

Heißbemessung als Alternative zu baulichen Lösungen

Heißbemessung: Üblicherweise müssen Stahltragwerke mithilfe von Plattenbekleidungen oder reaktiven Brandschutzsystemen ausgestattet werden, um eine geforderte Feuerwiderstandsdauer zu erreichen. Besonders im Bestand treten allerdings regelmäßig Probleme auf, wenn z.B. die Randbedingungen des Verwendbarkeitsnachweises nicht eingehalten werden können. Der Beitrag stellt anhand brandschutztechnischer Fragestellungen bei Stahlbauteilen bzw. -tragwerken das Verfahren der Heißbemessung vor. **Matthias Stamm, Dr. Matthias Siemon**

Um die Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauteilen oder -tragwerken im Brandfall nachzuweisen, erlauben die Eurocodes (DIN EN 1991-1-2, DIN EN 1993-1-2 und zugehörige nationale Anwendungsdokumente, [1] – [4]) die Verwendung von allgemeinen Rechenverfahren, welche die wesentlichen physikalischen Einflüsse im Brandfall sowohl thermisch als auch mechanisch berücksichtigen (Abschnitt 2 DIN EN 1991-1-2 [1]). Die Eurocodes sind in der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) als Technische Baubestimmungen (TB, [5]) eingeführt. Der Stand der Umsetzung in den einzelnen Ländern ist den Webseiten des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) zu entnehmen. Prozesse oder Methoden des allgemeinen Rechenverfahrens bestehen aus numerischen Simulationen, die sich in zwei grundlegende Verfahrenskomponenten einteilen lassen: Brand- bzw. Strömungssimulationen mithilfe von Feldmodellen (CFD-Modellen) zur Ermittlung der thermischen Beanspruchung des Tragwerkes und Struktursimulationen auf Grundlage der *Finite-Elemente-Methode* für die mechanische Analyse der beflamten Struktur.

Des Weiteren bedarf es eines effektiven Verfahrens, um die Informationen zwischen den beiden Simulationen zu übergeben. Der Bezeichnung des Vfdb-Leitfadens [6] folgend, beschäftigt sich der vorliegende

Beitrag mit dem Verfahren nach Ebene 3 der Eurocodes. Ein Vergleich zu den Verfahren nach Ebene 1 bzw. Ebene 2 ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Tragwerksanalyse kann basierend auf einer Brandbeanspruchung mit nominellen Temperaturzeitkurven (z.B. der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK)) oder auf einem Naturbrand erfolgen. Der Ansatz einer Naturbrandbeanspruchung basiert üblicherweise auf dem Verfahren nach DIN EN 1991-1-2/NA (Naturbrand, Sicherheitskonzept). Bei Anwendung dieses Verfahrens sind die Anlagen bzw. Kommentare in der Liste der Technischen Baubestimmungen zu beachten, die an einzelnen Stellen im Verfahren (z.B. der Ausfallwahrscheinlichkeit des Löschangriffs der Feuerwehr) gesonderte Angaben enthalten.

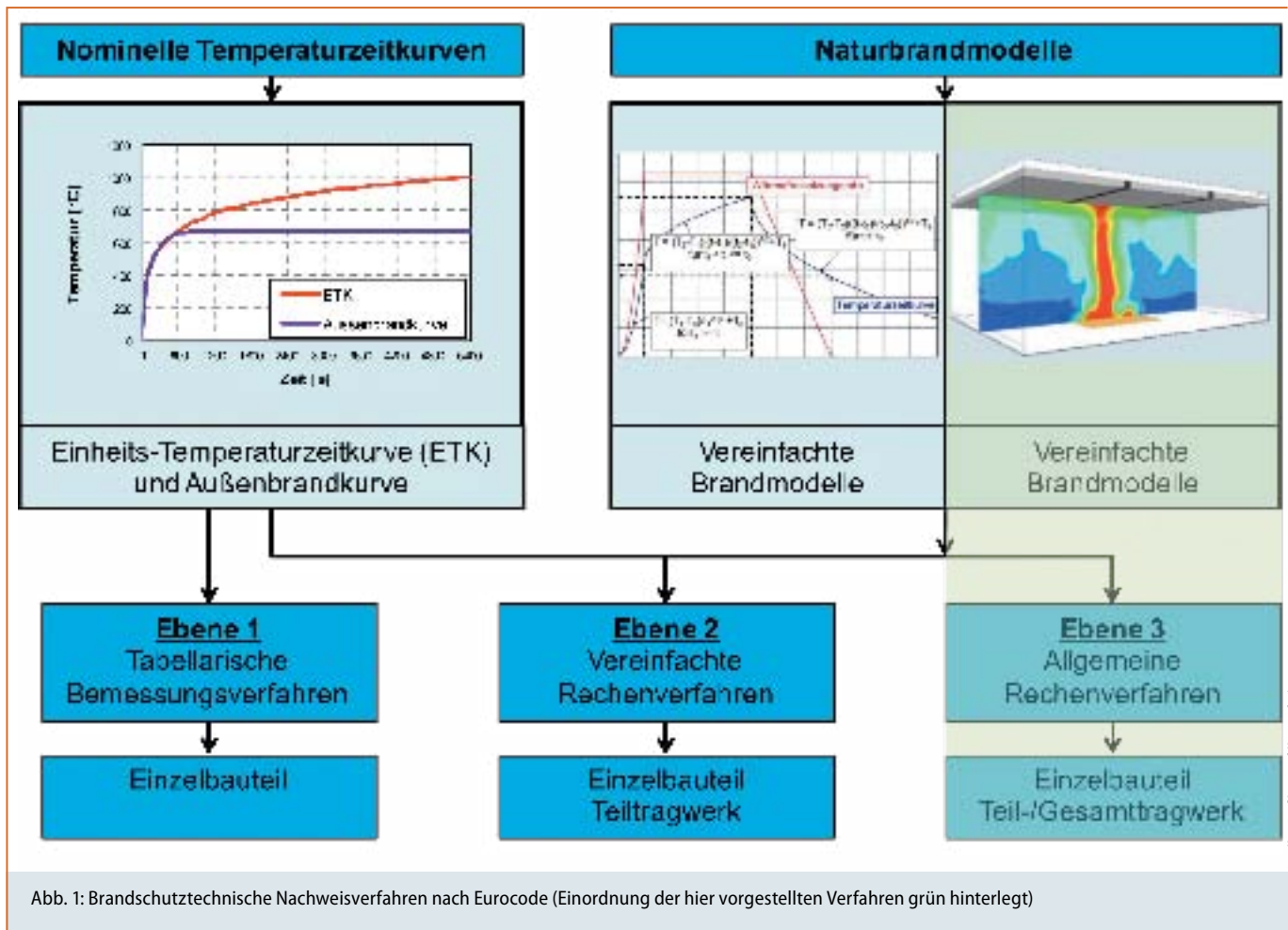
Heißbemessung: Verfahren mit Potenzial

Die Anwendung einer Heißbemessung anstelle von baulichen Ertüchtigungsmaßnahmen bringt zwar Randbedingungen und Anwendungsgrenzen mit sich, resultiert aber in einer Reihe von Vorteilen. Für den Nachweis der Feuerwiderstandsdauer im Brandfall als außergewöhnlichen Lastfall können die günstig wirkenden Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt werden. Bei der Betrachtung als Gesamttragwerk ist es außerdem möglich, Lastumlagerungseffekte bzw. Tragwerksreserven explizit zu berücksichtigen.

Dieser Ansatz liefert den Nachweis einer höheren Feuerwiderstandsdauer, erfordert jedoch eine gewissenhafte Modellierung der Anschlussdetails und Lagerbedingungen. Bei der Auswertung ist die Situation im Bereich der Anschlüsse detailliert zu bewerten, insgesamt sind die auftretenden Verformungen und Spannungen auf ihre Verträglichkeit zu prüfen. Auch Stabilitätsprobleme sind zu betrachten.

Ein großer Vorteil der Heißbemessung liegt in dem Potenzial, auf bauliche Brandschutzmaßnahmen wie Bekleidung oder reaktive Brandschutzsysteme zu verzichten. Besonders für Bestandsgebäude ist die nachträgliche Anbringung solcher Systeme oftmals kompliziert und kostenintensiv. Daneben sind hier die Randbedingungen der entsprechenden Verwendbarkeitsnachweise nicht einzuhalten (vgl. hierzu z.B. Geburtig [7]).

Die Anwendung von Naturbrandverfahren erfordert die Definition von anzusetzenden Brandlasten und die Berücksichtigung der vorhandenen Ventilationsbedingungen im Gebäude. Aus diesem Grund wird in der Anlage 1.2.1/3 MVV TB explizit eine sich hieraus ergebende Nutzungseinschränkung herausgestellt. Diese basiert auf den Eingangsparametern, welche dem Bemessungsbrand zugrunde gelegt werden und als Nebenbestimmungen der Baugenehmigung festzulegen sind. Hier ist zu erwähnen, dass Flughafenterminals oder Kongresshallen selten innerhalb ihrer Lebensdauer umgenutzt werden. Häufiger tritt bei Bestandsgebäuden im Fall der Umnutzung das Problem auf, dass die Brandlast und die zu erwartende Brandleistung signifikant höher liegen als zuvor. Um zu vermeiden, dass der Betreiber oder Bauherr bei einer Umnutzung einen neuen Nachweis für das Tragwerk benötigt, können über die Anforderungen nach DIN EN 1991-1-2/NA hinausgehende konservative Parameter oder mehrere unterschiedliche Nutzungen angesetzt und in der Baugenehmigung festgelegt werden. Hierbei werden i.d.R. höhere Anforderungen an das Tragwerk gestellt. Inwieweit diese erfüllt werden können, hängt von dem spezifischen Projekt ab und lässt sich nicht pauschal beantworten. Im Falle einer Umnutzung muss geprüft werden, ob die geplante Nutzungsänderung noch von



dem Nachweis und den Festlegungen der Baugenehmigung abgedeckt wird.

Die Betrachtung der Gesamtragwirkung im Brandfall ist zudem aus mehreren Gründen abseits von vereinfachten Verfahren wichtig:

- Die mechanischen Auswirkungen von thermischen Dehnungen in Stahlbauteilen können auch für Tragwerksbereiche, die mit Temperaturen von unter 500 °C beansprucht werden, maßgebend sein. Dies gilt besonders für Anschlüsse von Bauteilen.
- Auch teilbeflammte Bereiche in großen Tragstrukturen können starken Zwängungen ausgesetzt werden, sodass lokale plastische Gelenke entstehen, die als kinematische Kette einen progressiven Kollaps auslösen können.
- Statisch gelenkig idealisierte Systeme benötigen in ihren konstruktiven Details trotz statischer Idealisierung die Fähigkeit zur Übertragung von Momenten, z.B. einen Schraubanschluss mit wenigstens

zwei übereinanderliegenden Schrauben (als Schraubenpaar), die in der Heißbemessung versagensrelevant werden können.

Die genannten Aspekte erlauben auf der anderen Seite eine gezielte Maßnahmendefinition. Anstelle einer Bekleidung des kompletten Tragwerkes ist es möglich, versagensrelevante Bereiche zu schützen und anschließend die Wirksamkeit dieser Maßnahmen nachzuweisen.

Allgemeines Rechenverfahren – Betrachtung am Gesamtsystem

Das allgemeine Rechenverfahren nach den Eurocodes berücksichtigt den Einfluss von thermischer Dehnung auf alle relevanten tragenden Bauteile, den Einfluss großer Verformungen und Verdrehungen sowie die Wirkung der abnehmenden Festigkeit und Steifigkeit des Stahls bei zunehmender Temperatur. Die korrekte Abbildung dieser Einflüsse im Berechnungsmodell kann besonders im Stahlbau nur durch feinskalige Bauteil-

modellierungen erfolgen. Solche Berechnungsmodelle sind, bedingt durch die hierbei erforderliche Lösung von nichtlinearen Gleichungssystemen auf Grundlage iterativer Verfahren mit einer Vielzahl an Freiheitsgraden, sehr rechenintensiv. Die komplette Abbildung eines komplexen Tragwerks als dreidimensionales Modell ist deshalb nicht praxistauglich durchführbar. Mithilfe moderner Rechenverfahren durch eine Aufteilung in Kaltbereich und Brandnahbereich kann eine leistungsfähige schnelle Rechnung erzielt werden, die zudem genauer in der Aussagequalität ist. Dieses Rechenverfahren ist in der Ingenieurwelt auch als *GFEM/DFEM-Verfahren* bekannt und wird u.a. im Flugzeugbau verwendet. Zusätzlich ist das verwendete Berechnungsmodell anhand der Validierungsbeispiele der DIN EN 1991-1-2/NA zu erheben. Somit wird nachgewiesen, dass das angesetzte Materialmodell der DIN EN 1993-1-2 und weiteren Anforderungen entspricht. »

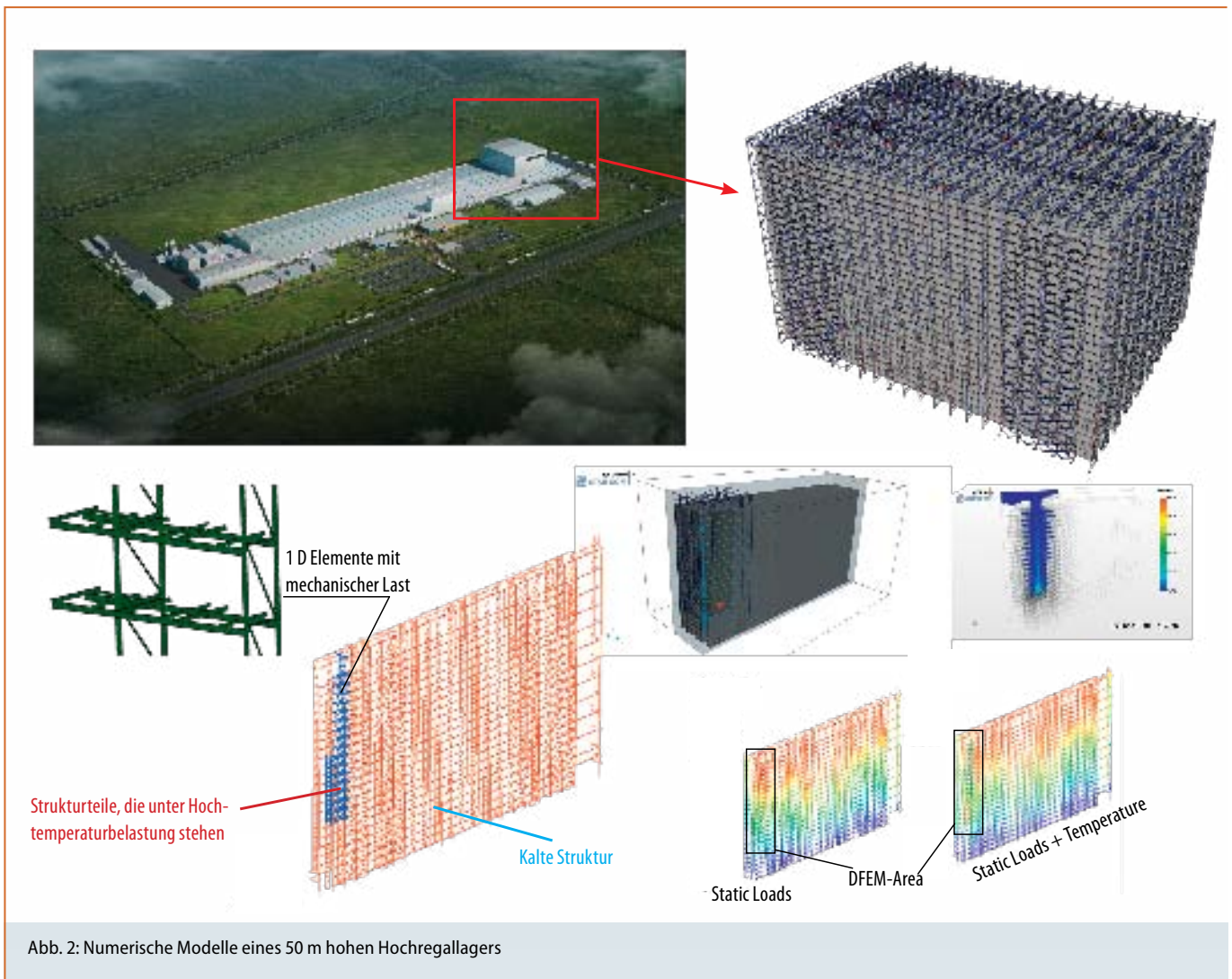


Abb. 2: Numerische Modelle eines 50 m hohen Hochregallagers

Anwendungsgrenzen des Verfahrens

Der erfolgreiche Nachweis einer Heißbemessung kann nicht vor Durchführung der Berechnung garantiert werden. Trotzdem lässt sich das Risiko für den Auftraggeber minimieren: Mit entsprechender Erfahrung ist vorab einschätzbar, bei welchem Raumvolumen und mit welchen Öffnungsflächen und Brandlasten eine rechnerische Untersuchung Erfolg hat.

Unsicherheiten in Bezug auf die Akzeptanz der Berechnungsergebnisse müssen vorher unter Einbeziehung der verantwortlichen Genehmigungsbehörden und der Feuerwehr abgestimmt werden. Bereits in diesem Projektstadium kann es außerdem sinnvoll sein, den potenziellen Prüfer der durchzuführenden Heißbemessung einzubeziehen. Aufgrund der gestaffelten Nachweisstruktur *Brandsimulation – Thermische Analyse – Mechanische Analyse* ist es möglich, die

Erfolgsaussichten nach jedem Rechenschritt neu zu beurteilen und sinnvolle Maßnahmen einzuleiten. Sollten z.B. zu hohe Temperaturen im Bereich maßgebender Bauteile auftreten, gibt es die Möglichkeit, lokal begrenzte bauliche Brandschutzmaßnahmen rechnerisch in den darauffolgenden Verfahrensschritten zu berücksichtigen und entsprechend zu begrenzen (z.B. die lokal begrenzte Applikation reaktiver Brandschutzsysteme auf Stützen, während die Dachkonstruktion ungeschützt verbleiben kann). Eine weitere Möglichkeit liegt in der gezielten Aufdimensionierung der versagensrelevanten Bauteile bzw. Anschlüsse. Der letzte Schritt im Verfahren der Heißbemessung ist dann die mechanische Analyse für die Berechnung der thermisch und mechanisch induzierten Strukturantwort auf die Brand- und mechanischen Lasten.

Die Anwendung einer Heißbemessung des Gesamttragwerks auf Grundlage des allgemeinen Rechenverfahrens und des hier beschriebenen DFEM/GFEM-Ansatzes ist aktuell auf den Stahlbau beschränkt. Andere Bauweisen (z.B. Massiv-, Verbund-, Holzbau) erfordern für die korrekte Modellierung des Materialverhaltens unter Brandbeanspruchung im DFEM-Bereich komplexe Materialmodelle, die nicht ohne Weiteres mit den Anforderungen der Eurocodes in Einklang zu bringen sind. Die Anwendung ist hier auf Einzelbauteile oder vereinfachte FE-Modelle begrenzt. Gebäude mit großen Raumvolumen und großen Ventilationsflächenanteilen sind tendenziell besser für einen Nachweis geeignet, der auf einer Heißbemessung basiert. Je kleiner das Raumvolumen bzw. die Ventilationsflächenanteile werden, desto höher sind die sich entwickelnden



Temperaturen im Brandfall. Diese entsprechen dann denen eines im Vollbrand befindlichen Raumes.

Anwendungsbeispiele im Neubau, Bestandsbau und im Denkmalschutz

Neubau

Die Anwendung der Heißbemessung im Neubau erlaubt im Planungsprozess der Tragwerksplanung paralleles Arbeiten, sodass die Hochtemperaturbeanspruchung des Tragwerks einen zusätzlichen Lastfall darstellt. Das bedeutet allerdings, dass die Heißbemessung frühzeitig in die Tragwerksplanung einbezogen werden sollte, um Einfluss auf die spätere Detail- und Anschlussplanung im Sinne eines robusten Verhaltens bei der Brandbeanspruchung nehmen zu können. Die Modellierung und Auslegung können so mit dem Tragwerksplaner abgestimmt und zudem Änderungen und Anpassungen aufgrund der fortschreitenden Planung berücksichtigt werden. Planungsänderungen, z.B. aus architektonischen Gründen, werden dann innerhalb des Projektes brandschutztechnisch bewertet. Am Ende des Planungsprozesses wird die Statik zusammen mit dem Bericht zur Heißbemessung den Genehmigungsunterlagen beigelegt und zur Prüfung eingereicht.

Ein Beispiel für ein komplexes und numerisch anspruchsvolles Projekt zeigt Abbildung 2: Hier konnte die Heißbemessung eines 50 m hohen Hochregallagers mithilfe des GFEM/DFEM-Verfahrens nachgewiesen werden. Das gesamte, bereits erläuterte Verfahren wurde innerhalb von drei Wochen durchgeführt.

Bestandsbau

Im Vergleich zu Neubauten oder modernen Bauten, welche unter Erhalt der Sichtbarkeit des Tragwerks umgenutzt werden sollen, treten bei (u.U. denkmalgeschützten) Bestandsgebäuden oftmals Detail-Fragestellungen auf, deren Lösungen über Erfolg oder Misserfolg der Umnutzung entscheiden. Hier kann durch eine genaue geometrische Abbildung der zu beurteilenden Position eine Vielzahl von denkbaren Maßnahmen untersucht werden – unter Berücksichtigung der Interessen aller Beteiligten. Komplexe geometrische Strukturen und der thermische Einfluss der unterschiedlichen Materialien (z.B. Dämmmaterial, Aufbeton, Estrich, sonstige Bekleidungs-materialien) werden im Berechnungsmodell unter Ansatz einer potenziellen positiven Dämmwirkung auf die Stahlbauteile berücksichtigt. Häufig sind Konstruktionsdetails ohne differenzierte Betrachtung in Bezug auf die vorliegende Feuerwiderstandsfähig-

keit schwierig einzuschätzen. Hier bietet sich eine Heißbemessung an, welche die komplexen baulichen Details berücksichtigt. Eine an das Bauteil im übergeordneten Brandschutzkonzept geforderte Feuerwiderstandsdauer, z.B. R 60, kann dann unter Einsatz der ETK nachgewiesen werden. Der erste Verfahrensschritt, die Brandsimulation zur Ermittlung der Naturbrandbeanspruchung, entfällt in diesem Fall. Vielfach kann bereits mit einer Brandbeanspruchung auf Grundlage nomineller Temperaturzeitkurven eine umfangreiche und schwierige bauliche Ertüchtigung vermieden werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 3 dargestellt: Während Sanierungsarbeiten an einem Bestandsgebäude wurde eine Stahlkonstruktion im Verbund mit einem Massivbautragwerk freigelegt. In Abstimmung mit dem Tragwerksplaner wurden zunächst die Tragwirkung, die wesentlichen Konstruktionselemente und die mechanische Beanspruchung dieser Elemente identifiziert. Anschließend wurden mögliche Maßnahmen definiert. Der Großteil der Konstruktion an der Deckenunterseite konnte unkompliziert mit einer Plattenbekleidung geschützt werden. Für die Deckenoberseite war dies aufgrund von Schrauben, die durch die Massivdecke gesteckt wurden, nicht möglich. Durch die Modellierung der Details, der Berücksichtigung der Einwirkungen aus der Trag- >>

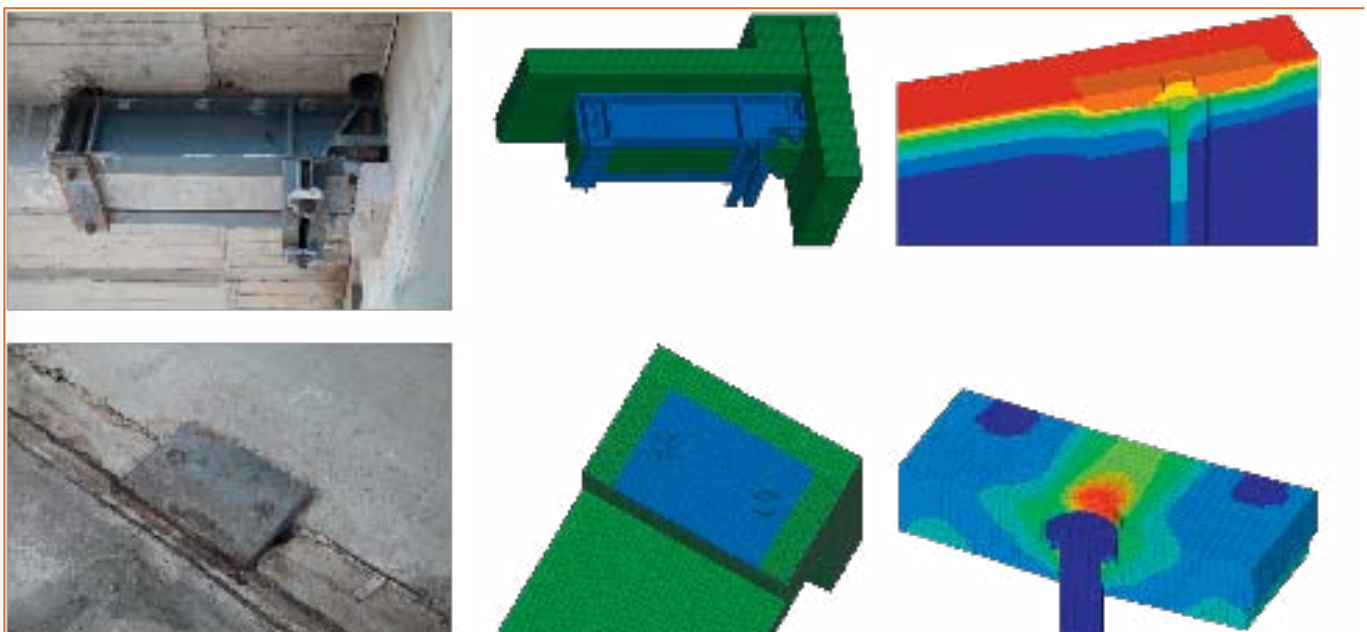


Abb. 3: Thermische und mechanische Simulation einer Stahlkonsole an einer Massivbaudecke

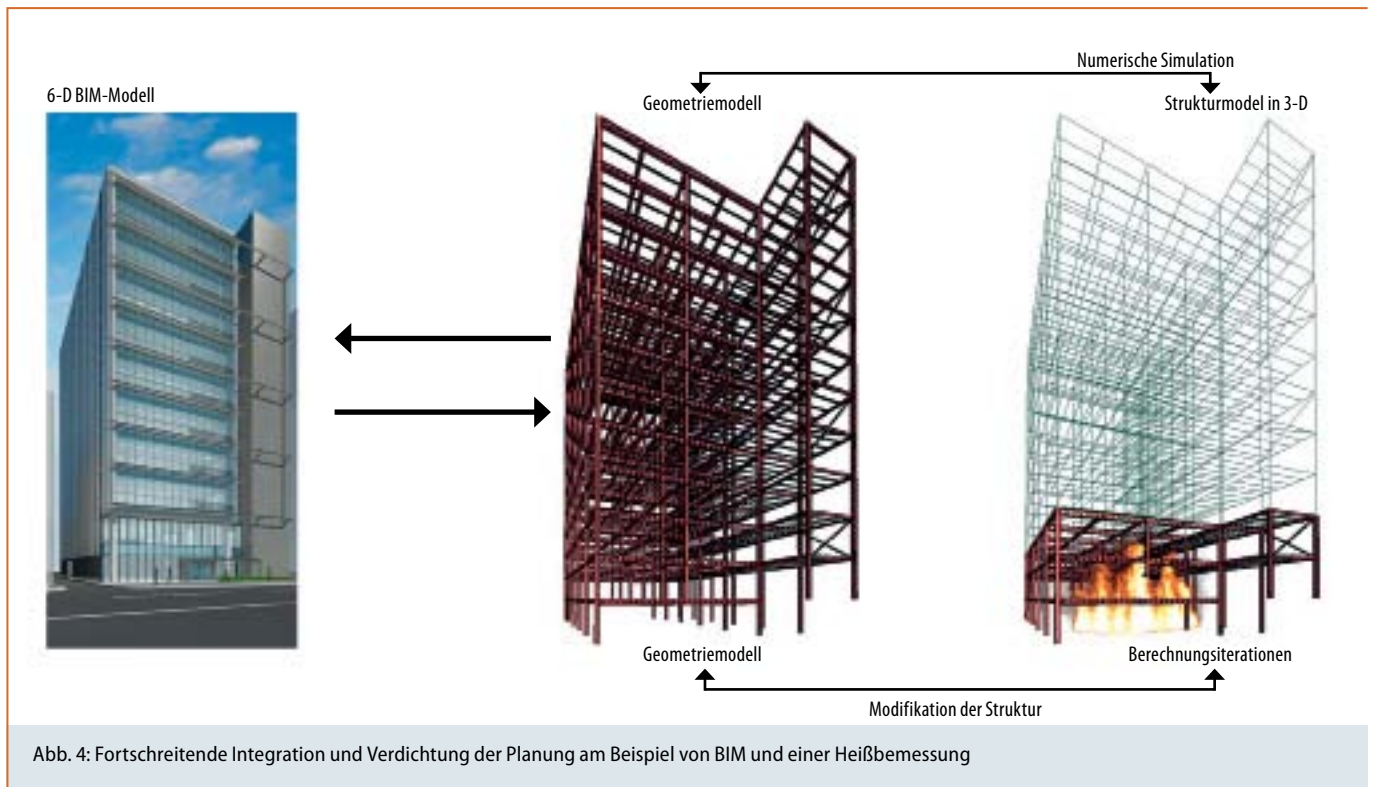


Abb. 4: Fortschreitende Integration und Verdichtung der Planung am Beispiel von BIM und einer Heißbemessung

werksplanung und der detaillierten Auflösung der maßgebenden Konstruktionselemente konnte für die Konstruktion eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten nachgewiesen werden.

Denkmalschutz

Grundsätzlich ist das in diesem Beitrag beschriebene Verfahren auch für Gebäude anwendbar, die stark denkmalgeschützt sind. Aktuell arbeiten die Autoren an dem Nachweis einer denkmalgeschützten Maschinenhalle, deren Stahltragwerk nicht baulich verändert werden soll. Hier werden zusätzliche Materialuntersuchungen durchgeführt, um das Hochtemperaturverhalten des historischen Stahls adäquat modellieren zu können. Im Ergebnis können in Kombination mit einer dezenten Anlagentechnik gezielte Maßnahmen vorgeschlagen werden, die das historische Tragwerk möglichst intakt lassen und neben Denkmalschutzaspekten die Anforderungen des Brandschutzes würdigen.

Ein weiteres Beispiel für eine effektive Anwendung der Heißbemessung ist ein aktuell in Bearbeitung befindliches Bestandsgebäude, dessen Fassade erhal-

ten bleiben soll. Hier wird durch gezielte Bekleidung einzelner tragender Elemente in Kombination mit einer Heißbemessung eine Kompletterneuerung mit hohen Kosten vermieden.

Fazit und Ausblick

Eine Heißbemessung nach allgemeinen Rechenverfahren mit den Eurocodes als Basis bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten, um eine intelligente und bedarfsgerechte Auslegung von Stahltragwerken für Neubauten, Bestandsgebäude und denkmalgeschützte Gebäude durchzuführen. Die Einführung der Eurocodes über die Liste der TB hat dabei zu einer weitgehenden Akzeptanz solcher Nachweise, die auf klaren Definitionen und Randbedingungen basieren, geführt. Nichtsdestotrotz sind die Anwendungsgrenzen einer Heißbemessung zu beachten: Nicht jede bauliche Situation kann mithilfe von Berechnungsmethoden nachgewiesen werden. Wie am Beispiel der Stahlkonsolen gezeigt, ergänzen sich in vielen Fällen klassische Maßnahmen – wie der Ansatz einer Plattenbekleidung – und rechnerische Nachweise, sodass sie gemeinsam zu der für den Bauherrn wirtschaftlich-

ten Lösung führen. Dies gilt sowohl für Detailnachweise als auch für vollständige Tragwerksuntersuchungen kompletter Gebäude.

Aktuelle Entwicklungen wie das *Building Information Modelling* (BIM) führen dazu, dass der Modellierungsaufwand für die numerischen Simulationsmodelle (sowohl Brandsimulation als auch Tragwerksberechnung) stetig sinkt (s. Abbildung 4). Weit über die dreidimensionale Planung und Kollisionsprüfung hinausgehende Möglichkeiten von BIM sind z.B. die umfangreiche Definition von Attributen. Dies würde eine bereits im BIM-Modell festgelegte Definition der thermischen und mechanischen Materialeigenschaften der Tragwerksbestandteile erlauben.

Die Planung auf Grundlage von BIM-Modellen ist bei vielen Großprojekten bereits Standard. Eine noch effizientere Nutzung der Brandsimulation bzw. Heißbemessung scheitert aktuell an den vorhandenen Möglichkeiten der spezialisierten Schnittstellen, welche den robusten und fehlerfreien Import noch verhindern. Auch abseits des Brandschutzes im Sinne der Anforderungen der Landesbauordnungen (LBOs) bietet eine Heißbemessung



weitergehende Möglichkeiten. So ist eine Quantifizierung von Schadenausmaßen auf Grundlage einer Heißbemessung möglich. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine fehlende oder unzureichende Brandabschnittsbildung für einen Industriebau. Die Ergebnisse können dann für

die Risikobeurteilung in den Modellen von Sachwertversicherern herangezogen werden. Mit dem Fortschritt im Bereich der numerischen Modellierung komplexer Materialien und der Abbildung von Konstruktionsdetails – z.B. eines Massivbaudetails mit komplexer Bewehrungs-

führung – wird die Modellierung kompletter, brandbeanspruchter Tragwerke in Massivbauweise möglich. Aktuell ist dies mit Blick auf die Anforderungen der Praxis in Bezug auf die Robustheit solcher Modelle nur für Einzelbauteile und Detailpositionen möglich. ■

LITERATUR

- [1] DIN EN 1991-1-2:2010-12 „Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Brandeinwirkungen auf Tragwerke“
- [2] DIN EN 1993-1-2:2010-12 „Eurocode 3 – Planung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“
- [3] DIN EN 1991-1-2:2010-12/NA „Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter. Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Einwirkungen auf
- Tragwerke – Brandeinwirkungen auf Tragwerke“
- [4] DIN EN 1993-1-2:2010-12/NA „Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter. Eurocode 3 – Planung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall“
- [5] Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB), Fassung 2017/1 vom 31.08.2017, Amtliche Mitteilungen, Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
- [6] Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht TB 04-01, vfdb, Hosser, D. (Hrsg.), 2013
- [7] Geburting, G., Ausreichend (lange) geschützt?, FeuerTRUTZ Magazin 5.2017



Autoren

Dipl.-Ing. Matthias Stamm
Teamleiter numerische Methoden Strukturmechanik, Geschäftsbereich Brandschutz und Ingenieurmethoden, Gruner AG, Basel



Dr.-Ing. Matthias Siemon
Abteilungsleiter Brandschutz, Geschäftsbereich Brandschutz und Ingenieurmethoden, Gruner AG, Basel