

Ein neues Verfahren zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität von Holzbalkendecken

Prof. Dr. Christoph Geyer
Bernere Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



Barbara Wehle
Bernere Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



Amabel Mélian Hernandez
Bernere Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



Ein neues Verfahren zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität von Holzbalkendecken

1. Einleitung

Leichtbauweisen wie der Holzbau weisen geringere Wärmespeicherfähigkeiten als Massivbauten aus mineralischen Baustoffen auf. Daher sind Vorbehalte gegenüber der Funktionsfähigkeit des sommerlichen Wärmeschutzes von Holzgebäuden bei Planern weit verbreitet.

Dem Holzbau wird daher unterstellt, dass aufgrund der geringeren wirksamen Wärmespeicherfähigkeit der sommerliche Wärmeschutz bei Büro- und Gewerbeimmobilien nicht oder nur mit hohem energetischem Aufwand funktioniert. Deshalb ist es wichtig, die wirksame Wärmespeicherfähigkeit von Holzkonstruktionen durch innovative Maßnahmen soweit zu verbessern, dass vergleichbare Werte wie bei Massivbauteilen erreicht werden. Im Rahmen eines Forschungsprojekts [1], gefördert durch den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des Bundesamts für Umwelt, wurde eine neuartige Berechnungsmethode für die Berechnung der dynamischen oder wirksamen Wärmekapazität entwickelt. Mit dieser Berechnungsmethode kann die wirksame Wärmekapazität von inhomogenen Bauteilen berechnet werden. So lässt sich z. B. eine deutliche Steigerung der wirksamen Wärmekapazität von Holzbauteilen durch Profilierungen nachweisen, was mit den bisherigen Rechenmethoden nicht möglich war.

2. Sommerlicher Wärmeschutz und wirksame Wärmekapazität

Die wirksame Wärmekapazität wird für die Einschätzung des Wärmespeichervermögens eines Raumes benötigt. Eine Erhöhung der wirksamen Wärmekapazität von Holzbauteilen führt zu einer Verbesserung der Wärmespeicherfähigkeit von Holzgebäuden.

Da Geschossdecken in der Regel Bauteile mit einer grossen Fläche sind und die Geschossuntersichten meist nicht verkleidet werden, konzentrieren sich die Untersuchungen auf die Erhöhung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit durch innovative Massnahmen an der Unterseite von Geschossdecken.

Das vorgestellte Verfahren kann aber auch auf andere Bauteile, wie zum Beispiel Wände, angewandt werden.

Für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität stehen bereits verschiedene Berechnungsverfahren zur Verfügung.

2.1. Berechnung der wirksamen Wärmekapazität

Gemäss SIA 180 [2] wird die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_R eines Bauteils als Produkt der Bauteilfläche A und der flächenbezogenen Wärmespeicherfähigkeit κ berechnet. Im Folgenden wird die flächenbezogene Wärmespeicherfähigkeit κ als wirksame Wärmekapazität bezeichnet.

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit wird nach dem Rechenverfahren der Norm EN ISO 13786 [3] bestimmt. Diese Methode kann aber nur für Bauteile mit ebenen und homogenen Schichten angewandt werden. Damit ist diese Methode bereits für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität von Holzrahmenbauelementen nur bedingt geeignet. Ebenso versagt das Rechenverfahren bei der Berechnung der wirksamen Wärmekapazität von inhomogenen Bauteilen, z. B. von Rippendecken oder von Bauteilen mit profilierten Oberflächen.

2.1.1. Berechnung nach EN ISO 13786

Die Norm EN ISO 13786 liefert ein analytisches Verfahren zur Berechnung der wirksamen Wärmekapazität für sinusförmige Temperaturrendbedingungen. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft an der einen Bauteilseite wird eine Sinusfunktion, welche um einen Mittelwert schwingt, angenommen.

Diese Temperaturschwankung durchdringt das Bauteil. Die Weiterleitung dieser Schwingung im Bauteil hängt von den wärmeschutztechnischen Grössen der einzelnen Bauteilschichten, von ihrer Wärmeleitfähigkeit und ihrer spezifischen Wärmekapazität, ab.

Die zeitabhängigen wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden in einer komplexen Matrix, Z_{ij} zusammengefasst. Diese Matrix beschreibt den Einfluss des Bauteils auf die durchlaufende Temperatur- und Wärmestromdichtewelle.

Die wirksame Wärmekapazität kann mit bestimmten Randbedingungen berechnet werden. Für Aussenbauteile, an denen raumseitig eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität κ auf der Raumseite

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} \quad \text{Formel 1}$$

Hierbei bezeichnet $\hat{\Theta}_i$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite des Bauteils und \hat{q}_i die Amplitude der Wärmestromdichte durch die Vorderseite.

Für Innenbauteile, die an beiden Oberflächen einer Temperaturschwankung der Raumluft ausgesetzt sind, ergibt sich die wirksame Wärmekapazität der beiden Oberflächen ebenfalls nach Formel 1.

Dieses analytische Verfahren kann in begrenztem Umfang auch für inhomogene Bauteile erweitert werden, indem diese Bauteile analog zum Verfahren der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengesetzter Bauteile nach EN ISO 6946 [4] in Bereiche mit homogenem Aufbau zerlegt werden.

Für jeden homogenen Bereich wird die wirksame Wärmekapazität separat berechnet. Die wirksame Wärmekapazität des zusammengesetzten Bauteils ergibt sich dann als flächengewichteter Mittelwert zu

$$\kappa = f_a \cdot \kappa_a + f_b \cdot \kappa_b \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet f_a den Flächenanteil des ersten homogenen Bereichs, κ_a die wirksame Wärmekapazität des ersten homogenen Bereichs, f_b den Flächenanteil des zweiten homogenen Bereichs und κ_b die wirksame Wärmekapazität des zweiten homogenen Bereichs.

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität erfolgt für die beiden homogenen Bereiche mit dem Programm LESOSAI, Version 2016.0. Aus diesen beiden Werten wird die wirksame Wärmekapazität des zusammengesetzten Bauteils mit Formel 2 ermittelt.

Um aber die wirksame Wärmespeicherfähigkeit inhomogener Bauteile, wie z. B. Rippendecken, zu bestimmen, muss ein neues Berechnungsverfahren entwickelt werden.

Die Bestimmung der wirksamen Wärmekapazität dieser inhomogenen Bauteile erfolgt mit einem neuartigen Verfahren der Kombination von zwei- und dreidimensionalen Wärmebrückenprogrammen mit instationären, d. h. mit zeitabhängigen, sinusförmigen Temperaturrendbedingungen.

2.1.2. Berechnung mit dynamischen Wärmebrückenprogrammen

Aus Formel 1 folgt, dass die wirksame Wärmekapazität eines Bauteils aus dem Quotienten der Amplitude der Wärmestromdichte durch die Bauteiloberfläche und der Amplitude der Temperaturschwankung der am Bauteil angrenzenden Luft, dividiert durch die Kreisfrequenz der Temperaturschwankung, ausgedrückt werden kann. Bei konstanter Kreisfrequenz, die im Weiteren mit $\omega = 2\pi/24 \text{ h}$ angenommen wird, wird die wirksame Wärmekapazität umso grösser, je grösser die Amplitude der Wärmestromdichte bei einer bestimmten Amplitude der Temperaturschwankung ist.

Dieser Zusammenhang wird nun genutzt, um die wirksame Wärmekapazität zweidimensionaler Bauteile mit dem Wärmebrückenprogramm HEAT 2 [5] bzw. dreidimensionaler Bauteile mit ANSYS [6] zu berechnen.

Hierfür wird die zwei- oder dreidimensionale Bauteilgeometrie in den Wärmebrückenprogrammen modelliert. Als Randbedingung wird eine sinusförmige Temperaturschwankung der angrenzenden Luft mit einer Amplitude von 5 K und einer Periodendauer von 24 h mit einem Mittelwert von 20° C angesetzt.

Mit Hilfe des Wärmebrückenprogramms wird nun die zur Temperaturschwankung gehörende Schwankung der Wärmestromdichte durch die Oberfläche des Bauteils berechnet. Sodann wird für die Deckenober- und die Deckenunterseite die wirksame Wärmekapazität κ_{unten} und κ_{oben} als Quotient der Amplitude der Schwingung der Wärmestromdichte und der Amplitude der Temperaturschwankung nach Formel 1 berechnet.

2.1.3. Validierung des neuen Verfahrens

Um zu überprüfen, ob das Verfahren mit den Wärmebrückenprogrammen verlässliche Werte liefert, wird die wirksame Wärmekapazität für ein homogenes Bauteil zweimal berechnet: einmal mit dem Verfahren nach EN ISO 13768 und zum Zweiten mit einem Wärmebrückenprogramm mit dynamischen Temperaturrandbedingungen. Dann werden die berechneten Werte der wirksamen Wärmekapazität aus beiden Verfahren verglichen.

Da die im rechten Bild der Abbildung 1 dargestellte Brettstapeldecke als einzige Deckenkonstruktion ausschliesslich ebene, homogene Schichten aufweist, wird diese als Testaufbau verwendet.

Im linken Bild der Abbildung 1 ist der zeitliche Verlauf der Wärmestromdichte, der sich aus der Wärmebrückenberechnung ergibt, dargestellt. Als Amplitude der Temperaturschwankung wird $\hat{\theta} = 5 \text{ K}$ als Randbedingung angesetzt.

Es ergibt sich mit dem Wärmebrückenprogramm eine Amplitude der Wärmestromdichte von $\hat{q} = 28.3 \text{ W/m}^2$ für die Deckenoberseite (Unterlagsboden mit 70 mm dicker Zementestrichplatte) und von $\hat{q} = 10.7 \text{ W/m}^2$ für die Deckenunterseite (200 mm dicker Brettstapel). Damit berechnet sich die wirksame Wärmekapazität der Rohdecke ohne Unterdecke nach Formel 1 für die Deckenoberseite zu $\kappa_{\text{oben}} = 77.9 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ und für die Deckenunterseite zu $\kappa_{\text{unten}} = 29.4 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$.

Mit dem analytischen Verfahren nach EN ISO 13768 ergeben sich Werte von $\kappa_{\text{oben}} = 77.9 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ und von $\kappa_{\text{unten}} = 29.4 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$.

Damit führen beide Verfahren zu identischen Werten der wirksamen Wärmekapazität.

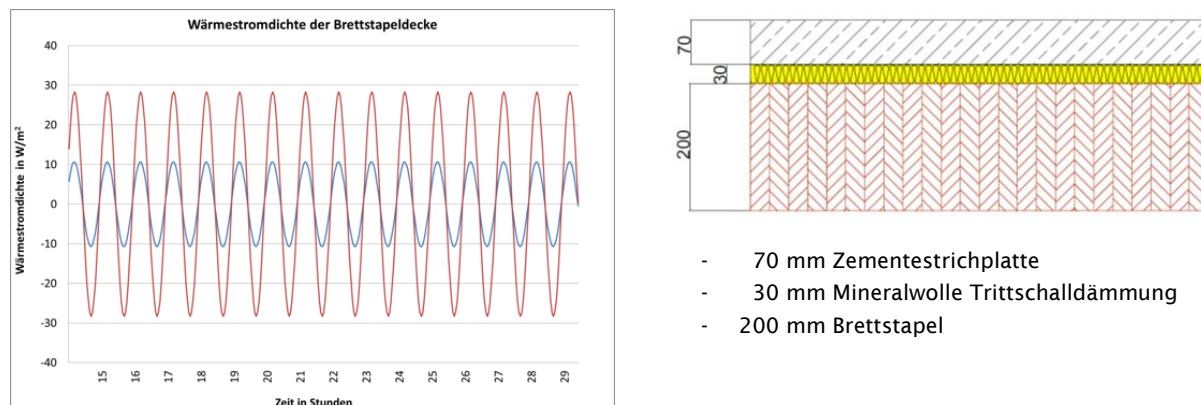


Abbildung 1: Linkes Bild: Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte der Deckenoberseite (rote Kurve) und der Deckenunterseite der Brettstapeldecke (blaue Kurve). Rechtes Bild: Prinzipskizze des Aufbaus der Brettstapeldecke

3. Optimierung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit

Die wirksame Wärmekapazität eines Holzbauteils kann durch folgende Massnahmen erhöht werden: durch die Verwendung von Laubholzarten mit höherer Rohdichte, wie Buche, durch eine optimale Orientierung des Holzes im Bauteil oder durch die Vergrößerung der Oberfläche durch Profilierung.

3.1. Einfluss verschiedener Holzarten und der Anisotropie des Holzes

Da jede Holzart andere Werte für die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmespeicherfähigkeit aufweist, ergeben sich bei der Verwendung anderer Holzarten andere wirksame Wärmekapazitäten für die Deckenkonstruktionen.

Es wird daher neben der Verwendung von Fichte auch Buche und Eiche für die Deckenkonstruktion untersucht.

Darüber hinaus wird auch der Einfluss der Anisotropie der Wärmeleitfähigkeiten von Holz, d. h. die unterschiedlichen Werte der Wärmeleitfähigkeit in den drei anatomischen Richtungen tangential, radial und longitudinal auf die wirksame Wärmekapazität analysiert.

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität zur Bestimmung des Einflusses der Holzarten auf die wirksame Wärmekapazität erfolgt wiederum für die Brettstapeldecke. Die Berechnungen werden mit der Software HEAT 2 durchgeführt.

Die Brettstapeldecke wird ohne abgehängte Decke analysiert. Aus statischen Gründen werden die Bretter in der Brettstapeldecke so eingebaut, dass die longitudinale Richtung des Holzes parallel zur Bauteiloberfläche steht.

Die beiden anderen Richtungen werden vereinfachend als radial in horizontaler Richtung und tangential in vertikaler Richtung angesetzt.

In der Tabelle 1 sind die Materialeigenschaften, die in der Berechnung angesetzt werden, für jede Holzart mit den Quellenangaben zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Wärmeleitfähigkeiten in tangentialer und in radialer Richtung nur geringfügig unterscheiden.

Tabelle 1: Wärmetechnischen Eigenschaften der Holzarten Fichte, Eiche und Buche.

Holzart	Rohdichte ρ in kg/m^3	Spezifische Kapazität C_p in $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Volumetrische Kapazität in $\text{MJ}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$		
				R	T	L
Fichte [7]	420	1510	0.63	0.09	0.07	0.22
Eiche [8]	640	1590	1.02	0.17	0.14	0.29
Buche [7]	720	2021	1.46	0.12	0.09	0.26

Der Einfluss verschiedener Holzarten auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wurde für die drei aufgeführten Holzarten für die Brettstapeldecke untersucht.

Hierfür wurde mit dem Programm HEAT 2 die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite einer Brettstapeldecke berechnet. Die wärmetechnischen Eigenschaften der Holzarten werden Tabelle 1, die Normwerte für die isotropen Wärmeleitfähigkeiten werden EN ISO 10456 [9] entnommen.

Berücksichtigt man die Anisotropie des Holzes, so führt dies zu einer Verringerung der wirksamen Wärmekapazität der Unterseite der Brettstapeldecke, verglichen mit der Brettstapeldecke mit isotropen Normwerten. Der Einbruch der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite fällt besonders bei Fichte ins Gewicht. Bei Buche ergibt sich auch eine Reduzierung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite. Allerdings fällt diese Verringerung geringer aus als bei Fichte. Der Grund für diese Abnahmen sind die geringeren Werte der Wärmeleitfähigkeit in transversaler und radialer Richtung, verglichen mit den Wärmeleitfähigkeiten nach EN ISO 10456.

Erwartungsgemäß ergeben sich die höchsten Werte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite bei der Verwendung der Holzsorte Eiche.

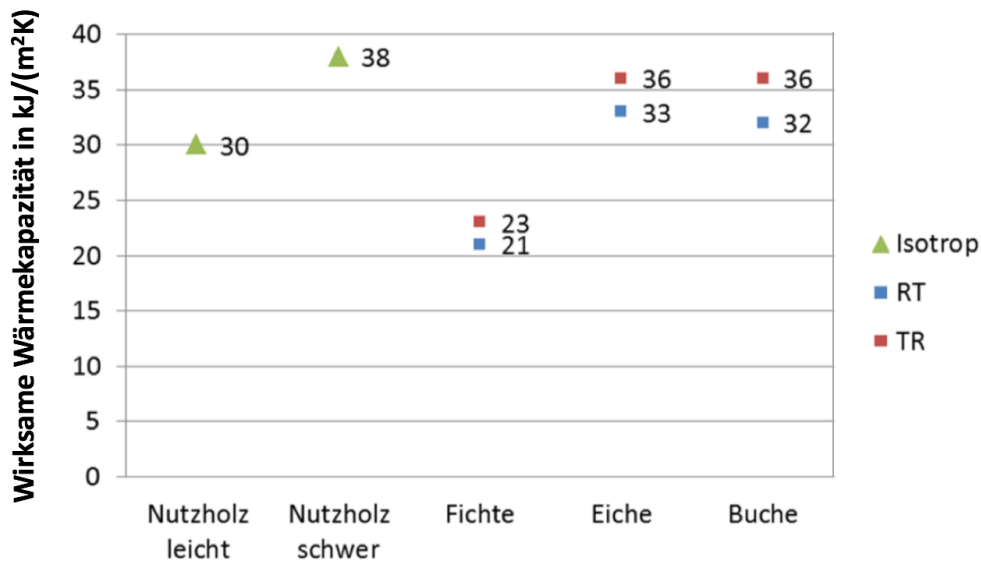


Abbildung 2: Zusammenstellung der wirksamen Wärmekapazitäten der Deckenunterseite von Brettstapeldecken in Abhängigkeit der Holzarten Fichte, Buche und Eiche. Die Abkürzung RT bezeichnet die anisotropen Wärmeleitfähigkeiten radial tangential, TR die anisotropen Wärmeleitfähigkeiten tangential radial.

Für Fichte ergeben sich Werte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von $\kappa_{\text{unten}} = 21 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $23 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$, je nach Orientierung des Holzes. Für Buche lauten die Werte $\kappa_{\text{unten}} = 32 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $36 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ und für Eiche $\kappa_{\text{unten}} = 33 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $36 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$. Damit zeigt sich ein grösserer Einfluss der Holzart und der Anisotropie des Holzes auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite als durch die Holzorientierung.

3.2. Profilierung der Deckenunterseite

Eine weitere Möglichkeit, die wirksame Wärmekapazität zu optimieren, ist die Profilierung der Deckenunterseite. Durch die Profilierung der Decke wird die Bauteiloberfläche der Deckenunterseite erhöht und somit die Wärmeaufnahmefähigkeit des Bauteils gesteigert. Die Bilder 8 und 9 zeigen als Beispiel eine Brettstapeldecke mit und ohne Profilierung. Da die obere wirksame Wärmekapazität aller Deckensysteme vom Fussbodenaufbau bestimmt wird, wird nur die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite der Geschossdecken weiter analysiert und optimiert.

Zunächst wird der Einfluss der Profilierung für die Holzart Fichte untersucht, da diese am häufigsten als Bauholz Verwendung findet.

Für die Brettstapeldecke werden fünf Varianten entwickelt. Das Ziel der Variation ist, die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite möglichst nah an den Wert einer massiven Betondecke von $\kappa = 88 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ zu bringen.

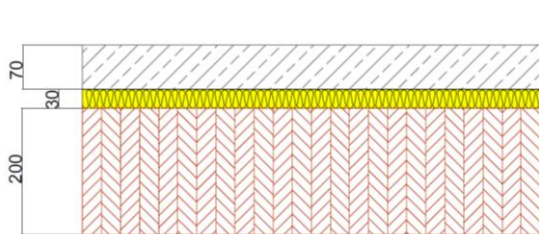


Abbildung 2 : ebene Brettstapeldecke

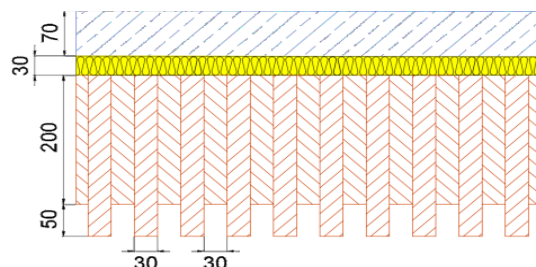


Abbildung 3 : Profilerte Brettstapeldecke

3.2.1. Zweidimensionale Profilierung

Als Maßstab für die Vergrößerung der Oberfläche der Deckenunterseite dient das Verhältnis der Abwicklungslänge l der Profilierung zur Elementbreite b .

Die Berechnungen zum Einfluss der Oberflächenvergrößerung der Deckenunterseite auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit wurden mit den isotropen Normwerten der EN ISO 10456 für die Wärmeleitfähigkeiten von *Nutzholz leicht* und *Nutzholz schwer* durchgeführt. Die Berechnungen der Amplituden der sinusförmigen Wärmeströme erfolgt wiederum mit dem Programm HEAT 2.

Durch die Oberflächenvergrößerung wird bei *schwerem Nutzholz*, was etwa Buche oder Eiche entspricht, die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von 39 kJ/(m²K) auf 61 kJ/(m²K) gesteigert.

Die Steigerung der wirksamen Wärmekapazität fällt bei *leichtem Nutzholz*, was etwa der Holzart Fichte entspricht, geringer aus: Hier wird die wirksame Wärmekapazität von 30 kJ/(m²K) auf 45 kJ/(m²K) gesteigert.

3.2.2. Dreidimensionale Profilierungen

Die Berechnung des Einflusses dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird mit dem Finite Elemente Programm ANSYS durchgeführt. Bei der Berechnung der wirksamen Wärmekapazität wird die Anisotropie der Holzarten Fichte und Buche berücksichtigt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die anisotropen Wärmeleitfähigkeiten parallel zu der x-, y- oder z-Achse des rechtwinkligen Koordinatensystems angeordnet sind.

Die entsprechenden Werte für die Wärmeleitfähigkeiten werden der Tabelle 1 entnommen. Der Aufbau der Brettstapeldecke entspricht dem Grundaufbau, der in Abbildung 1 beschrieben wurde. Es werden drei unterschiedliche Profilierungen untersucht: Lattenrost, Würfel und Kassettendecke.

Lattenrost

Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt eine perspektivische Darstellung der Geometrie des Lattenrostes mit den Parametern, A Abstand zwischen den Latten, B Lattenbreite, C Höhe der Latten, D Profiltiefe, E Breite der überstehenden Bretter und F Breite des Zwischenraumes zwischen den Brettern.

Mit dem Programm ANSYS wurden nun die verschiedenen Parameter der Geometrie variiert, um eine möglichst optimale wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite der Brettstapeldecke zu erzielen.

Mit der Optimierung konnte eine wirksame Wärmekapazität von 131 kJ/(m²K) für Buche und von 137 kJ/(m²K) für Fichte für die Deckenunterseite der Brettstapeldecke erzielt werden.

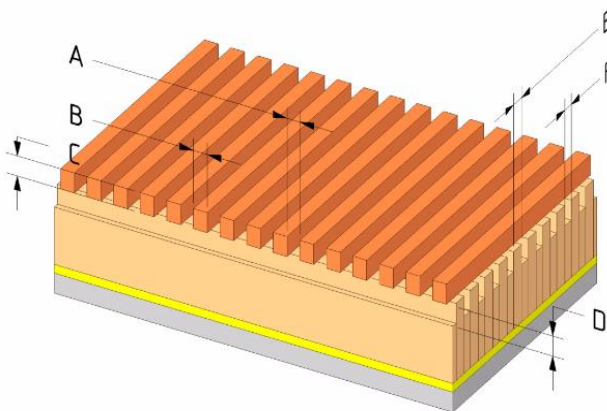


Abbildung 4: Perspektivische Darstellung der Deckenprofilierung mit einem Lattenrost. Die Abkürzungen stehen für folgende geometrische Eigenschaften: A für den Abstand zwischen den Latten, B für die Lattenbreite, C für die Höhe der Latten, D für die Profiltiefe, E für die Breite der überstehenden Bretter und F für die Breite des Zwischenraumes zwischen den Brettern.

Diese extrem hohen Werte der wirksamen Wärmekapazität können aber nur erreicht werden, wenn die Dicke der Decke um den Überstand des Rostes und die Profiltiefe erhöht wird. Dies führt im Falle der Buche zu einer Erhöhung der Deckenstärke um 140 mm und im Falle der Fichte sogar zu einer Erhöhung der Deckenstärke von 305 mm.

Darüber hinaus hat die Berechnung ergeben, dass relativ kleine Spaltbreiten zwischen dem Rost einerseits und den vorstehenden Lamellen andererseits für die wirksame Wärmekapazität optimal sind. Hier muss aber die Frage gestellt werden, ob bei solch kleinen Spaltbreiten nicht die Belüftung der Oberflächen und somit der Wärmestrom durch diese Oberflächen reduziert wird.

Daher wurde auch untersucht, wie sich eine reduzierte Belüftung der Oberflächen mit Raumluft auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite auswirken würde. Hierzu wurde in den Berechnungen der raumseitige Wärmeübergangswiderstand zwischen $R_{si} = 0,1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ variiert. Die Belüftung der Oberflächen ist umso schlechter, je größer der raumseitige Wärmeübergangswiderstand wird.

Durch eine Erhöhung des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands von $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ auf $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ reduziert sich die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von $131 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $75 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also um 43 % für die Holzart Buche. Die Reduzierung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite fällt für die Holzart Fichte geringer aus: sie reduziert sich von $137 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $117 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also lediglich um 15 %.

Da die sehr hohen Werte der wirksamen Wärmekapazität nur mit sehr großen Aufbauhöhen der Profilierung erreicht werden können, werden zusätzliche Berechnungen für Profilierungen, unter Berücksichtigung einer minimalen Deckenaufbauhöhe, durchgeführt

Es ergeben sich für die Brettstapeldecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von $22 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $42 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ bis $49 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ für Fichte, also Steigerungen zwischen 91 % und 123 %.

Alle beschriebenen Rechenergebnisse für die wirksame Wärmekapazität finden sich im Bauteilkatalog der im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeitet wurde und der aus der Projektdatenbank der Berner Fachhochschule heruntergeladen werden kann.

4. Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesamt für Umwelt – BAFU, namentlich dem Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojekts.

Bei den Industriepartnern, Pirmin Jung Büro für Bauphysik AG und Nägeli AG für die Unterstützung des Forschungsprojekts. Besonders wertvoll waren die Beiträge, durch die Erfahrungen aus der Praxis in das Projekt einfließen. Ganz besonders möchten wir uns bei der Firma Nägeli AG für die Herstellung der Prüfkörper bedanken.

5. Referenzen

- [1] Schlussbericht Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit Projekt-nummer 2016.09 Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung, Bericht-Nr. R.00 7844-10-72FE-01-02, Berner Fachhochschule, 2017
- [2] SIA 180 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2014
- [3] SN EN ISO 13786 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren, Ausgabe 2007
- [4] SN EN ISO 6946 Bauteile- Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Ausgabe April 2008
- [5] HEAT 2, T. Blomberg, Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics
- [6] ANSYS, Version 18.1 ANSYS Switzerland GmbH Services & Development, Zürich
- [7] W. Sonderegger, S. Hering und P. Niemz, «Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions», *Holzforschung*, Vol 65, pp. 369-375, 2011
- [8] P. Niemz, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW- Verlag, 1993.
- [9] SN EN ISO 10456, Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswert und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte, Ausgabe 2010