

Temperaturen in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen im Brandfall – Versuch und Simulation

Neben tabellarischen und vereinfachten Nachweismethoden kommen bei der brandschutztechnischen Bemessung auch zunehmend allgemeine Rechenverfahren zum Einsatz. Letztere zeichnen sich durch eine große Flexibilität der untersuchten Bauteile aus und ermöglichen eine wirklichkeitsnahe Berechnung brandbeanspruchter Tragwerke. Sie stellen deshalb eine Alternative zu kostenintensiven Brandversuchen dar. Die Berechnungen erfolgen i. d. R. mithilfe einer Finite-Elemente-Software als thermische oder mechanische Simulationen. Mit thermischen Simulationen können Bauteiltemperaturen unter Brandbeanspruchung für beliebige Querschnitte bestimmt werden. Die berechneten Temperaturen werden in hohem Maße von den zugrunde gelegten temperaturabhängigen Materialeigenschaften beeinflusst. Für Konstruktionen aus Beton und Holz stellen Eurocode 2 Teil 1-2 und Eurocode 5 Teil 1-2 thermische Materialmodelle zur Verfügung. Diese stellen für die jeweilige Bauweise den Stand der Technik dar. In diesem Beitrag wird untersucht, ob mit den thermischen Materialmodellen der Eurocodes auch Temperaturen in Verbundkonstruktionen aus Brettsperrholz und Beton realitätsnah abgebildet werden können. Dazu werden berechnete Bauteiltemperaturen mit Temperaturen aus experimentellen Untersuchungen verglichen. Neben materiellen Eingabeparametern können softwarespezifische Eingaben die Berechnungen beeinflussen. Hierzu wurde der Einfluss des numerischen Modells und der Simulationsrandbedingungen untersucht.

Stichworte Brandschutz; Holz-Beton-Verbund; thermische Materialkennwerte; thermische Simulation

1 Einleitung

Die brandschutztechnische Bemessung von Bauteilen entsprechend den Eurocodes kann mithilfe tabellarischer, vereinfachter oder allgemeiner Bemessungsverfahren erfolgen. Bemessungstabellen zeichnen sich durch eine schnelle und wenig komplexe Nachweisführung aus, erzielen i. d. R. allerdings die konservativsten Ergebnisse. Sie basieren auf Ergebnissen aus Feuerwiderstandsprüfungen unter Einwirkung der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) und sind entsprechend auch nur für vergleichbare Bauteile unter gleichen Bedingungen gültig. Vereinfachte Nachweisverfahren weisen Vereinfachungen, bspw. bei der Ermittlung der Bauteiltemperaturen, auf und ermöglichen auf diese Weise eine rechnerische Nachweisführung. Sie gelten für einzelne Bauteile in einem definierten Anwendungsbereich. Allgemeine Bemessungsverfahren hingegen ermöglichen die Ermittlung des tatsächlichen Trag- und Verformungsverhaltens beliebiger Bauteile oder Tragwerke im Brandfall. Sie sind weitaus komplexer und zeitaufwendiger

Temperatures in timber-concrete composite structures in case of fire – test and simulation

In addition to tabulated design data and simplified design methods, advanced design methods are increasingly being used in fire protection design. The latter enable a realistic calculation of structures in case of fire and are characterized by the flexibility of the calculated components. Therefore, they are seen as an alternative to costly fire tests. The calculations are usually carried out with finite element software as thermal or mechanical simulations. Thermal simulations are used to calculate the temperatures of any component or structure in case of fire. The calculated temperatures are highly influenced by the temperature-dependent material properties used. For concrete and timber structures, Eurocode 2-1-2 and Eurocode 5-1-2 provide thermal material models, which represent the state of the art for the respective construction method. This paper investigates whether they can also be used to realistically calculate the temperatures in composite structures of cross laminated timber and concrete. For this purpose, calculated temperatures are compared to temperatures of fire tests. Besides material input parameters, software-specific input parameters can influence the calculated temperatures. For this purpose, the influence of the numerical model and the boundary conditions of the simulation were investigated.

Keywords fire protection; thermal properties; thermal simulation; timber-concrete composite

und erfolgen i. d. R. mit Finite-Elemente-Software in Form numerischer Simulationen. Erfahrung mit der verwendeten Software und ein weitreichendes Verständnis des Hochtemperaturverhaltens der simulierten Baustoffe sind hierfür unabdingbar. Bei numerischen Simulationen ist zwischen mechanischen und thermischen Analysen zu unterscheiden. Thermische Analysen verfolgen das Ziel, die genauen Bauteiltemperaturen unter einer definierten Temperatureinwirkung nach beliebigen Branddauern vorherzusagen. Eine wesentliche Voraussetzung zur Durchführung thermischer Simulationen ist die Kenntnis der temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Rohdichte der untersuchten Baustoffe. Für Bauteile aus Beton und Nadelholz stellen EC2-1-2 [1] bzw. EC5-1-2 [2] thermische Materialmodelle zur Verfügung, die für thermische Simulationen herangezogen werden können. In diesem Beitrag wird untersucht, ob mit den Materialmodellen der beiden Eurocodes sowie mit dem des Entwurfs von EC2-1-2 aus dem Jahr 2021 [3] Bauteiltemperaturen von

Verbundkonstruktionen aus Beton und Holz in guter Genauigkeit abgebildet werden können. Dazu werden numerisch berechnete Bauteiltemperaturen mit Ergebnissen aus Brandversuchen verglichen.

In einem nächsten Schritt erfolgt eine Parameterstudie, um Einflüsse aus dem numerischen Modell und den zugrunde gelegten Simulationsrandbedingungen auf die berechneten Bauteiltemperaturen zu bestimmen.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die nachfolgend erläuterten Brandversuche erfolgten im Rahmen eines Forschungsprojekts an der RPTU Kaiserslautern. Ziel des Projekts ist die Entwicklung hybrider Wandfertigteile aus Brettsperrholz und Beton (Bild 1). Untersuchungsgegenstand waren Wandausschnitte aus Fichten-Brettsperrholz mit den Abmessungen 780 mm×1280 mm (L×B). Das fünfplagige Brettsperrholz wies eine regelmäßige Lamellenstärke von 20 mm und eine Gesamtdicke von 100 mm auf. Die Untersuchungen erfolgten an Probekörpern mit einseitig angebrachten Be-

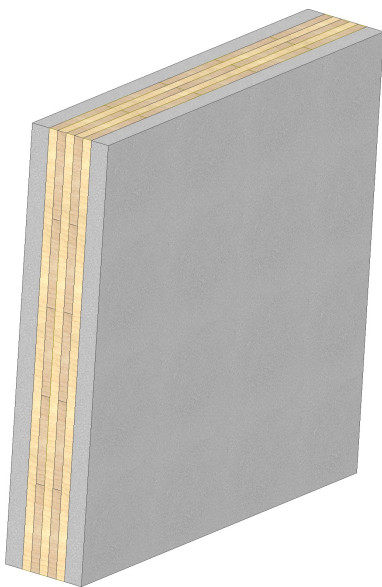


Bild 1 Visualisierung des im Forschungsvorhaben entwickelten Wandaufbaus
Visualisation of the wall developed in the research project

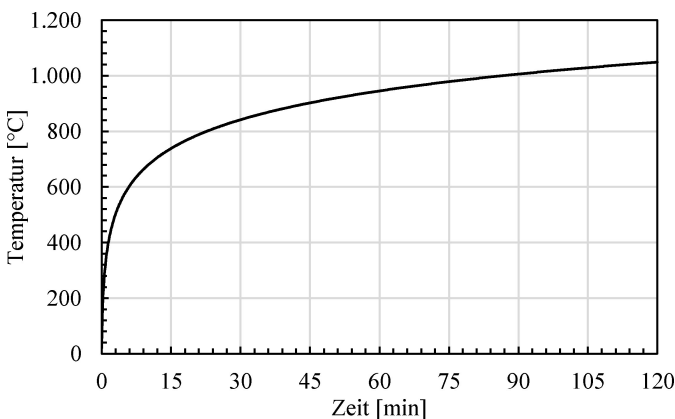


Bild 2 Einheitstemperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1 [6]
ISO standard fire curve acc. to DIN EN 1363-1 [6]

kleidungen aus Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen und einem Größtkorn von 16 mm ohne Zusatzmittel oder Zusatzstoffe in Bekleidungsstärken von 40 mm und 60 mm. Der Beton wies eine Druckfestigkeit von 28 N/mm² und eine Rohdichte von etwa 2200 kg/m³ auf. Mithilfe des Darrverfahrens nach DIN EN 13183-1 [4] wurde ein Feuchtegehalt des Brettsperrholzes von 11,4 % ermittelt. Der Feuchtegehalt des Betons betrug 2,7 % und wurde nach DIN EN ISO 12570 [5] bestimmt. Die Versuchsserie fand im Kombiprüfofen der RPTU Kaiserslautern statt und umfasste sechs Brandversuche unter 90- bis 120-minütiger Normbrandbeanspruchung durch die ETK nach DIN EN 1363-1 [6], dargestellt in Bild 2. Dabei wurde die Betonbekleidung der direkten Beflammung ausgesetzt. Der Holzquerschnitt wurde über die gesamte Versuchsdauer durch die Betonbekleidung vor einer direkten Brandbeanspruchung geschützt. Die Dokumentation der Temperaturentwicklung erfolgte mithilfe von Thermoelementen des Typs K. Anhand von Messstellen in der Grenzschicht zwischen Beton und Holz wurde der Verkohlungsbeginn bestimmt. Bild 3 zeigt schematisch die Positionierung der Messstellen. Die Ergebnisse der Temperaturmessung in der Grenzschicht zwischen Holz und Beton stellen gemittelte Werte über die Versuchsserie dar [7].

3 Numerische Analysen

3.1 Thermische Materialkennwerte

Allgemeine Berechnungsverfahren dürfen für Konstruktionen aus Stahlbeton nach den Vorgaben von DIN EN 1992-1-2 (EC2-1-2) [1] und für Konstruktionen aus Holz nach DIN EN 1995-1-2 (EC5-1-2) [2] Anwendung finden. Für thermische Simulationen werden im jeweiligen Eurocode effektive Materialkennwerte zur Verfügung gestellt, auf deren Grundlage die Bauteiltemperaturen unter Brandbeanspruchung berechnet werden können. Die vorgegebenen temperaturabhängigen Materialkennwerte Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und spezifische Wärmekapazität basieren auf Nachrechnungen experimenteller Untersuchungen und berücksichtigen implizit Effekte, die bei rein thermischen Analysen nicht abgebildet werden können. Dies sind bspw. die Rissbildung, die Pyrolyse von

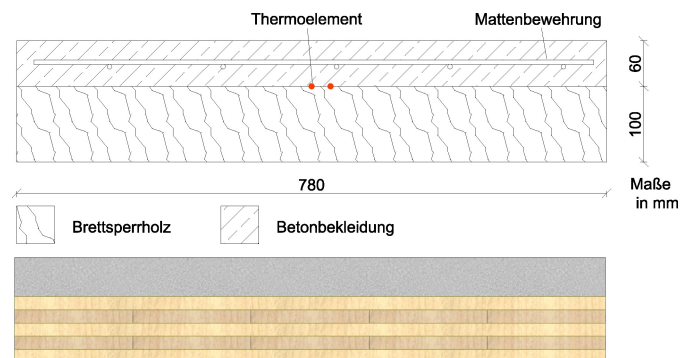


Bild 3 Querschnitt der Versuchskörper und schematische Darstellung der Temperaturmessstellen [7]
Cross-section of the test specimens and schematic illustration of the temperature measuring points [7]

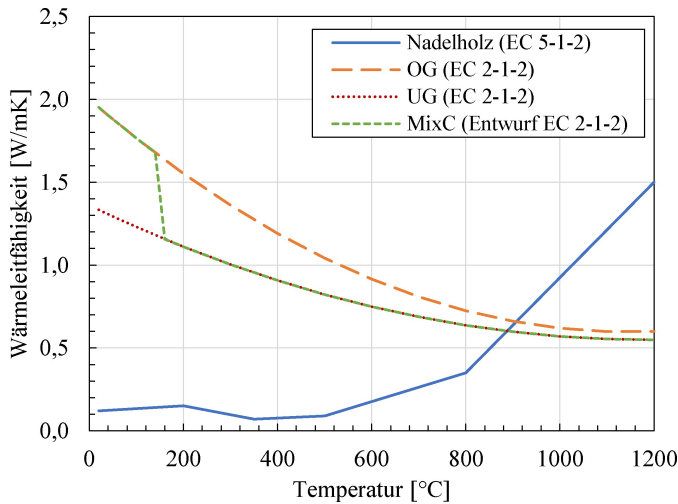


Bild 4 Wärmeleitfähigkeit von Nadelholz nach EC5-1-2 [2] und von Beton nach EC2-1-2 [1] und Entwurf von EC2-1-2 [3] in Abhängigkeit von der Temperatur
Thermal conductivity of softwood acc. to EC5-1-2 [2] and of concrete acc. to EC2-1-2 [1] and draft of EC2-1-2 [3] as a function of temperature

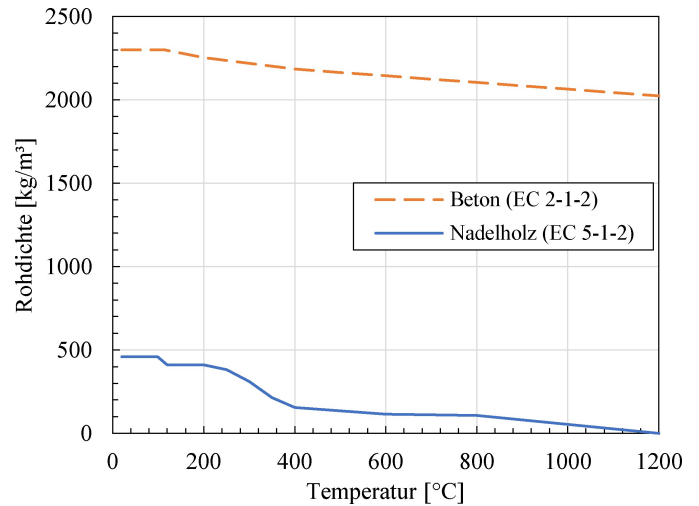


Bild 6 Rohdichte von Nadelholz nach EC5-1-2 [2] und von Beton nach EC2-1-2 [1] in Abhängigkeit von der Temperatur
Density of softwood acc. to EC5-1-2 [2] and of concrete acc. to EC2-1-2 [1] as a function of temperature

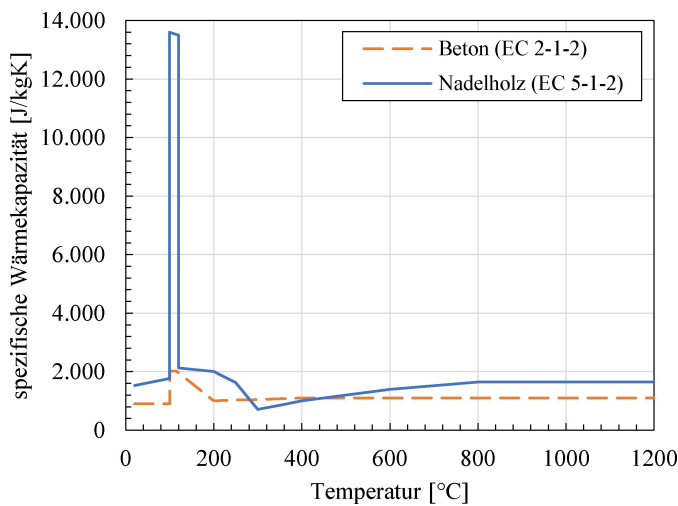


Bild 5 Spezifische Wärmekapazität von Nadelholz nach EC5-1-2 [2] und von Beton nach EC2-1-2 [1] in Abhängigkeit von der Temperatur
Specific heat capacity of softwood acc. to EC5-1-2 [2] and of concrete acc. to EC2-1-2 [1] as a function of temperature

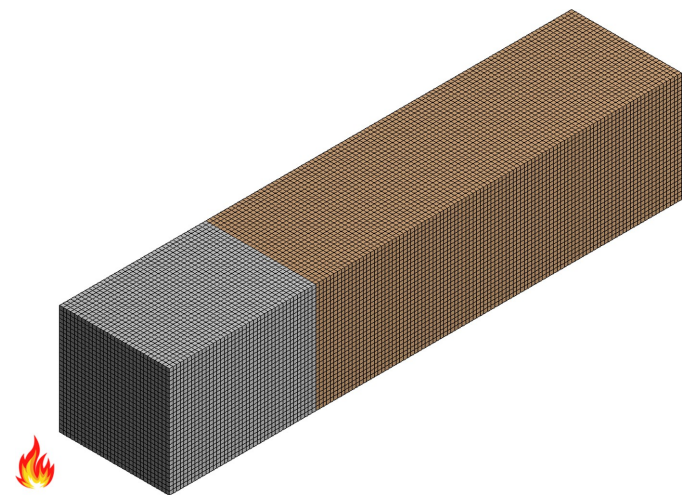


Bild 7 Simulationsmodell
Simulation model

Holz oder Wassertransportvorgänge im Bauteil. Die Materialkennwerte in den Eurocodes entsprechen daher nicht den tatsächlichen, messbaren Eigenschaften von Holz und Beton. Die Kalibrierung der Materialmodelle erfolgte anhand von Brandversuchen unter Normbrandbeanspruchung durch die ETK. Die Materialmodelle sind deshalb nicht ohne Weiteres für abweichende Brandeinwirkungen anwendbar. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen erfolgte aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge keine Ermittlung der temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe.

Die in diesem Beitrag verwendeten temperaturabhängigen Materialkennwerte von Holz und Beton sind in den Bildern 4–6 dargestellt. Für die Wärmeleitfähigkeit von Beton stellt EC2-1-2 [1] eine obere (OG) und eine untere Grenzwertfunktion (UG) zur Verfügung, zwischen denen die Wärmeleitfähigkeit festgelegt werden kann. Die konkrete

Regelung erfolgt im jeweiligen Nationalen Anhang. In Deutschland ist der obere Grenzwert anzusetzen. Im Entwurf von EC2-1-2 aus dem Jahr 2021 [3] werden die Grenzwerte durch eine neue Funktion ersetzt. Diese stellt eine Mischung der beiden Grenzwertfunktionen dar, weshalb diese auch als Mixed Curve (MixC) bezeichnet wird. Der Ansatz wurde am Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (CERIB) in Frankreich entwickelt und im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Technischen Universität Braunschweig validiert [8]. Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen wurden in [9] zusammengefasst. Der neue Ansatz soll eine realitätsgetreuere Abbildung der Bauteiltemperaturen im Brandfall ermöglichen. Die temperaturabhängigen Zusammenhänge der Rohdichte und der spezifischen Wärmekapazität blieben im Entwurf von EC2-1-2 aus 2021 [3] im Vergleich zur aktuell bauaufsichtlich eingeführten Fassung unverändert. Für die Simulationen wurden Feuchtegehalte von 3 % für den Betonquerschnitt und 12 % für das Nadelholz angenommen. Dies entsprach in guter Näherung den experimentellen Untersuchungen. Die Betonrohichte wurde

mit 2300 kg/m^3 und die Darrdichte von Nadelholz mit 410 kg/m^3 angenommen.

3.2 Verwendete Software und numerisches Modell

Die thermischen Simulationen in diesem Beitrag erfolgten mithilfe der kommerziellen Finite-Elemente-Software ANSYS 2020 R1. Das zur Durchführung der Untersuchungen angewendete numerische Modell ist in Bild 7 dargestellt. Das Modell wies Abmessungen von $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ auf. Die Dicke des Holzquerschnitts betrug 100 mm , die Dicke der Betonbekleidungen 40 mm bzw. 60 mm . Dies entspricht den experimentell untersuchten Größen. Die mittig innerhalb der Betonbekleidung angeordnete Betonstahlbewehrung wurde entsprechend den Vorgaben von EC2-1-2 [1] bei der Modellbildung nicht berücksichtigt.

Mit Ausnahme der Untersuchungen des Einflusses von Elementgröße wurden Hexaeder mit einer Kantenlänge von 1 mm zur Erstellung des numerischen Modells verwendet. Der Kontaktbereich zwischen Beton- und Holzquerschnitt wurde als Verbund ohne Wärmeverluste definiert. An den seitlichen Rändern des Modells wurden adiabate Bedingungen angenommen. Die thermische Einwirkung infolge Konvektion und Strahlung entspricht der ETK (Bild 3).

Alle Wärmeübergangsbedingungen und Emissivitäten wurden entsprechend den Vorgaben der Eurocodes berücksichtigt. Die konvektiven Wärmeübergänge wurden gemäß EC1-1-2 [10] auf der unbeflammten Seite mit $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ und auf der beflamten Seite mit $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen. Die Emissivität der Bauteiloberflächen betrug nach EC2-1-2 [1] $0,7$ für Beton und entsprechend EC5-1-2 [2] $0,8$ für das Holz. Die Umgebungs- und Bauteiltemperatur zu Beginn der Simulation wurde mit 20°C angenommen. Dies entspricht in hinreichender Genauigkeit den experimentellen Untersuchungen.

Die Berechnungen erfolgten mit einer softwaregesteuerten Zeitschrittsteuerung unter Angabe des anfänglichen minimalen und maximalen Zeitschritts. Der anfängliche Zeitschritt wurde mit $1,0 \text{ s}$, der minimale Zeitschritt mit $0,001 \text{ s}$ und der maximale Zeitschritt mit 60 s angenommen. Innerhalb der vorgegebenen Zeitschrittgrenzen wählt die Software die Zeitschritte zur Berechnung selbst, um eine konvergente Lösung bestimmen zu können.

4 Vergleich von berechneten und gemessenen Bauteiltemperaturen

In diesem Abschnitt werden die experimentell ermittelten Bauteiltemperaturen mit denen aus den numerischen Simulationen verglichen. Der Fokus liegt hierbei auf der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht zwischen dem Beton- und Holzquerschnitt sowie dem Abbrandbeginn der Holzkonstruktion, welcher entsprechend

EC5-1-2 [2] mit 300°C angenommen wird. Die Kenntnis des Beginns der Verkohlungs ist für die Bauteildimensionierung, insbesondere die Ermittlung des Restquerschnitts und daraus folgend der Tragfähigkeit im Brandfall von großer Wichtigkeit. Bild 8 stellt den Temperaturverlauf in der Grenzschicht über die Dauer der Brandbeanspruchung für beide untersuchten Betondicken dar. Die experimentell und numerisch bestimmten Zeitpunkte des Abbrandbeginns sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Unter Ansatz des in Deutschland anzuwendenden oberen Grenzwerts werden die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht und der Verkohlungsbeginn auf der sicheren Seite liegend berechnet, allerdings werden die tatsächlichen Bauteiltemperaturen zum Teil stark überschätzt. Der berechnete Verkohlungsbeginn liegt für beide Betondicken deutlich unterhalb der Messwerte. Die Berechnungen mit dem unteren Grenzwert liegen für beide untersuchten Betondicken über die gesamte Dauer der Brandbeanspruchung unterhalb der experimentell berechneten Temperaturen und stellen somit keine konservative Näherung für die untersuchten Verbundkonstruktionen dar. Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die Temperaturen in der Grenzschicht mit dem Ansatz der Mixed Curve zwar mit der besten Genauigkeit abgebildet werden, die Ergebnisse jedoch zum großen Teil unterhalb der Versuchstemperaturen liegen. Der berechnete Verkohlungsbeginn für eine Betondicke von 60 mm wird mit $68,6 \text{ min}$ im Vergleich zum mittleren Verkohlungsbeginn von $64,6 \text{ min}$ aus den Versuchen um etwa 4 min unterschätzt. Für eine Betondicke von 40 mm weist der be-

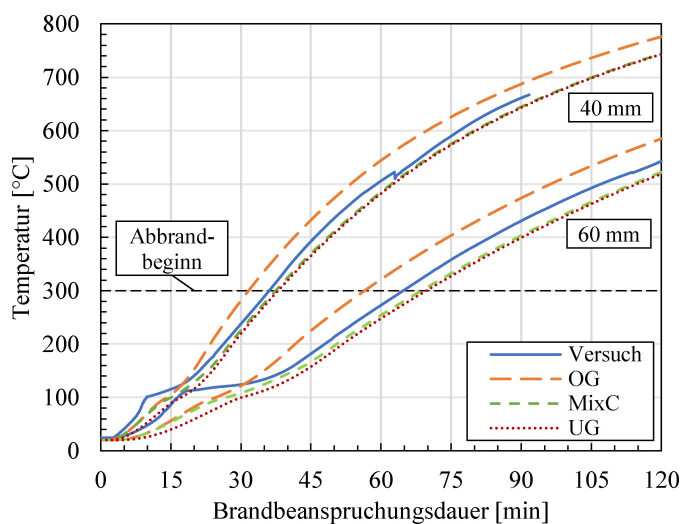


Bild 8 Temperaturentwicklung in der Grenzschicht aus Versuchen und Simulationen
Temperature development in the boundary layer from experiments and simulations

Tab. 1 Abbrandbeginn [min] aus Versuchen und Simulationen
Start of combustion [min] from experiment and simulations

| Betondicke | Versuche | OG | UG | MixC |
|------------|----------|------|------|------|
| 40 mm | 36,0 | 31,6 | 38,0 | 37,4 |
| 60 mm | 64,6 | 56,5 | 69,7 | 68,6 |

PLEASE NOTE: This file is for archiving purposes only. Please do not share this file with others than the authors of this paper.

Tab. 2 Untersuchte Element- und Zeitschrittgrößen
Investigated sizes of elements and time steps

| Parameter | Untersuchte Größen |
|------------------|---|
| Elementgröße | 1, 3, 5, 10, 20 mm (automatische Zeitschritte: min. 1×10^{-3} s, max. 60 s, Start 1 s) |
| Zeitschrittgröße | automatische Zeitschritte: min. 1×10^{-3} s, Start 1 s, max. 30, 60, 120, 240 s (Elementgröße: 1 mm) |

rechnete Verkohlungsbeginn mit 37,4 min eine gute Übereinstimmung mit dem Versuchswert von 36,1 min auf, stellt jedoch ebenfalls keine konservative Näherung dar.

Mithilfe der Simulationen unter Ansatz der Grenzwerte nach dem aktuell gültigen EC2-1-2 [1] konnte ein Temperaturbereich ermittelt werden, der durch die thermischen Materialeigenschaften abgedeckt werden kann (Bild 8). Die gemessenen Bauteiltemperaturen in der Grenzschicht liegen für beide untersuchten Betondicken innerhalb dieses Bereichs. Mithilfe leichter Anpassungen der Materialeigenschaften ist anzunehmen, dass der Verkohlungsbeginn der Verbundkonstruktion mit guter Genauigkeit berechnet werden kann. Im Entwurf von EC2-1-2 von 2021 [3] wird mit der Mixed Curve ein definierter Zusammenhang für die Wärmeleitfähigkeit von Beton vorgegeben. Die Berechnungen mit dem neuen Ansatz resultieren in Bauteiltemperaturen, die innerhalb des zuvor beschriebenen Temperaturbereichs durch die Grenzwerte nach aktuell gültigem EC2-1-2 [1] liegen. Verglichen mit dem bisher in Deutschland anzuwendenden Ansatz des oberen Grenzwerts liegen berechnete Bauteiltemperaturen nach dem neuen Ansatz in allen Fällen unterhalb dieser. Die Verwendung abweichender thermischer Materialeigenschaften ist nach dem Entwurf von EC2-1-2 (2021) [3] weiterhin möglich, insofern diese durch experimentelle Untersuchungen abgesichert sind. Tatsächlich ist zu erwarten, dass diese Vorgehensweise eher in Ausnahmefällen Anwendung findet und die Berechnung mithilfe der vorgegebenen Materialkennwerte die Regel darstellen wird. Die Berechnungen unter Ansatz des neuen Materialmodells führten zur genauesten Abbildung der Messwerte, stellen aber nicht in allen Fällen eine konservative Näherung der tatsächlichen Bauteiltemperaturen dar. Um in der Praxis auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse für die Verbundkonstruktionen generieren zu können, sind deshalb weiterführende Untersuchungen durchzuführen.

5 Parameterstudie

5.1 Untersuchte Parameter

Neben den thermischen Materialmodellen, Wärmeübergangsbedingungen und den Emissivitäten der Bauteiloberflächen können Eingabeparameter aus der numerischen Analyse die berechneten Bauteiltemperaturen beeinflussen. Mithilfe einer Parameterstudie wurden die Einflüsse aus der Größe der finiten Elemente und der Größe der Berechnungszeitschritte analysiert. Das numerische Modell und die weiteren Simulationsrandbedin-

gungen blieben unverändert. Als thermisches Materialmodell für den Betonquerschnitt wurde das Modell aus dem Entwurf von EC2-1-2 aus 2021 [3] (Mixed Curve) angesetzt. Für das Holz wurden die Vorgaben aus EC5-1-2 [2] angewendet.

Die Untersuchungen wurden für eine Dicke des Betonquerschnitts von 40 mm ausgewertet, da für eine geringere Dicke ein größerer Einfluss der Elementgröße erwartet wurde. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte anhand der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht sowie anhand der Temperaturen im Holzquerschnitt. Auch der Rechenaufwand und die Größe der Ergebnisdateien fanden Berücksichtigung. Tab. 2 stellt die untersuchten Parameter zusammenfassend dar.

5.2 Elementgröße und Elementform

In Hinblick auf das numerische Modell ist die Wahl der Größe und Form der finiten Elemente von Bedeutung. In diesem Abschnitt wird untersucht, wie sich die Größe der modellierten Elemente auf die ermittelten Temperaturen auswirkt. Es wurden Hexaeder und Tetraeder mit Kantenlängen von 1, 3, 5, 10 und 20 mm (Tab. 2) untersucht. War aufgrund der Modellgeometrie eine Unterteilung in die gewählte Elementgröße nicht exakt abbildbar, erfolgte durch die Software eine Unterteilung des Modellbereichs in geringfügig kleinere Elemente mit regelmäßiger Kantenlänge.

Bild 9 stellt die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht über die Dauer der Brandbeanspruchung für verschiedene Elementgrößen dar. Für Elementgrößen bis 10 mm sind nur geringfügige Unterschiede erkennbar. Bei einer Elementgröße von 20 mm treten insbesondere bei Temperaturen ab 600°C Differenzen von mehr als 20°C verglichen mit 1 mm großen Elementen auf. Es ist anzunehmen, dass die Differenz mit steigender Elementgröße zunimmt. Innerhalb des Holzquerschnitts konnte ein deutlich größerer Einfluss der Elementgröße auf die Temperaturentwicklung festgestellt werden. Bild 10 stellt exemplarisch die Temperaturentwicklung im Holz über die Dauer der Brandbeanspruchung dar. Die betrachtete Messstelle befand sich bei einer Tiefe von 16 mm hinter der Grenzschicht. Wies das Modell aufgrund der gewählten Elementgröße an dieser Stelle keine Elementknoten auf, erfolgte die Temperaturermittlung softwaregesteuert als Interpolation zwischen vorhandenen Knotenpunkten. Es ist zu erkennen, dass berechnete Temperaturen mit Elementgrößen von 10 mm oder 20 mm stark von denen mit kleineren Elementen differieren. Es wurden maxima-

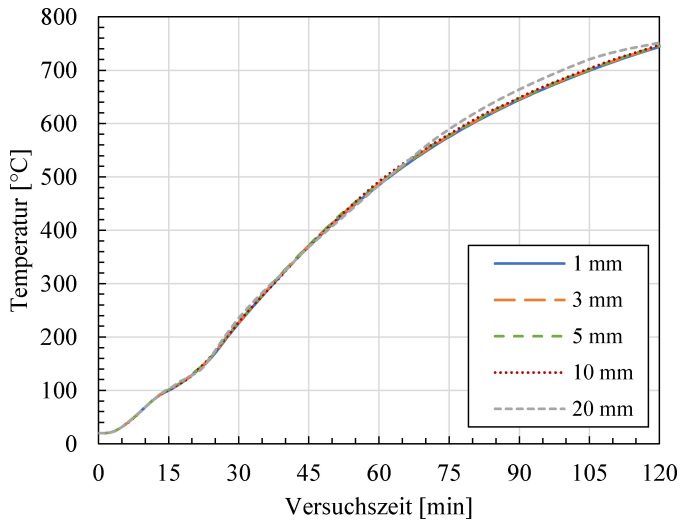


Bild 9 Einfluss der Elementgröße auf die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht
Influence of the element size on the temperature development in the boundary layer

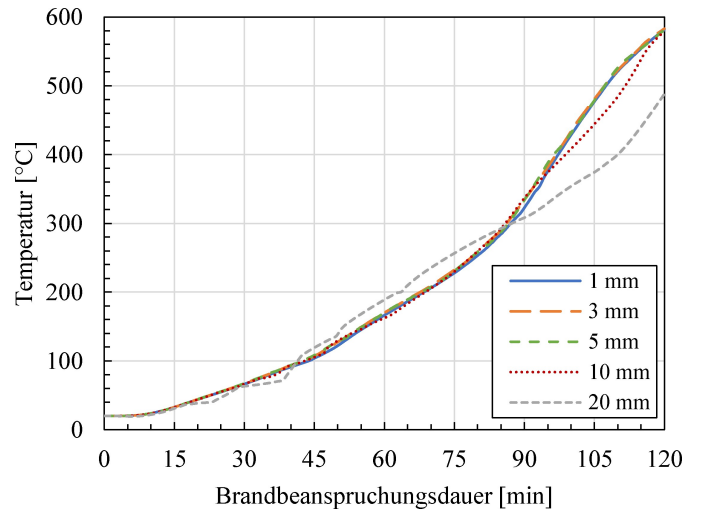


Bild 10 Einfluss der Elementgröße auf die Temperaturentwicklung in einer Tiefe von 16 mm im Holzquerschnitt
Influence of the element size on the temperature development at a depth of 16 mm in the timber cross-section

le Temperaturdifferenzen von mehr als 90 °C festgestellt. Bei Elementen mit Kantenlängen von 5 mm oder weniger nehmen die Differenzen stark ab. Übereinstimmend mit Untersuchungen in [11] wird für die Modellierung des Holzquerschnitts eine Elementgröße von 3 mm als ausreichend erachtet. Geringe Elementgrößen führen zu einer deutlichen Zunahme des Rechenaufwands und der Größe der Ergebnisdateien. Für die betrachteten Verbundkonstruktionen wird empfohlen, vereinfachend mit gleichen Elementgrößen für Holz- und Betonquerschnitt zu rechnen. Für thermische Simulationen an Stahlbetonquerschnitten können auch größere Elemente Anwendung finden.

Die Modellierung mit Tetraedern anstelle von Hexaedern zeigte einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die berechneten Ergebnisse. Es konnte allerdings ein starker Einfluss auf die Rechenzeit und die Größe der Ergebnisdateien festgestellt werden. In Simulationen mit einer Kantenlänge von 1 mm betrug die Erhöhung der Rechenzeit 337 % und die Erhöhung der Dateigrößen 579 %.

5.3 Zeitschritte

Die Größe der Zeitschritte, die die Software zur Berechnung verwendet, kann definiert werden. In vielen Fällen wird eine programmgesteuerte Wahl der Zeitschrittgrößen angewendet. Hierbei gibt der Anwender die Größe des anfänglichen minimalen und maximalen Zeitschritts vor und die Software wählt die Zeitschritte so, dass eine konvergente Lösung berechnet werden kann. Alternativ dazu kann auch mit fest definierten Zeitschrittgrößen gearbeitet werden, wobei die Berechnungen v. a. bei Materialien mit starken Veränderungen in den thermischen Materialkennwerten, wie bei der spezifischen Wärmekapazität von Holz, teils zu keinen konvergenten Lösungen führen [12]. Aus diesem Grund erfolgten die Untersuchungen mit der programmgesteuerten Zeitschrittsteuerung.

Fest definierte Zeitschrittgrößen fanden keine Betrachtung. Der anfängliche Zeitschritt wurde mit 1,0 s und der minimale Zeitschritt mit 0,001 s angenommen. Für den maximalen Zeitschritt wurden Schritte von 30, 60, 120 und 240 s untersucht (Tab. 2).

Anhand der Temperaturentwicklung in der Grenzschicht, dargestellt in Bild 11, ist zu erkennen, dass die Wahl des maximalen Zeitschritts die berechneten Ergebnisse nur in geringem Maße beeinflusst. Wenngleich der Einfluss des maximalen Zeitschritts gering ist, zeigten die Simulationen, dass die Temperaturen im Holzquerschnitt etwa in einem Bereich von 100 °C bis 400 °C für größere Zeitschritte leicht höher liegen. Aus diesem Grund wurde die Temperaturentwicklung an einem Messpunkt innerhalb des Holzquerschnitts ausgewertet (Bild 12). Der Messpunkt befindet sich 28,5 mm tief im Holzquerschnitt. Es ist zu erkennen, dass größere Zeitschritte in höheren Bauteiltemperaturen resultieren. Nach einer Beanspruchungsdauer von 120 min beträgt die Temperaturdifferenz zwischen den Zeitschrittgrößen von 30 s und 240 s etwa 9 °C. Die Berechnungen mit Zeitschritten von 60 s und 120 s liegen dazwischen. Es ist anzunehmen, dass Zeitschritte oberhalb des untersuchten Bereichs zu einer weiteren Erhöhung der berechneten Temperaturen führen. Da der Unterschied zwischen 30- und 60-sekündigen Berechnungsschritten bereits gering ist, wird angenommen, dass kleinere Zeitschritte als 30 s zu keiner nennenswerten Veränderung bei den berechneten Temperaturen führen. Es wird empfohlen, in thermischen Simulationen mit einer maximalen Zeitschrittgröße von 60 s zu arbeiten. Für kleinere Zeitschritte nehmen der Rechenaufwand und die Größe von Ergebnisdateien zu, die berechneten Temperaturen verändern sich jedoch nur geringfügig. Auch maximale Zeitschrittgrößen von 120 s und 240 s können aus Sicht der Autoren angewendet werden, da dies zu konservativeren Ergebnissen führt.

PLEASE NOTE: This file is for archiving purposes only. Please do not share this file with others than the authors of this paper.

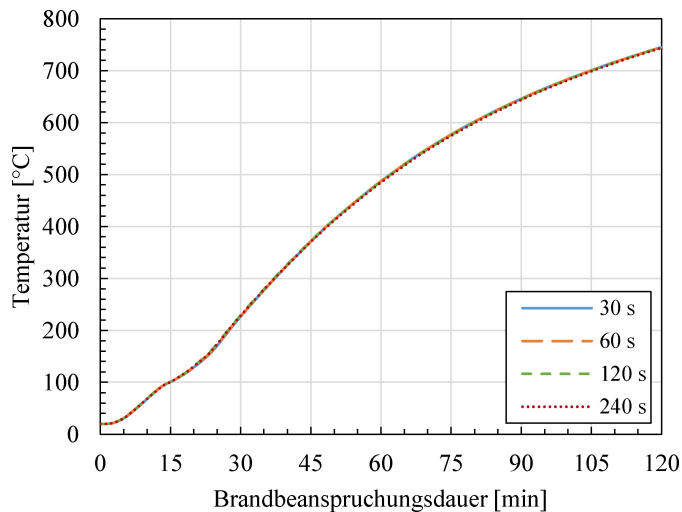


Bild 11 Einfluss der maximalen Zeitschrittgröße auf die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht
Influence of the maximum time step size on the temperature development in the boundary layer

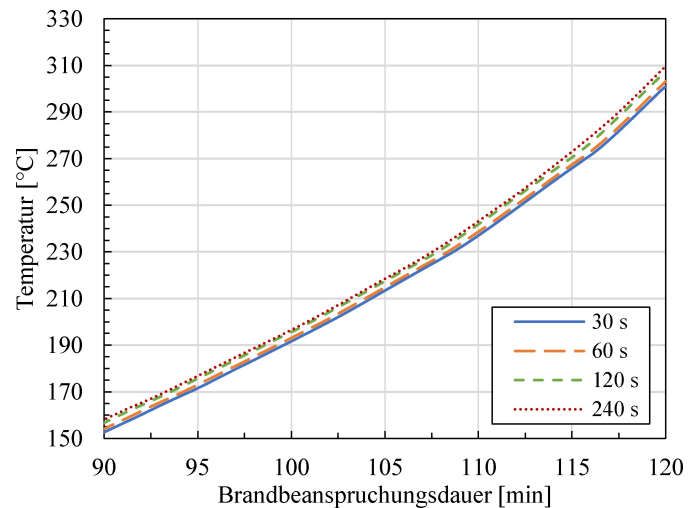


Bild 12 Einfluss der maximalen Zeitschrittgröße auf die Temperaturentwicklung in einer Tiefe von 28,5 mm im Holzquerschnitt
Influence of the maximum time step size on the temperature development at a depth of 28.5 mm inside of the timber cross-section

6 Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperaturentwicklung in der Grenzschicht und der Verkohlungsbeginn des Holzes mit den aktuell in Deutschland anzuwendenden Materialmodellen für Beton und Nadelholz auf der sicheren Seite liegend bestimmt werden können. Mithilfe des neuen Ansatzes der Wärmeleitfähigkeit von Beton können die Bauteiltemperaturen realitätsnäher abgebildet werden, liegen jedoch zum großen Teil auf der unsicheren Seite. Aufgrund der begrenzten experimentellen Daten-

grundlage sind aus Sicht der Autoren weiterführende Untersuchungen anzustreben, in denen weitere Ansätze für die thermischen Materialmodelle aus der Forschung, bspw. das Modell für Beton nach Achenbach [13] oder der Ansatz für Nadelholz nach Werther [12], berücksichtigt werden sollten.

Die Untersuchung der Eingabeparameter zeigte, dass die Bauteiltemperaturen im Beton weniger stark von den untersuchten Simulationsrandbedingungen beeinflusst werden als die Temperaturen innerhalb des Holzquerschnitts.

Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-2:2010-12 (2010) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2010.
- [2] DIN EN 1995-1-2:2010-12 (2010) *Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009. Berlin: Beuth. Ausgabe Dezember 2010.
- [3] DIN EN 1992-1-2:2021-09 (2021) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*; Deutsche und Englische Fassung prEN 1992-1-2:2021. Berlin: Beuth. Ausgabe September 2021.
- [4] DIN EN 13183-1:2002-07 (2002) *Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren*; Deutsche Fassung EN 13183-1:2002. Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 2002.
- [5] DIN EN ISO 12570:2018-07 (2018) *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur (ISO 12570:2000 + Amd 1:2013 + Amd 2:2018)*; Deutsche Fassung EN ISO 12570:2000 + A1:2013 + A2:2018. Berlin: Beuth. Ausgabe Juli 2018.
- [6] DIN EN 1363-1:2020-05 (2020) *Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*; Deutsche Fassung EN 1363-1:2020. Berlin: Beuth. Ausgabe Mai 2020.
- [7] Peifer, P.; Maas, M.; Thiele, C. (2021) *Versuchsberichte HBV 01 bis HBV 06*. Internes Dokument.
- [8] Zehfuß, J.; Spille, J. (2018) *Bewertung überarbeiteter Rechengrundlagen zur Wärmeleitfähigkeit im Zuge der Novellierung von EN 1992-1-2*. Stuttgart: Fraunhofer IRB.
- [9] Spille, J.; Zehfuß, J. (2019) *Neuer Ansatz der thermischen Leitfähigkeit von Beton für die Brandschutzbemessung in Eurocode 2*. Bautechnik 96, H. 6, S. 450–458. <https://doi.org/10.1002/bate.201900021>
- [10] DIN EN 1991-1-2:2021-10 (2021) *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke*; Deutsche und Englische Fassung prEN 1991-1-2:2021. Berlin: Beuth. Ausgabe Oktober 2021.
- [11] Werther, N. et al. (2012) *Parametric Study of Modelling Structural Timber in Fire with Different Software Packages* in: Fontana, M. et al. [eds.] *Structures in fire – SiF 2012: proceedings of the 7th International Conference on Structures in Fire*. Zurich, June 6–8, 2012. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich and EMPA Materials Science & Technology.
- [12] Werther, N. (2016) *Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren* [Dissertation]. Technische Universität München.

[13] Achenbach, M.; Lahmer, T.; Morgenthal, G. (2017) *Identification of the thermal properties of concrete for the temperature calculation of concrete slabs and columns subjected to a stan-*

dard fire – Methodology and proposal for simplified formulations. Fire Safety Journal 87, pp. 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.12.003>

Autor:innen

Philipp Peifer, M.Sc. (Korrespondenzautor:in)
philipp.peifer@rptu.de
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Fabian Brinnel, M.Sc.
brinnel@ibc-ing.de
IBC Ingenieurbau-Consult GmbH
Im Niedergarten 12
55124 Mainz

apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele
catherina.thiele@rptu.de
Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Dirk Lorenz
lorenz@ibc-ing.de
IBC Ingenieurbau-Consult GmbH
Im Niedergarten 12
55124 Mainz

Zitieren Sie diesen Beitrag

Peifer, P.; Brinnel, F.; Thiele, C.; Lorenz, D. (2023) *Temperaturen in Holz-Beton-Verbundkonstruktionen im Brandfall – Versuch und Simulation*. Bautechnik 100, H. 10, S. 617–624.
<https://doi.org/10.1002/bate.202300039>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 29. März 2023; angenommen: 03. Juli 2023.

PLEASE NOTE: This file is for archiving purposing only. Please do not share this file with others than the authors of this paper.