei Spannungs-Dehnungslinien von Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 bei Zugkraft. Das Verhalten von Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 unter Zugbeanspruchung wird von González [12] untersucht. Es wird festgestellt, dass die temperaturabhängigen Abminderungsfak-

toren nach EN 1993-1-2 [5] für diese Festigkeitsklasse auf der unsicheren Seite liegen. Daher werden für diese Schrauben neben der Entwicklung einer Spannungs-Dehnungsbeziehung für reine Zugbeanspruchung auch geänderte Abminderungsfaktoren für den Zugkraftwiderstand vorgeschlagen.

Es ergibt sich aus den verschiedenen Untersuchungen zu Eigenschaften von Schrauben unter Temperatureinfluss kein homogenes Bild oder allgemeingültiges Werkstoffgesetz. Es fehlen zusammenhängende Versuche an Schrauben verschiedener Festigkeitsklassen unter Temperaturbeanspruchung für Zug, Abscheren sowie deren Interaktion.

Daher wird ein vereinfachter Ansatz vorgeschlagen, der möglichst umfassend und konservativ ist. Dieser basiert auf den Abminderungsfaktoren der aufnehmbaren Kräfte gemäß EN 1993-1-2 [5] sowie auf der Komponentenmethode gemäß EN 1993-1-8 [13]. Es wird jeweils ein bilineares Werkstoffgesetz für Zug gemäß Bild 3 und Abscheren gemäß Bild 4 vorgeschlagen.

**Tab. 1** Maximale Querverformung  $\delta_{u,b}$  für ausgewählte Schraubenwerkstoffe und Durchmesser [8] (Bezeichnungen an EN 1993-1-8 [9] angepasst)  
Maximum shear displacement  $\delta_{u,b}$  for selected bolt materials and diameters [8] (designations adapted to EN 1993-1-8 [9])

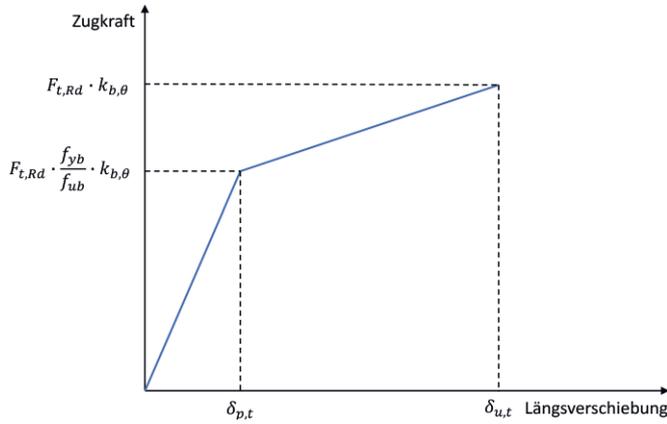
Festigkeitsklasse	Querverformung $\delta_{u,b}$		
	M16	M20	M24
5.8	4,7 $F_{v,Ed}/S_v$	5,5 $F_{v,Ed}/S_v$	6,7 $F_{v,Ed}/S_v$
8.8	3,0 $F_{v,Ed}/S_v$	3,5 $F_{v,Ed}/S_v$	4,2 $F_{v,Ed}/S_v$
10.9	2,6 $F_{v,Ed}/S_v$	2,9 $F_{v,Ed}/S_v$	3,4 $F_{v,Ed}/S_v$

Die Grenzkkräfte für Zug und Abscheren werden nach EN 1993-1-2 [5] mit den temperaturabhängigen Abminderungsfaktoren ermittelt (Gln. (1), (2)):

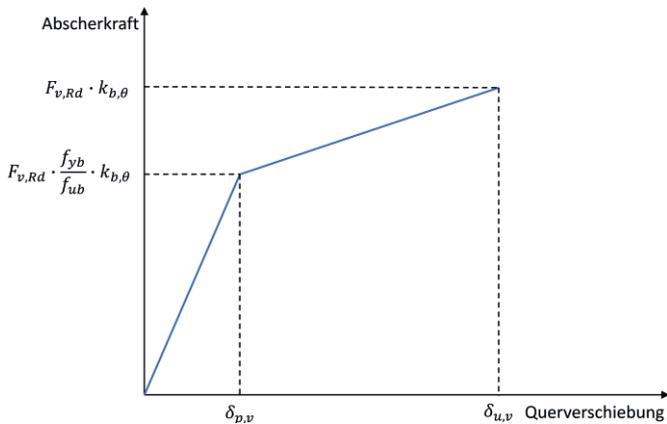
$$F_{t,Rd,\theta} = F_{t,Rd} \cdot k_{b,\theta} = 0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot k_{b,\theta} \tag{1}$$

$$F_{v,Rd,\theta} = F_{v,Rd} \cdot k_{b,\theta} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A \cdot k_{b,\theta} \tag{2}$$

Es werden die zugehörigen Steifigkeiten nach der Komponentenmethode aus EN 1993-1-8 [13] angesetzt, um die temperaturabhängigen Abminderungsfaktoren erweitert und damit die zugehörigen Verschiebungen bei Erreichen der Streckgrenze ermittelt (Gln. (3)–(6)):



**Bild 3** Zugkraft-Verformungsdiagramm für Schrauben im Brandfall [4]  
Tensile force displacement diagram for bolts in fire [4]



**Bild 4** Abscherkraft-Verformungsdiagramm für Schrauben im Brandfall [4]  
Shear force displacement diagram for bolts in fire [4]

$$S_t = k_{10} \cdot E = 1,6 \cdot \frac{A_s}{L_b} \cdot E \quad (3)$$

$$S_v = k_{11} \cdot E = \frac{16d^2 f_{ub}}{d_{M16}} \quad (4)$$

$$\delta_{p,t} = \frac{F_{t,Rd} \cdot f_{yb} \cdot k_{b,\theta}}{f_{ub} \cdot S_t \cdot k_{E,\theta}} \quad (5)$$

$$\delta_{p,v} = \frac{F_{v,Rd} \cdot f_{yb} \cdot k_{b,\theta}}{f_{ub} \cdot S_v \cdot k_{E,\theta}} \quad (6)$$

Für die Verschiebungen bei Erreichen der temperaturabhängig abgeminderten Zugfestigkeit zum Ende der bilinearen Kraft-Verformungsdiagramme werden für die Zugbeanspruchung die empfohlenen Grenzdehnungen gemäß Tab. 2 angesetzt. Diese sind auf der sicheren Seite liegend jeweils die Minima aus den bei Raumtemperatur angesetzten Bruchdehnungen und den Ergebnissen der o. g. Untersuchungen zu Schrauben unter Zugbeanspruchung.

Diese werden zur Berechnung der Grenzverschiebung bei Zug eingesetzt (Gl. (7)):

$$\delta_{u,t} = L_b \cdot \epsilon_{u,b} \quad (7)$$

**Tab. 2** Empfohlene Werte für die Bruchdehnung von Stahlbauschrauben  
Recommended values of the ultimate strain of bolts

Festigkeitsklasse	$\epsilon_{u,b}$ [%]
4.6	15 %
5.6	15 %
8.8	12 %
10.9	9 %

Für den Fall des Abscherens werden die Werte aus Tab. 1 direkt eingesetzt (Gl. (8)):

$$\delta_{u,v} = \delta_{u,b} \quad (8)$$

Zusätzlich ist die Interaktion von Zug- und Abscherkraft zu berücksichtigen. In Untersuchungen von Renner [14] und Kawohl [15] wird aufgezeigt, dass die Interaktionsformel nach EN 1993-1-8 [13] stark auf der sicheren Seite liegt und stattdessen eine alternative Interaktionsformel vorgeschlagen (Gl. (9)):

$$\left( \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd} \cdot k_{b,\theta}} \right)^{1,5} + \left( \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd} \cdot k_{b,\theta}} \right)^{1,5} \leq 1 \quad (9)$$

Eine Validierung des vorgeschlagenen Ansatzes mit den bilinearen Kraft-Verformungsdiagrammen und der zugehörigen Grenzwerte mithilfe zugehöriger Versuche ist ausstehend. Der Vergleich ausgewählter Beispiele mit den o. g. Untersuchungen in [4] legt jedoch nahe, dass dieser auf der sicheren Seite liegt.

## 2.4 Versagens- und Tragfähigkeitskriterien im Brandfall

Seit 1995 sind zahlreiche Brandversuche an Verbunddecken mit Stahlträgern durchgeführt und dokumentiert worden. Die ersten dieser Art stellen die Großbrandversuche in Cardington [16] dar. Weitere bedeutende und in Forschungsberichten dokumentierte Versuche an Verbunddecken sind die Versuchsreihen FRACOF, COSS-FIRE, FICEB+ von ArcelorMittal [17] sowie Brandversuche an der TU München [1].

Allen Brandversuchen ist gemeinsam, dass das Brandverhalten von Tragwerksteilen bei Weitem gutmütiger ist, als aus Brandversuchen an Einzelbauteilen abgeleitet werden kann. Dies beruht u. a. auf dem sich einstellenden Membranverhalten der bewehrten Decke und dem Durchhängen der Stahlträger. Der Membraneffekt stellt sich bereits bei kleinen Verformungen ein und leistet einen substantiellen Beitrag zum Tragverhalten. Der durch Kopfbolzendübel sichergestellte Verbund zwischen Stahlträgern und Decke bleibt auch bei erhöhten Temperaturen erhalten. Bei allen Versuchen stellen sich große Verformungen ein. Die in EN 13501-2 [18] und EN 1363-1 [19] formulierten Verformungskriterien aus der Klassifizierung von Einzelbauteilen aufgrund von Brandversuchen werden dabei

ohne Verlust der Tragfähigkeit oft überschritten. Diese sind somit als Versagens- und Tragfähigkeitskriterien nicht geeignet, obwohl sie in der Ingenieurpraxis oft angesetzt werden.

Mit einer physikalisch und geometrisch nichtlinearen Berechnung durch ein Finite-Elemente-Schalenmodell erfolgt die Beurteilung der Tragfähigkeit auf Basis des in den Abschn. 2.2, 2.3 beschriebenen Werkstoffverhaltens mit maximal zulässigen Grenzdehnungen, nicht mehr mit Grenzschnittgrößen.

Für die Bemessungssituation bei Raumtemperatur ist in prEN 1993-1-14 [20] eine maximal zulässige Vergleichsdehnung nach von Mises von 5% für Baustahl formuliert. Dort ist das Werkstoffmodell nach von Mises auch für den Brandfall mit vorwiegend ruhender Beanspruchung mit Verweis auf das Werkstoffgesetz nach EN 1993-1-2 [5] als zulässiges Werkstoffmodell spezifiziert. Es wird die über den Betrachtungszeitraum maximal auftretende Vergleichsdehnung nach von Mises aus dem vorhandenen dreidimensionalen Spannungszustand errechnet und einer Grenzdehnung gegenübergestellt. Für die Bemessung unter Temperaturbeanspruchung im Brandfall gilt bei Baustahl gemäß EN 1993-1-2 [5] für die Grenzdehnung an der Fließgrenze ein Wert von 15%, für die Bruchdehnung 20%.

Es wird vorgeschlagen, für die Beurteilung der Tragfähigkeit die Grenze für die Vergleichsdehnung im Baustahl auf 20% zu setzen und somit das Werkstoffgesetz bis zum Ende des abfallenden Asts zu berücksichtigen. Der Vorschlag wird durch Untersuchungen im Rahmen einer Fallstudie in [4] untermauert. Dabei wird dieser Grenzwert als an jeder Stelle des statischen Systems einzuhaltender Wert empfohlen, insbesondere beim Einsatz automatisierter Auswertungen im Postprocessing der Finite-Elemente-Berechnung. Aus rein mechanischer Sicht führt nicht jede lokale Dehnung, die über dem Grenzwert liegt, zwingend zu einem Verlust der Tragfähigkeit des statischen Systems. Dies gilt insbesondere dann, wenn durch ein Finite-Elemente-Modell mit feiner Diskretisierung das Spannungs-Dehnungsverhalten an jeder Stelle des statischen Systems detailliert abgebildet wird. Mit dem nicht zu überschreitenden Grenzkriterium soll jedoch das erforderliche Sicherheitsniveau gewährleistet werden, auch weil dieses das Hauptkriterium zur Beurteilung der Tragfähigkeit des Baustahls und damit von zentraler Bedeutung ist. Die scharfe Begrenzung an jeder Stelle des Baustahls ermöglicht aber die volle Ausnutzung des Dehnungsbereichs bis 20%, der durch das Werkstoffgesetz vorgesehen ist, sofern es vor Erreichen der Grenzdehnung kein Stabilitätsversagen aufgrund großer Verformungen und abfallender Steifigkeit der Struktur gibt.

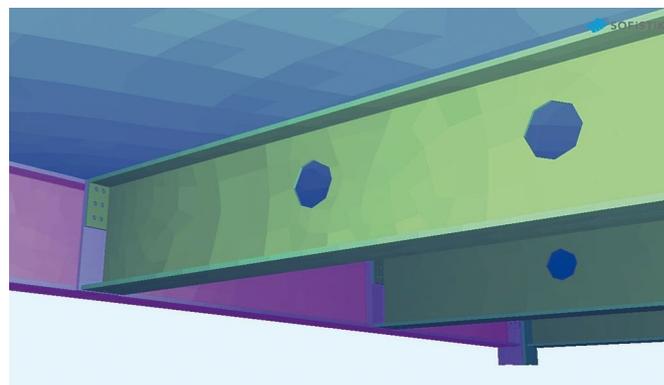
### 3 Entwicklung und Validierung eines Finite-Elemente-Modells

#### 3.1 Modellierung

Um wesentliche physikalische Phänomene und das Zusammenwirken einzelner Tragmechanismen berücksichtigen zu können, werden in einem Finite-Elemente-Modell alle relevanten Tragwerksteile abgebildet. Um das Spannungs-Dehnungsverhalten der Stahlbauteile adäquat erfassen zu können, werden diese entgegen dem in der aktuellen Ingenieurpraxis oftmals gewählten Ansatz nicht mit Stabelementen, sondern mit Schalenelementen modelliert (Beispiel in Bild 5). Damit werden globale und lokale Stabilitätseffekte berücksichtigt sowie Effekte aus thermischer Dehnung, Zwängungen, Entfestigung des Stahls und plastischer Umlagerung realitätsnah erfasst. Die Elemente sind über die Dicke mit Layern geschichtet. In den jeweiligen Gaußpunkten der Layer können die Temperaturen aus der thermischen Analyse übergeben werden. Damit ist die Betrachtung einer variablen Temperaturverteilung über die Schalendicke und somit über den Deckenquerschnitt möglich. Schrauben werden als Federn modelliert, denen die in Abschn. 2.3 beschriebenen temperaturabhängigen Arbeitslinien zugewiesen werden.

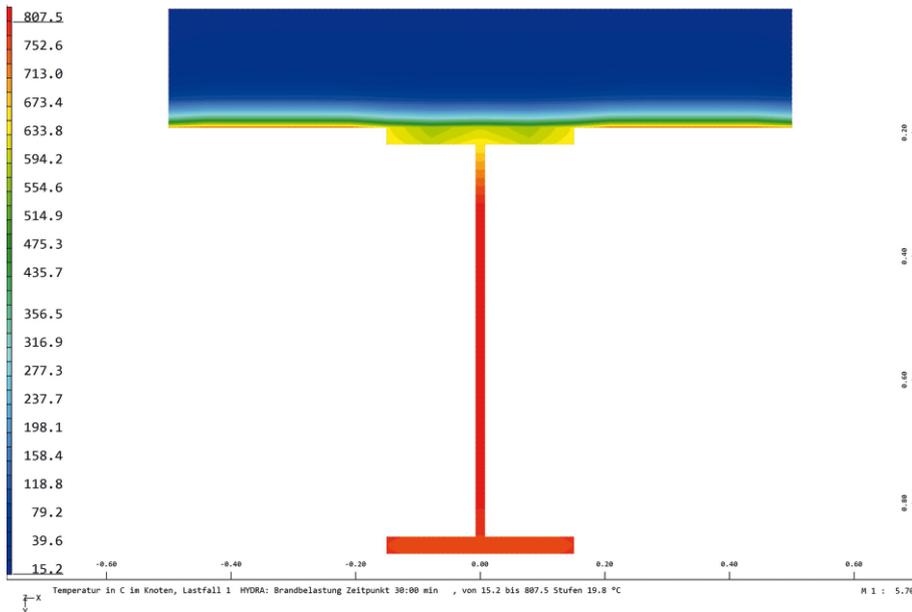
Die Werkstoffgesetze für Beton, Betonstahl und Baustahl werden gemäß den jeweiligen Teilen 1-2 der zugehörigen Eurocodes berücksichtigt. Zur Berücksichtigung des Mittragens des Betons auf Zug zwischen den Rissen wird die Zugversteifung (tension stiffening) nach dem vereinfachten Ansatz der modifizierten Stahldehnungen gemäß Heft 525 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [21] berücksichtigt. Für Verbundträger wird vereinfachend angenommen, dass die Verbundwirkung auch bei erhöhten Temperaturen erhalten bleibt. Diese Annahme wird durch die Validierung mithilfe verschiedener Brandversuche bestätigt.

Im Sinne der ingenieurpraktischen Anwendung kommt in der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise die Software SOFiSTiK zum Einsatz. Diese ermöglicht die notwendi-



**Bild 5** Erweitertes Finite-Elemente-Modell einer Verbunddecke mit Stahlträgern und Anschlüssen in SOFiSTiK [4]

Advanced finite element model of a composite slab with steel beams and connections in SOFiSTiK [4]



**Bild 6** Temperaturen in der thermischen Querschnittsanalyse [4]  
Temperatures in thermal section analysis [4]

gen geometrisch und physikalisch nichtlinearen Berechnungen.

### 3.2 Workflow

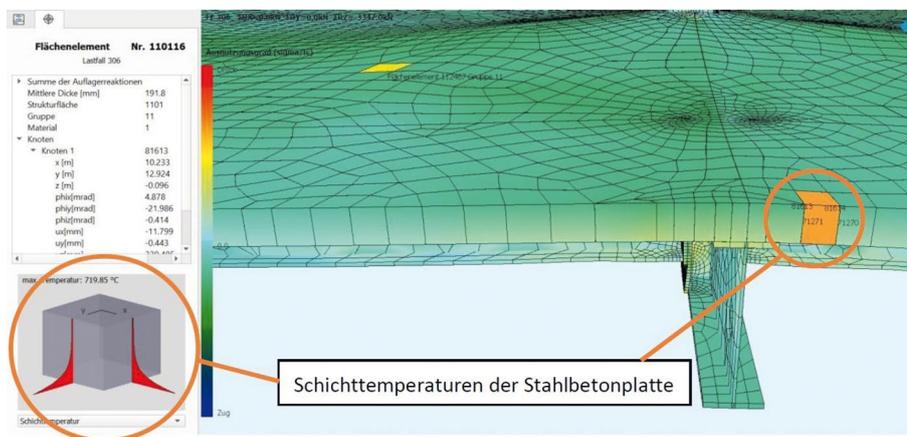
In einem ersten Schritt erfolgt über die Dauer des Brands die thermische Analyse an jeweils einem 2D-Modell für jeden Querschnitt, wie in Bild 6 exemplarisch gezeigt. Dabei kommen die in Abschn. 2.1 beschriebenen Temperatureinwirkungen zum Einsatz. Vereinfachend werden die im Querschnitt ermittelten Bauteiltemperaturen über die gesamte Trägerachse oder ggf. definierte Abschnitte angesetzt. Die Vernetzung des Querschnitts in der thermischen Analyse erfolgt derart, dass mindestens an den Stellen Knoten vorhanden sind, an denen im mechanischen Modell Gaußpunkte über die Schalenelementdicke verteilt sind. Dadurch können die Temperaturen mit Knotenergebnissen passend in das mechanische Modell übergeben werden.

Im mechanischen Modell werden die Gaußpunkte an den dem Brand ausgesetzten Oberflächen verdichtet, damit die Schichttemperaturen mit einer adäquaten Genauigkeit erfasst werden können. In Bild 7 ist dies am Beispiel einer Stahlbetonplatte mit Brandexposition an der Deckenunterseite dargestellt.

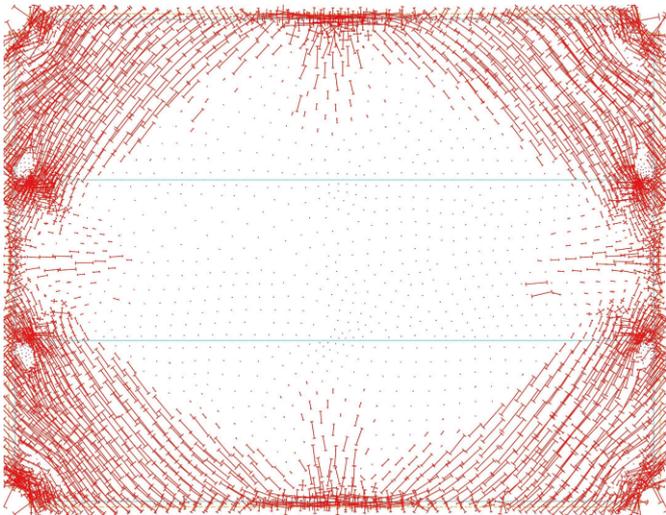
Im mechanischen Modell erfolgt über die Branddauer die geometrisch und physikalisch nichtlineare Berechnung des Systems mit allen thermischen und mechanischen Einwirkungen. Ausgewertet werden u.a. die Dehnungen in den Werkstoffen und Schrauben und den Tragfähigkeitskriterien gegenübergestellt.

### 3.3 Validierung

Das zur Validierung im neben anderen exemplarisch gewählten Brandversuch FRACOF [17] beobachtete Tragverhalten wird durch das Finite-Elemente-Modell qualita-



**Bild 7** Übernahme der Temperaturen aus dem thermischen in das mechanische SOFiSTiK-Modell [4]  
Transfer of temperatures from the thermal to the mechanical SOFiSTiK model [4]



**Bild 8** Validierung mit dem FRACOF-Versuch, Hauptspannungen an der Deckenoberseite bei 120 min [4]  
Validation with FRACOF test, main stresses on the top of the slab at 120 min [4]

tiv realitätsnah approximiert. In Bild 8 ist anhand des Verlaufs der Hauptspannungstrajektorien an der Deckenoberseite erkennbar, dass sich im Modell das ebenfalls im Versuch festgestellte Membrantragverhalten einstellt. Charakteristisch ist dabei die Ausbildung eines umlaufenden Druckrings sowie von Zugkräften im Inneren des Felds.

Die getroffene Modellannahme, dass die Verbundwirkung auch bei hohen Temperaturen erhalten bleibt, wird durch den Brandversuch gestützt. Der Vergleich zwischen Versuch und Finite-Elemente-Berechnung hinsichtlich Verformungsverhalten ist in Bild 9 dargestellt – Verfor-

mungen blau und Verformungsgeschwindigkeit orange. Es zeigt sich, dass in der Berechnung die Verformungen gegenüber dem Versuch quantitativ zwar tendenziell überschätzt werden, das Verformungsverhalten jedoch qualitativ in guter Übereinstimmung angenähert wird.

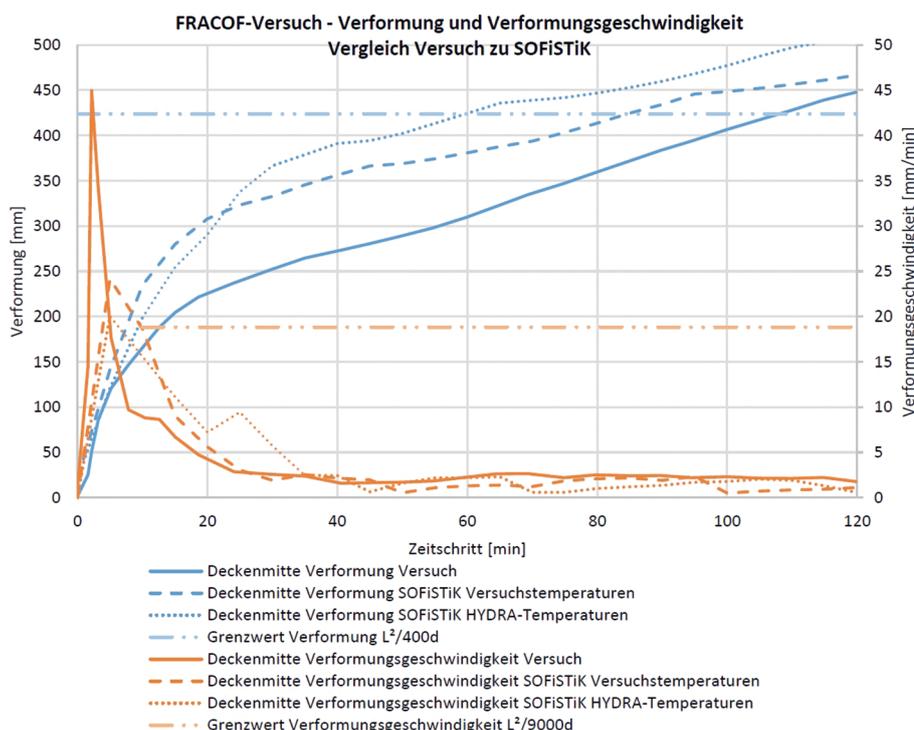
Sowohl im Versuch als auch in der Berechnung werden die vergleichend herangezogenen Verformungskriterien gemäß EN 13501-2 [18] und EN 1363-1 [19] überschritten, ohne dass sich ein Verlust der Tragfähigkeit innerhalb des betrachteten Zeitraums von 120 min abzeichnet.

## 4 Praktische Anwendung der Methode

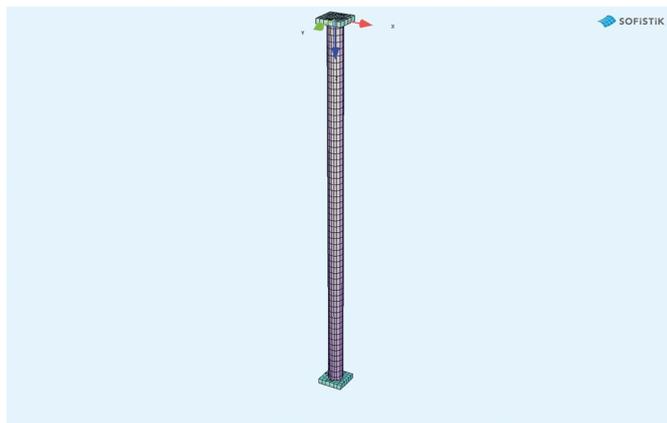
### 4.1 Optimierung der Modellierung und Auswertung

Selbst wenn mit dem aktuellen Stand der Technik die Berechnungszeiten komplexer Finite-Elemente-Modelle in einem vertretbaren Bereich liegen, empfiehlt sich eine Optimierung durch Reduktion auf Teilmodelle unter Ausnutzung von Symmetrie, sofern dies für das betrachtete statische System möglich ist. Für die praktische Anwendung noch relevanter sind der Zeitaufwand und die Komplexität einer Modellierung von Hand in den gängigen Preprocessing-Anwendungen. Daher können parametrische Standardmodelle für wiederkehrende Anwendungsfälle erstellt werden. Dabei erfolgt im Preprocessing keinerlei grafische Eingabe, sondern eine parametrische Eingabe von Abmessungen, Querschnitten, Werkstoffen, Einwirkungen etc.

Zur Auswertung kann das statische System skriptbasiert auf die Einhaltung von Tragfähigkeitskriterien wie maxi-



**Bild 9** Validierung mit dem FRACOF-Versuch, Vergleich des Verformungsverhaltens in Deckenmitte [4]  
Validation with FRACOF test, comparison of deformation behaviour in the middle of the slab [4]



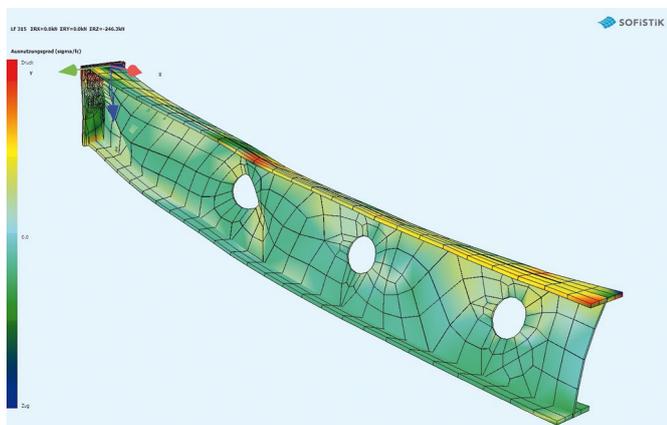
**Bild 10** Statisches Modell einer Stahlstütze in SOFiSTiK  
Structural model of a steel column in SOFiSTiK

male Vergleichsdehnungen im Baustahl oder Dehnungen in Schrauben überprüft werden. Dies unterstützt eine manuelle Auswertung in grafischen Ausgaben im Post-processing.

#### 4.2 Stützen und Träger als Einzelbauteile

Auch wenn die Stärke der Finite-Elemente-Methode primär darin liegt, mit einem Gesamtmodell verschiedene Tragmechanismen zu erfassen, können auch Einzelbauteile wie Stützen (Bild 10) oder Träger (Bild 11) parametrisch modelliert, berechnet und beurteilt werden. Symmetrie kann ausgenutzt werden, sodass nur das halbe System modelliert wird. Anschlüsse können vereinfacht oder inkl. Schrauben erfasst werden.

Der Vorteil dieses Ansatzes auch für Einzelbauteile liegt darin, dass effizient und realitätsnäher als bei einer Handrechnung die kritische Temperatur, bei der der Verlust der Tragfähigkeit zu erwarten ist, für das betrachtete Bauteil bestimmt werden kann. Das Ziel dieser Herangehensweise kann sowohl der Verzicht auf Brandschutzmaßnahmen als auch die Optimierung derselben sein.



**Bild 11** Statisches Modell eines Stahlträgers in SOFiSTiK (verformt, halbes System)  
Structural model of a steel beam in SOFiSTiK (deformed, half system)

Dabei kann bspw. die erforderliche Schichtdicke eines Brandschutzanstrichs durch passgenaue Abstimmung auf die bestimmte kritische Temperatur optimiert werden.

Als Basis für die Beurteilung können sowohl die Einheits-temperaturzeitkurve als auch Naturbrandansätze zum Einsatz kommen.

Im Gegensatz zu üblichen Handrechnungen bestehen für das Finite-Elemente-Modell keine Einschränkungen auf bestimmte Randbedingungen wie bspw. Zwangsfreiheit des Bauteils. Zwangskräfte werden bei Definition entsprechender Randbedingungen realitätsnah berücksichtigt. Damit ist die Methode allgemeingültig und auch gegenüber vereinfachten Berechnungen attraktiv.

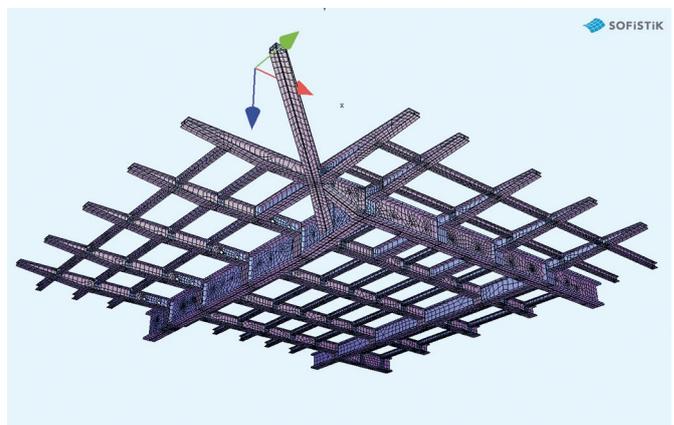
#### 4.3 Stahlträgerroste mit oder ohne Verbunddecke als Teil- oder Gesamtsystem

Die Stärke der Finite-Elemente-Methode liegt in der Erfassung der verschiedenen Tragmechanismen von Teil- oder Gesamtsystemen wie Stahlträgerrosten (Bild 12) oder Verbunddecken (Bild 13). Aufgrund der Komplexität und Größe der Systeme bietet sich besonders die Ausnutzung von Symmetrien zur Modellierung von halben oder geviertelten Systemen an.

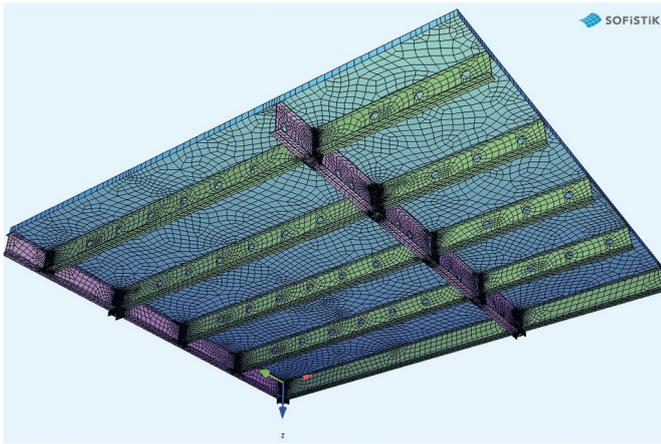
Da sich die Bestimmung einer kritischen Temperatur primär auf Einzelbauteile bezieht, liegt der Fokus der Berechnung von Teil- oder Gesamtsystemen im Gegensatz zu Einzelbauteilen auf dem Nachweis im Brandfall ohne Brandschutzmaßnahmen.

Wie bei Einzelbauteilen können auf der Einwirkungsseite sowohl Normbrandkurven als auch Naturbrandansätze angesetzt werden.

Je nach gewähltem Detaillierungsgrad können Stahlbauanschlüsse entweder vereinfacht oder mit jeder einzelnen Schraube modelliert, berechnet und ausgewertet werden.



**Bild 12** Statisches Modell eines Stahlträgerrosts in SOFiSTiK, Teilsystem mit Symmetriebedingungen  
Structural model of a steel beam system in SOFiSTiK, partial system with symmetry conditions



**Bild 13** Statisches Modell eines Verbunddeckensystems mit Stahlträgern in SOFiSTiK, Teilsystem mit Symmetriebedingungen [4]  
Structural model of a composite slab system with steel beams in SOFiSTiK, partial system with symmetry conditions [4]

Der Hauptvorteil der Methode gegenüber vereinfachten Verfahren liegt darin, dass Kombinationen und Wechselwirkungen verschiedener Tragmechanismen berücksichtigt werden können.

## 5 Zusammenfassung

Das Tragverhalten insbesondere von Verbunddecken mit Stahlträgern wird mit vereinfachten Bemessungsmethoden ohne Berücksichtigung des Gesamttragverhaltens und der verschiedenen Tragmechanismen nicht adäquat erfasst. Vereinfachte Methoden haben daher häufig als

Ergebnis, dass vermehrt Brandschutzmaßnahmen am Tragwerk erforderlich werden.

Vereinfachte Bemessungsverfahren sind auf Einzelbauteile ausgerichtet und v. a. an bestimmte Randbedingungen gebunden, die in der Praxis oftmals trotzdem nicht eingehalten werden. Die Bemessung mithilfe des erweiterten numerischen Modells ermöglicht im Gegensatz dazu die Erfassung aller Randbedingungen und physikalischen Phänomene wie thermische Dehnungen bzw. Zwangskräfte.

Die Methode kann zum Nachweis des Feuerwiderstands nach dem bauteilorientierten R-Kriterium unter ISO-Normbrand eingesetzt werden. Das Potenzial der Berechnung mithilfe der Finite-Elemente-Methode entfaltet sich jedoch mit einem leistungsorientierten Ansatz mit parametrischen oder simulationsgestützten Naturbrandansätzen.

Neben dem wirtschaftlichen Aspekt der Kosteneinsparung durch entfallende Brandschutzmaßnahmen ergibt sich der Vorteil der Flexibilität hinsichtlich Befestigungen von nichttragenden Bauteilen oder Installationen. Stahl- und Verbundkonstruktionen erscheinen in der Praxis durch für den Feuerwiderstand erforderliche Brandschutzmaßnahmen auf den ersten Blick oftmals weniger attraktiv als eine Massivbauweise. Durch die modellgestützte Bemessung im Brandfall und entfallende Brandschutzmaßnahmen gewinnt die Stahl- und Verbundbauweise jedoch wieder an Attraktivität und ermöglicht u. a. die Erstellung demontabler Tragwerke im Rahmen von zunehmend an Bedeutung gewinnenden Reuse-Konzepten.

## Literatur

- [1] Mensinger, M.; Schaumann, P.; Stadler, M.; Sothmann, J. (2012) *Membranwirkung von Verbundträger-Decken-Systemen im Brandfall*. DASt-Forschungsbericht. Düsseldorf.
- [2] SN EN 1991-1-2:2002 (2022) *Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin: Beuth.
- [3] DIN EN 1991-1-2/NA:2015 (2015) *Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke – Nationaler Anhang NA zu DIN EN 1991-1-2:2010*. Berlin: Beuth.
- [4] Lequime, P. (2022) *Zur numerischen Analyse und ingenieurpraktischen Beurteilung von Verbunddecken mit ungeschützten Stahlträgern im Brandfall* [Dissertation]. Ruhr-Universität Bochum.
- [5] SN EN 1993-1-2:2005 (2005) *Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: Beuth.
- [6] Kirby, B. R. (1995) *The Behaviour of High-strength Grade 8.8 Bolts in Fire*. Journal of Constructional Steel Research 33, pp. 3–38.
- [7] DIN EN ISO 898-1:2013 (2013) *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus Kohlenstoffstahl und legiertem Stahl – Teil 1: Schrauben mit festgelegten Festigkeitsklassen – Regelgewinde und Feingewinde*. Berlin: Beuth.
- [8] Henriques, J. (2007) *Ductility Requirements in Shear Bolted Connections* [Masterarbeit]. Universität Coimbra.
- [9] SN EN 1993-1-8:2005 (2005) *Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*. Berlin: Beuth.
- [10] Hanus, F.; Zilli, G.; Franssen, J.-M. (2010) *Experimental Investigations and Analytical Model for the Behavior of Grade 8.8 Bolts and Butt Welds Under Heating and Subsequent Cooling* in: Kodur, V.; Franssen, J.-M. [eds.] *Structures in Fire – Proceedings of the Sixth International Conference*. SiF'10, Michigan, June 2–4, 2010. pp. 638–645.
- [11] Hanus, F.; Zilli, G.; Franssen, J.-M. (2011) *Experimental Tests and Analytical Models for Welds and Grade 8.8 Bolts under Heating and Subsequent Cooling*. Journal of Structural Fire Engineering 2, No. 3, pp. 181–194.
- [12] González Orta, F. (2011) *Untersuchungen zum Material- und Tragverhalten von Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 während und nach einem Brand* [Dissertation]. Technische Universität Darmstadt.
- [13] SN EN 1993-1-8:2005 (2005) *Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen*. Berlin: Beuth.
- [14] Renner, A.; Lange, J. (2019) *Zum Tragverhalten und zur Bemessung von Schrauben unter kombinierter Zug-Ab-scher-Belastung*. Stahlbau 88, H. 4, S. 324–330. <https://doi.org/10.1002/stab.201900002>

- [15] Kawohl, A. (2017) *Beitrag zur Zug-Abscher-Interaktion von hochfesten Schrauben während und nach einem Brand* [Dissertation]. Technische Universität Darmstadt.
- [16] British Steel (1999) *The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fire*. London British Steel, Swinden Technology Centre.
- [17] Vassart, O.; Zhao, B. (2012) *MACS+ Membrane Action of Composite Structures in Case of Fire, Brandverhalten von Stahl- und Verbunddeckensystemen, Background Document* [online]. <http://www.macsfire.eu/downloads/de/Documents/Background.pdf> [Stand: 16. Jan. 2023]
- [18] SN EN 13501-2:2016 (2016) *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. Berlin: Beuth.
- [19] SN EN 1363-1:2012 (2012) *Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth.
- [20] prEN 1993-1-14:2020 (2020) *Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-14: Design assisted by finite element analysis*. CEN/TC250/SC 3.
- [21] DAfStb (2010) *Erläuterungen zur DIN 1045-1*. DAfStb-Heft 525. 2. überarb. Aufl. Berlin: Beuth.

**Autor:in**

Dr.-Ing. Pascal Lequime (Korrespondenzautor)  
pascal.lequime@gruner.ch  
Gruner AG  
St. Jakobs-Strasse 199  
4020 Basel, Schweiz

**Zitieren Sie diesen Beitrag**

Lequime, P. (2023) *Brandbemessung von Stahltragwerken mit der Finite-Elemente-Methode*. Stahlbau.  
<https://doi.org/10.1002/stab.202300019>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
Eingereicht: 19. März 2023; angenommen: 15. Mai 2023.