



Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit

Forschungsbericht

Schlussbericht

Bericht Nr.	R.007844-10-72FE-01-02
Auftrag Nr.	R.007844-10-72FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	31. Oktober 2017
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt – BAFU Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Werner Riegger 3003 Bern
Projektnummer BAFU	2016.09
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Kompetenzbereich Bauphysik und Energie Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91 www.ahb.bfh.ch

Verfasser Amabel Melián Hernández/ Dr. Christoph Geyer

Projektverantwortlicher Prof. Dr. Christoph Geyer

Institutsleiter Prof. Andreas Müller

Berner Fachhochschule

Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

Abstract

Im Forschungsprojekt "Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit" soll durch innovative Maßnahmen die wirksame Wärmespeicherfähigkeit von Holzdecken verbessert werden.

Es wird zunächst die wirksame Wärmespeicherfähigkeit marktüblicher Holzdecken analysiert. Dazu werden in einem ersten Schritt repräsentative Deckenaufbauten für die vier am häufigsten vorkommenden Deckenkonstruktionen in der Schweiz ausgewählt. Diese dienen als Ausgangskonstruktionen.

Es folgt eine Berechnung der wirksamen Wärmekapazität der Ausgangskonstruktionen mit dynamischen Wärmebrückenprogrammen.

Es kann gezeigt werden, dass das neu entwickelte Verfahren der dynamischen Wärmebrückenberechnung mit der Software HEAT 2 und ANSYS gleichwertig zu dem Verfahren nach EN ISO 13786 für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität ist.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von vier Deckenkonstruktionen Brettstapeldecke, Holzbetonverbunddecke, Hohlkastendecke und Rippendecke werden berechnet

Die wirksame Wärmekapazität abgehängter Decken mit verschiedenen Beplankungsmaterialien Holz, Gipskarton und Gipsfaserplatten wird ebenfalls bestimmt.

Mit dieser baulichen Massnahme kann die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite nur geringfügig gegenüber der Rohdecke verbessert werden, teilweise wird sie sogar verringert.

Für die Brettstapeldecke ohne Unterdecke wird auch der Einfluss verschiedener Hölzer (Fichte, Buche und Eiche) und ihre Orientierung auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite untersucht. Es zeigt sich ein grösserer Einfluss der Holzart auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite als der Holzorientierung.

Es wird der Einfluss zwei- und dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität von allen vier Deckentypen untersucht. Dabei werden zunächst für eine Brettstapeldecke mit drei Profilierungstypen, Lattenrost, Würfel und Kassette sehr hohe wirksame Wärmekapazitäten der Deckenunterseite erreicht. Allerdings benötigt man zum Erzielen dieser hohen Werte eine Erhöhung der Deckenhöhe zwischen 90 mm und 300 mm.

Schliesslich wird die wirksame Wärmekapazität einer ebenen Brettstapeldecke in der *Hot Box* in Biel gemessen.

Das Messergebnis der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke stimmt mit dem Rechenwert innerhalb der Fehlergrenzen überein.

Keywords Wirksame Wärmekapazität, Holzkonstruktionen, sommerlicher Wärmeschutz, dynamische Wärmebrückenberechnung, Messung wirksame Wärmekapazität.

Inhalt

1	Ausgangslage	6
2	Zielsetzungen des Forschungsprojektes	6
3	Projektpartner	8
4	Abgrenzung Schlussbericht	8
5	Ausgangskonstruktionen Deckenaufbauten	9
5.1	Holzbetonverbunddecke	9
5.2	Brettstapeldecke	9
5.3	Hohlkastendecke	9
5.4	Rippendecke	10
6	Wirksame Wärmekapazität	12
6.1	Einflussfaktoren des sommerlichen Wärmeschutzes	12
6.2	Definition der wirksamen Wärmekapazität	13
6.2.1	Berechnung nach EN ISO 13786	13
6.2.2	Berechnung mit Wärmebrückenprogrammen	14
6.3	Validierung des neuartigen Verfahrens	15
6.4	Optimierung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit	17
6.4.1	Einfluss verschiedener Holzarten und der Anisotropie des Holzes	17
6.4.2	Profilierung der Deckenunterseite	18
6.5	Messverfahren in der Hotbox	19
6.5.1	Beschreibung der Anlage	20
6.5.2	Statische Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten	21
6.5.3	Dynamische Messungen der wirksamen Wärmekapazität	21
6.5.4	Validierung des Messverfahrens	22
7	Berechnungsergebnisse	23
7.1	Validierung des Rechenverfahrens	23
7.1.1	Vergleich des analytischen Verfahrens mit dem numerischen Verfahren	23
7.1.2	Vergleich der numerischen Verfahren HEAT 2 und ANSYS	25
7.2	Optimierung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit	26
7.2.1	Einfluss abgehängter Decken	26
7.2.2	Brettstapeldecke	29
7.2.3	Profilierung der Deckenunterseiten	30
7.2.4	Weitere Profilierungsgeometrien	45
8	Messung der wirksamen Wärmekapazität	47
8.1	Ebene Brettstapeldecke	47
8.1.1	Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten	47
8.1.2	Messung der wirksamen Wärmekapazität	48
8.2	Profilierte Brettstapeldecke	49
9	Zusammenfassung und Ausblick	51

10 Danksagung	53
11 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	54
12 Verzeichnisse	55
12.1 Tabellenverzeichnis	55
12.2 Abbildungsverzeichnis	55
12.3 Literaturverzeichnis	57

1 Ausgangslage

In der Schweiz nimmt der Anteil an Gebäuden in Holzbauweise zu. Insbesondere im Mehrfamilienwohnungsbau wurden in den vergangenen Jahren große Objekte realisiert. Obwohl einige prominente Verwaltungsgebäude wie das Tamedia Verwaltungsgebäude in Zürich und das neue Verwaltungsgebäude der Swatch Group in Biel als Holzbau erstellt werden, stagnierte der Anteil des Holzbaus an Gewerbe- und Handelsgebäuden in den vergangenen Jahren auf einem niedrigen Niveau, bei unter 20 % der Baubewilligungen.

Um dem Holzbau hier weitere Marktanteile zu erschliessen, müssen bestehende Vorbehalte der Planenden und Bauherren gegenüber dem Holzbau beseitigt werden. Leichtbauweisen wie der Holzbau weisen prinzipiell geringere Wärmespeicherfähigkeiten als Massivbauten aus mineralischen Baustoffen auf. Daher sind Vorbehalte gegenüber der Funktionsfähigkeit des sommerlichen Wärmeschutzes von Holzgebäuden bei Planenden weit verbreitet.

Insbesondere wird dem Holzbau unterstellt, dass durch die geringere wirksame Wärmespeicherfähigkeit der sommerliche Wärmeschutz bei Büro- und Gewerbeimmobilien nicht oder nur mit hohem energetischen Aufwand funktioniert. Daher ist es wichtig, durch innovative Maßnahmen die wirksame Wärmespeicherfähigkeit von Holzkonstruktionen soweit zu verbessern, dass vergleichbare Werte der Wärmekapazität wie bei Massivbauteilen erreicht werden. Somit wird eine wichtige Voraussetzung geschaffen, den Holzbau wettbewerbsfähiger zu machen.

Dass es prinzipiell mit vergleichsweise einfachen, innovativen Massnahmen möglich ist, die wirksame Wärmespeicherfähigkeit von Holzbaukonstruktionen deutlich zu steigern, konnte in Vorstudien für einzelne Konstruktionen gezeigt werden ([1] und [2]). Um aber das Potential dieser Massnahmen auszuschöpfen, sind systematische Untersuchungen erforderlich, um die Ergebnisse auf eine breitere Basis zu stellen und eine breite Anwendung bei verschiedenen Holzbaukonstruktionen zu erreichen.

2 Zielsetzungen des Forschungsprojektes

Im Rahmen dieses Projektes soll die wirksame Wärmespeicherfähigkeit von Holzkonstruktionen zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes von Holzgebäuden erhöht werden. 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.

Die wirksame Wärmekapazität kann durch folgende Massnahmen erhöht werden:

- Verwendung von Laubholzarten wie Buche mit höherer Rohdichte, sowie Orientierung des Holzes im Bauteil
- Vergrösserung der Oberfläche durch Profilierung
- Einbau von abgehängten Decken, welche auch mit den oben aufgeführten Massnahmen kombiniert werden können

Gemäss SIA 180:2014 [3] ist die wirksame Wärmespeicherfähigkeit C_R eines Bauteils als Produkt der Bauteilfläche A und der flächenbezogenen Wärmespeicherfähigkeit k zu berechnen. Das Rechenverfahren der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit nach SN EN ISO 13786 [4] kann aber nur für Bauteile mit ebenen und homogenen Schichten angewandt werden. Um die Wirkung der oben aufgeführten Verbesserungsmass-

nahmen auf die flächenbezogene Wärmespeicherfähigkeit feststellen zu können, sind daher neue Berechnungsverfahren erforderlich.

Die Bestimmung der flächenbezogenen Wärmekapazität dieser inhomogenen Bauteile kann aber mit Wärmebrückenprogrammen mit instationären, d. h. mit zeitabhängigen, sinusförmigen Temperaturreandbedingungen, erfolgen. Die Anwendung dieser neuen numerischen Rechenmethode wurde in Vorstudien ([1] und [2]) bereits erfolgreich getestet und soll nun im Rahmen des Projektes auf weitere Holzbaukonstruktionen angewandt werden.

Ziel ist eine Dokumentation der wirksamen Wärmekapazitäten und der Konstruktionsaufbauten der vier am häufigsten verwendeten Deckensysteme in der Schweiz. Dabei wird für Hohlkastendecken, Holzbetonverbunddecken, Brettstapeldecken sowie Rippendecken jeweils die wirksame Wärmespeicherfähigkeit ohne und mit den Verbesserungsmassnahmen ermittelt.

Zur Überprüfung der Berechnungsergebnisse wird ein Verfahren zur Messung der wirksamen Wärmekapazität von Bauteilen im Labor entwickelt und getestet.

Die Ergebnisse fliessen in einen Bauteilkatalog ein, der sowohl die heute marktüblichen, wie auch die optimierten Konstruktionen mit den jeweils erreichten Werten für die wirksame Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile praxisnah dokumentiert. Hier wird auch das Berechnungsverfahren der wirksamen Wärmekapazität so dargestellt, dass Planer diese für weitere Aufbauten selbst berechnen können.

Durch diese Forschungsergebnisse werden Architekten, Bauphysiker, Klima- und Holzbauingenieure in die Lage versetzt, bereits in frühen Planungsphasen die verfügbare Wärmespeicherfähigkeit von Holzbauteilen optimal auszunutzen und somit Vorbehalte gegen die Eignung des Holzbaus für Büro- und Gewerbeimmobilien zu zerstreuen.

3 Projektpartner

Die Bearbeitung des Projektes erfolgt in Kooperation mit den in Tabelle 1 aufgeführten Projektpartnern.

Tabelle 1 : Übersicht Projektpartner.

Projektpartner	Ansprechperson	Kategorie
Pirmin Jung Büro für Bauphysik AG	Daniel Müller	Fachplaner im Bereich Bauphysik
Nägeli AG	Clemens Koller	Holzbauunternehmung
Lignum Schweiz	Andreas Rudolf	Dachorganisation Schweizer Wald- und Holzwirtschaft.

4 Abgrenzung Schlussbericht

In vorliegendem Schlussbericht wird die wirksame Wärmespeicherfähigkeit marktüblicher Holzdecken dargestellt. Dazu werden in einem ersten Schritt in Absprache mit den Projektpartnern repräsentative Deckenaufbauten für die vier am häufigsten vorkommenden Deckenkonstruktionen ausgewählt. Diese dienen als Ausgangskonstruktionen, für welche die heute üblichen Werte für die wirksame Wärmekapazität von Holzdecken bestimmt werden.

Es folgt eine Berechnung der wirksamen Wärmekapazität der Ausgangskonstruktionen mit einem dynamischen Wärmebrückenprogramm, also mit zeitabhängigen Temperaturrandbedingungen. Damit wird der Ausgangswert für die Optimierung der wirksamen Wärmekapazität bestimmt. Die Berechnungen erfolgen mit der Software HEAT 2 und ANSYS.

In einem ersten Schritt wird die neue Berechnungsmethode evaluiert. Dies erfolgt durch den Vergleich der mit Wärmebrückenprogrammen berechneten wirksamen Wärmekapazität mit den analytisch berechneten wirksamen Wärmekapazitäten der Deckenkonstruktionen nach SN EN ISO 13786 [4].

Hierzu erfolgt zusätzlich eine Berechnung der wirksamen Wärmekapazitäten der Deckenkonstruktionen nach SN EN ISO 13786. Dabei kommt die Software Lesosai der Firma E4tech zum Einsatz. Es erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse der Simulationen mit HEAT 2 und ANSYS mit den Ergebnissen der Berechnung nach SN EN ISO 13786.

Die Ergebnisse der Berechnungen der wirksamen Wärmekapazität für die Deckenkonstruktionen werden in einem Bauteilkatalog zusammengestellt.

Nach der Evaluierung der neuen Berechnungsmethode wird in einem zweiten Schritt die wirksame Wärmekapazität dieser Deckentypen verbessert.

Dabei wird auch der Einfluss der verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Holzrichtung, also der Einfluss der Anisotropie des Holzes analysiert.

Ausserdem wird für fünf unterschiedliche Varianten für jeden Deckentyp die wirksame Wärmekapazität durch die Profilierung der unteren Seite der Decken optimiert. Ziel dieser Optimierung ist es, möglichst nahe an die wirksame dynamische Wärmekapazität der Unterseite einer Betondecke zu kommen. Diese Berechnungen werden mit HEAT 2 durchgeführt. Für die dreidimensionale Profilierung wird ANSYS benutzt.

Die Ergebnisse der Berechnungen werden in einem Bauteilkatalog zusammengestellt.

Ziel des dritten Schritts ist die Entwicklung und Validierung eines Messverfahrens zum Messen der wirksamen Wärmekapazität. Diese Messungen finden in einem Prüfstand nach der Methode des geschützten Heizkastens, einer sogenannten „Hotbox“ statt. Die Probekörper, die die Firma Nägeli AG geliefert hat, werden in der „Hotbox“ gemessen.

5 Ausgangskonstruktionen Deckenaufbauten

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt eine Darstellung der, in Rücksprache mit den Projektpartnern, ausgewählten Ausgangskonstruktionen der Deckenaufbauten. Dabei handelt es sich um die Deckentypen Hohlkastendecke, Holzbetonverbunddecke, Brettstapeldecke sowie Rippendecke.

5.1 Holzbetonverbunddecke

Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Rohdecke des Deckentyps „Holzbetonverbunddecke“. Die Varianten des Deckentyps mit den abgehängten Deckenaufbauten sowie eine Tabelle mit den Kenndaten aller Materialien sind im *Bauteilkatalog* Anlage 3.1 aufgeführt.

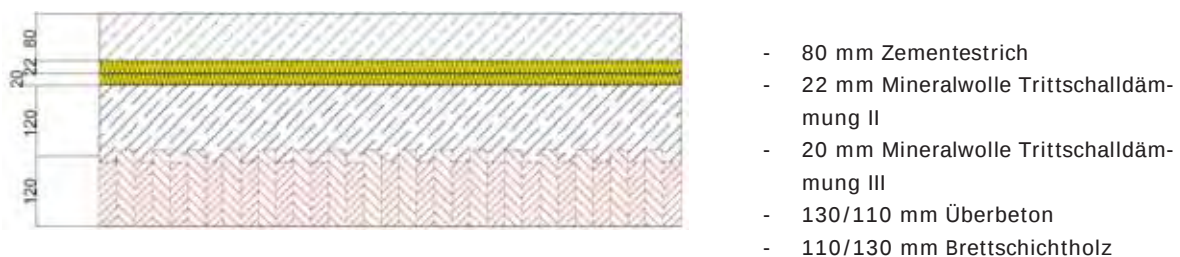


Abbildung 1 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Holzbetonverbunddecke

5.2 Brettstapeldecke

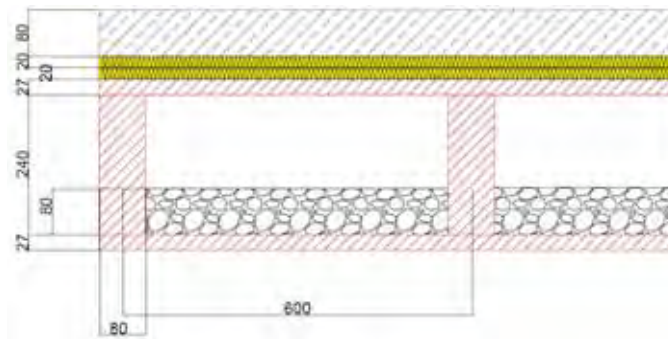
Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Rohdecke des Deckentyps „Brettstapeldecke“. Die Varianten des Deckentyps mit den abgehängten Decken sowie eine Tabelle mit den Kenndaten aller Materialien sind im *Bauteilkatalog*, Anlage 3.2 aufgeführt.



Abbildung 2 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Brettstapeldecke

5.3 Hohlkastendecke

Abbildung 3 zeigt den Aufbau der Rohdecke des Deckentyps „Hohlkastendecke“. Die Varianten des Deckentyps mit den abgehängten Deckenaufbauten sowie eine Tabelle mit den Kenndaten aller Materialien sind im *Bauteilkatalog* Anlage 3.3 aufgeführt.

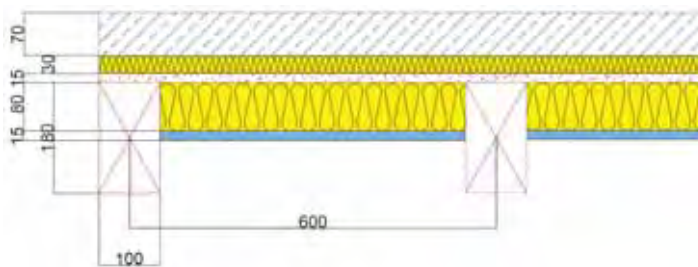


- 80 mm Zementestrich
- 2 x 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I
- 27 mm Holzwerkstoffplatte
- 240 mm Holzbalken (b = 80 mm/e = 600 mm)
- 80 mm Splitt (zwischen Balken)
- 27 mm Holzwerkstoffplatte

Abbildung 3 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Hohlkastendecke

5.4 Rippendecke

Abbildung 4 zeigt den Aufbau der Rohdecke des Deckentyps „Rippendecke“. Die Varianten des Deckentyps mit den abgehängten Deckenaufbauten sowie eine Tabelle mit den Kenndaten aller Materialien sind im *Bauteilkatalog*, Anlage 3.4 aufgeführt.



- 70 mm Zementestrich
- 30 mm Trittschalldämmung I
- 15 mm OSB
- 180 mm Holzbalken (e = 600 mm/b = 100 mm)
- 80 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung (zwischen Balken)
- 15 mm Gipsfaserplatte (zwischen Balken nur ohne abgehängter Decke)

Abbildung 4 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Rippendecke

Für jeden Deckenaufbau wird die wirksame Wärmekapazität für fünf Varianten berechnet. Die erste Variante untersucht nur die Decke ohne abgehängte Decke; für Variante 2 bis 5 werden vier verschiedene abgehängte Decken berücksichtigt. Der Aufbau der abgehängten Decken ist wie folgt:

- Beplankung aus 27 mm Massivholz mit vollflächiger Auflage einer 50 mm dicken Mineralwolle
- 70 mm Massivholz mit einer vollflächigen Auflage einer 50 mm dicken Mineralwolle
- Beplankung aus 2 x 12,5 mm dicken Gipskartonplatten mit vollflächiger Auflage von 50 mm dicker Mineralwolle
- Beplankung aus 2 x 15 mm dicken Gipsfaserplatten mit vollflächiger Auflage von 50 mm dicker Mineralwolle

Die Varianten werden zur besseren Übersicht mit einer Kurzbezeichnung versehen. Die Kurzbezeichnung setzt sich aus dem Namen der Decke und der verwandten abgehängten Decke zusammen. So steht beispielsweise HBV 70MH für eine Holzbetonverbunddecke mit einer abgehängten Decke und einer Beplankung aus einer 70 mm dicken Massivholzplatte. In der nachfolgenden Tabelle sind die Abkürzungen für die Deckensysteme und die abgehängten Decken zusammengestellt.

Tabelle 2: Varianten der Decken und Unterdecken.

		Abkürzungen
Decke	Holzbetonverbunddecke	HBV
	Brettstapeldecke	BS
	Hohlkastendecke	HKD
	Rippendecke	RD
Unterdecke	Ohne Unterdecke	-
	70 mm Massivholz	70MH
	27 mm Massivholz	27MH
	2 x 15 mm Gipsfaserplatte	GFP
	2 x 12.5 mm Gipskartonplatte	GKP

6 Wirksame Wärmekapazität

In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen sowie die im Forschungsprojekt angewendeten Berechnungsmethoden kurz beschrieben. Detaillierte Beschreibungen finden sich auch in der Einleitung zum Bauteilkatalog, welcher ergänzend zum vorliegenden Bericht als eigenständiges Dokument erstellt wurde.

6.1 Einflussfaktoren des sommerlichen Wärmeschutzes

Die Architektur tendiert in Richtung Transparenz der Gebäudehülle, welche durch einen hohen Glasflächenanteil erzielt wird. Durch grosse nichtverschattete Glasflächen mit einem hohen Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) entstehen im Winter hohe passivsolare Gewinne. Durch diese kann der Heizwärmebedarf reduziert werden. Im Sommer neigen Gebäude mit grossen Glasflächen jedoch zur Überhitzung, wodurch der sommerliche Raumkomfort für die Nutzer beeinträchtigt wird. Darüber hinaus sind Gebäude immer besser wärmegeklämt, wodurch die anfallenden Wärmelasten über Transmission der Aussenbauteile nur in immer geringerem Umfang wieder abgegeben werden können.

Der thermische Komfort im Sommer wird primär durch folgende Faktoren bestimmt:

- Klima am Gebäudestandort
- Gebäudenutzung und Nutzerverhalten
- Gebäudearchitektur in Bezug auf Glasflächenanteil, Sonnenschutz, Auskühlung und Wärmekapazität

Das Klima am jeweiligen Gebäudestandort ist objektspezifisch und kann nicht verändert werden. Demnach ist das Gebäude unter Berücksichtigung der klimatischen Randbedingungen zu planen und zu bauen. Auch die Nutzung ist objektspezifisch gegeben. Ziel der Planung muss es sein, ein effizientes Gebäude mit hohem thermischen Komfort entsprechend der geplanten Nutzung zu erstellen. Je nach Nutzungsart fallen unterschiedlich hohe interne Wärmelasten an, die es zu berücksichtigen gilt. Zu diesen zählen die Anzahl der Personen und Geräte sowie die Beleuchtung. Das spätere Nutzerverhalten hinsichtlich richtigem Lüften, korrektem Einsatz des aussenliegenden Sonnenschutzes sowie Einsatz von elektrischen Geräten, Maschinen und Beleuchtung über die übliche Standardnutzung hinaus, kann sich massgeblich auf die Überhitzung eines Gebäudes auswirken. Jedoch kann der individuelle Einfluss der Nutzer in der Planung nicht oder nur sehr schwer vorausgesagt werden.

Die Gebäudearchitektur kann im Gegensatz dazu auf das Erreichen eines hohen sommerlichen Raumkomforts ausgelegt werden. Dieser sollte nach Möglichkeit ohne aktive Kühlsysteme erreicht werden. Dazu ist es notwendig, Grösse und Anordnung der Glasflächen auf eine optimale Ausnutzung des Tagelichtangebots hin auszulegen. Die solaren Gewinne im Winter sollten dem Kühlbedarf aufgrund eines hohem Glasanteils im Sommer gegenübergestellt werden. Alle Fensterflächen sind mit einem Sonnenschutz auszustatten, der am effektivsten auf der Aussenseite der Fenster angeordnet wird und beweglich ist. Bei korrektem Einsatz können so passivsolare Gewinne in der Heizperiode genutzt und im Sommer begrenzt werden. Neben Glasflächenanteil und Sonnenschutz ist ein entscheidender Parameter zur Gewährleistung des sommerlichen Raumkomforts die effektive Auskühlung des Gebäudes in Hitzeperioden. Im Idealfall erfolgt diese passiv über Öffnung der Fenster zu Zeiten, in welchen die Aussenlufttemperatur unterhalb der Raumlufthtemperatur liegt. Hier ist das Stichwort „Nachtauskühlung“ zu nennen. Ist eine passive Kühlung über

ein angepasstes Lüftungskonzept nicht ausreichend, so sind gebäudetechnische Massnahmen, wie z.B. eine Bauteilkühlung, zu prüfen.

Neben all den genannten Faktoren hat auch die wirksame Wärmekapazität, sprich die verfügbare thermische Speichermasse eines Gebäudes, einen grossen Einfluss auf die sommerlichen Raumlufttemperaturen. Da dieser Parameter zentral für vorliegendes Forschungsprojekt ist, wird er nachfolgend näher beschrieben.

6.2 Definition der wirksamen Wärmekapazität

Durch die Wärmekapazität oder Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile können diese Wärmeenergie aufnehmen bzw. abgeben und so die Maxima und Minima der Raumlufttemperatur begrenzen. Allerdings steht für die Wärmespeicherung nicht die gesamte Wärmekapazität der Bauteile, sondern nur die Wärmekapazität der oberen, raumseitigen Bauteilschichten zur Verfügung. Der Anteil der Wärmekapazität der Bauteile, der für die Wärmespeicherung zur Verfügung steht, wird als wirksame oder dynamische Wärmespeicherfähigkeit bezeichnet.

Räume werden, nach der zur Verfügung stehenden wirksamen Wärmespeicherfähigkeit in unterschiedlich schwere Bauarten (leicht, mittel und schwer) eingeteilt. Zu deren Ermittlung wird zunächst die wirksame Wärmespeicherfähigkeit der einzelnen Bauteile berechnet. Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit des Raumes ergibt sich dann als Summe der wirksamen Wärmespeicherfähigkeiten der einzelnen raumbegrenzenden Bauteile.

6.2.1 Berechnung nach EN ISO 13786

Die Norm EN ISO 13786 stellt ein analytisches Verfahren zur Berechnung der wirksamen Wärmekapazität für sinusförmige Temperaturrendbedingungen zur Verfügung. Die Berechnung der dynamischen Wärmekapazität nach EN ISO 13786 ist allerdings auf homogene, ebene Bauteile beschränkt. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft wird eine Sinusfunktion, welche um einen Mittelwert schwingt, angenommen.

Die Temperatur- bzw. Wärmestromschwankung werden als komplexe Grössen in Zeigerschreibweise geschrieben: $\Theta(t)$ bzw. $q(t)$.

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

Die dynamischen d. h. zeitabhängigen wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden dann in einer komplexen Matrix, Z_{ij} zusammengefasst. Diese Matrix bestimmt das Durchdringen der Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung des Bauteils. Die Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils wird schliesslich mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\begin{pmatrix} \Theta_e \\ q_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_i \\ q_i \end{pmatrix} \quad \text{Formel 1}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_{e \text{ oder } i}$ die Temperatur an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.
- $q_{e \text{ oder } i}$ die Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.

Aus dieser Gleichung kann mit geeigneten Randbedingungen die dynamische oder wirksame Wärmekapazität berechnet werden. Für Aussenbauteile, an denen raumseitig eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität κ auf der Raumseite

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet

- $\hat{\Theta}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.
- $\hat{q}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e

Für Innenbauteile, die an beiden Oberflächen einer Temperaturschwankung der Raumluft ausgesetzt sind, ergibt sich die wirksame Wärmekapazität der beiden Oberflächen

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 3}$$

$$\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_e}{\hat{\Theta}_e} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 4}$$

Dieses Verfahren kann auch für inhomogene Bauteile angewandt werden, indem diese Bauteile analog zum Verfahren der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengesetzter Bauteile nach EN ISO 6946 *Bauteile- Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient*, Ausgabe April 2008 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

$$\kappa = f_a \cdot \kappa_a + f_b \cdot \kappa_b \quad \text{Formel 5}$$

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
- κ_b die wirksame Wärmekapazität des zweiten homogenen Bereichs

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität erfolgt für die homogenen Bereiche mit dem Programm LESOSAI, Version 2016.0. Hieraus wird die wirksame Wärmekapazität des zusammengesetzten Bauteils mit Formel 5 ermittelt.

6.2.2 Berechnung mit Wärmebrückenprogrammen

Aus dem ersten Teil von Formel 2 bis Formel 4 folgt, dass die wirksame Wärmekapazität eines Bauteils als der Quotient der Amplitude der Wärmestromdichte 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 mit dem Wärmebrückenprogramm HEAT 2 bzw. ANSYS zu berechnen. In einem zweiten Schritt wird es auf inhomogene Bauteilaufbauten angewandt.

Hierfür wird die Bauteilgeometrie in einem Wärmebrückenprogramm modelliert. Als Randbedingung wird eine sinusförmige Temperaturschwankung der angrenzenden Luft gemäss folgender Gleichung angesetzt:

$$\Theta(t) = \Theta_m + \hat{\Theta} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \quad \text{Formel 6}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_m = 20^\circ \text{ C}$ den Mittelwert der Temperatur in $^\circ \text{C}$
- $\hat{\Theta} = 5^\circ \text{ C}$ die Amplitude der Temperaturschwankung in K
- t die Zeit in h
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer in h

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

$$\kappa_{unten} = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_{unten}}{\hat{\Theta}_{unten}} \quad \text{Formel 7}$$

$$\kappa_{oben} = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_{oben}}{\hat{\Theta}_{oben}} \quad \text{Formel 8}$$

6.3 Validierung des neuartigen Verfahrens

Um zu überprüfen, ob das Verfahren mit dem dynamischen Wärmebrückenprogramm 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 dem dynamischen Wärmebrückenprogramm. Dann werden die Werte der dynamischen Wärmekapazität verglichen.

Da die in Abbildung 2 dargestellte Brettstapeldecke als einzige Deckenkonstruktion ausschliesslich ebene, homogene Schichten aufweist, wird diese als Testaufbau verwendet.

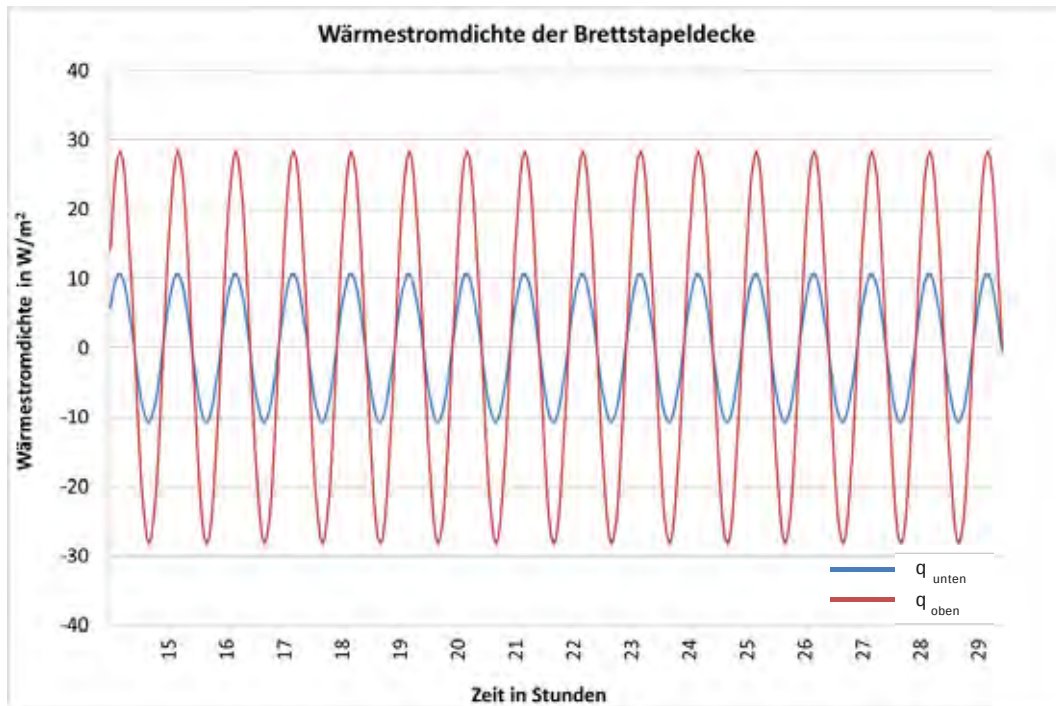


Abbildung 5 : Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte der Deckenober- und der Deckenunterseite der Brettstapeldecke

In Abbildung 5 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 eine Amplitude der Wärmestromdichte von $\hat{q} = 28.3 \text{ W/m}^2$ für die Deckenoberseite (Unterlagsboden mit 70 mm Zementestrich) und von $\hat{q} = 10.7 \text{ W/m}^2$ für die Deckenunterseite (200 mm Brettstapeldecke).

Damit berechnet sich die wirksame Wärmekapazität der Rohdecke ohne Unterdecke nach Formel 9 und Formel 10 für die Deckenoberseite und für die Deckenunterseite zu

$$\kappa_{\text{unten}} = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_{\text{unten}}}{\hat{\Theta}_{\text{unten}}} = \frac{24 \cdot 3600 \text{ s} \cdot 10.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{2\pi \cdot 5 \text{ K}} = 29.4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K}) \quad \text{Formel 9}$$

$$\kappa_{\text{oben}} = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_{\text{oben}}}{\hat{\Theta}_{\text{oben}}} = \frac{24 \cdot 3600 \text{ s} \cdot 28.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{2\pi \cdot 5 \text{ K}} = 77.8 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K}) \quad \text{Formel 10}$$

6.4 Optimierung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit

6.4.1 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 Deckenkonstruktion.

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

Darüber hinaus wird auch der Einfluss der Anisotropie der Wärmeleitfähigkeiten von Holz auf die wirksame Wärmekapazität analysiert.

Bild 6 zeigt eine Prinzipskizze mit den drei anatomischen Richtungen tangential, radial und longitudinal.

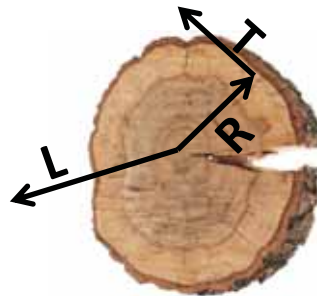


Abbildung 6 :Prinzipskizze der unterschiedlichen Richtungen der Wärmeleitfähigkeit des Holzes mit den Koordinaten: radial, tangential und longitudinal.

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 und mit abgehängter Decke analysiert. Aus statischen Gründen werden die Bretter in der Brettstapeldecke so eingebaut, dass die longitudinale Richtung des Holzes senkrecht zur Zeichenebene steht.

Die beiden anderen Richtungen werden vereinfachend mit radial (R) in horizontaler Richtung und tangential (T) in vertikaler Richtung angesetzt.

Für das Holz der abgehängten Decke wird ebenfalls angenommen, dass die longitudinale Richtung senkrecht auf der Zeichenebene steht, während die radiale und die tangential Richtung entweder horizontal oder vertikal angeordnet werden.

Bild 7 stellt die Brettstapeldecke mit den Möglichkeiten der Zuordnung der Wärmeleitfähigkeiten dar.

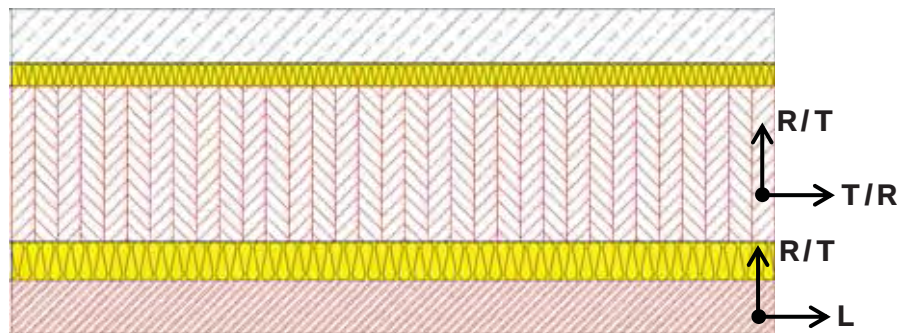


Abbildung 7 : Aufbau der Brettstapeldecke mit den unterschiedlichen Holzarten und möglichen Richtungen der anisotropen Wärmeleitfähigkeiten des Holzes. Die Abkürzung R steht für radial, L für longitudinal und T für tangential.

In Tabelle 3 sind alle Möglichkeiten der Holzarten und der Holzorientierung zusammengestellt. Der erste Buchstabe entspricht der Holzorientierung in horizontaler Richtung, der zweite der Holzorientierung in vertikaler Richtung. Die Abkürzung R steht für radial, L für longitudinal und T für tangential.

Tabelle 3 : Kombinationen der Holzorientierung für jede Holzart .

		Rohdecke			
		Eiche, Buche, Fichte			
		RT		TR	
Abgehängte Decke	Eiche, Buche, Fichte	Ohne	-	-	-
		27 mm	LR	LT	LR
		70 mm	LR	LT	LR

In der Tabelle 4 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 4 : Eigenschaften der Holzarten Fichte, Eiche und Buche.

Holzart	Rohdichte ρ kg/m ³	Spezifische Kapazität C_p J/(kg·K)	Volumetrische Kapazität MJ/(m ³ ·K)	Wärmeleitfähigkeit λ W/(m·K)		
				R	T	L
Fichte [5]	420	1510	0.63	0.09	0.07	0.22
Eiche [6]	640	1590	1.02	0.17	0.14	0.29
Buche [5]	720	2021	1.46	0.12	0.09	0.26

Mit diesen Berechnungen ist es möglich, den Einfluss der Holzart und den Einfluss der Anisotropie des Holzes auf die wirksame Wärmekapazität zu optimieren.

6.4.2 Profilierung der Deckenunterseite

Eine andere Möglichkeit, die wirksame Wärmekapazität zu optimieren, ist die Profilierung der Deckenunterseite. Durch die Profilierung der Decke wird die Oberfläche der Deckenunterseite erhöht und somit die Wärmeaufnahmefähigkeit des Bauteils gesteigert.

Die Bilder 8 und 9 zeigen die Hohlkastendecke mit und ohne Profilierung.

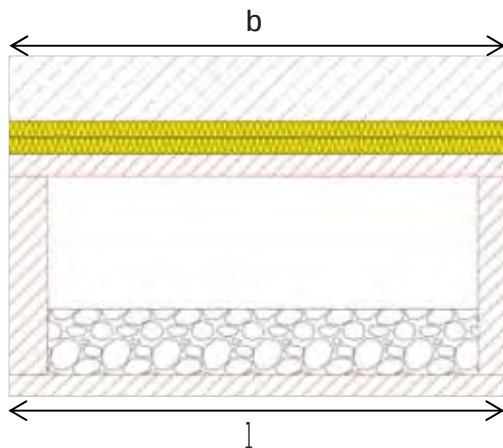
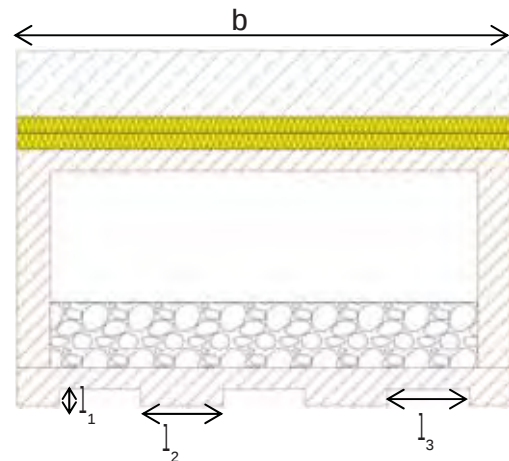


Abbildung 8 : ebene Hohlkastendecke



$$l = 6 \cdot l_1 + 3 \cdot l_2 + 3 \cdot l_3$$

Abbildung 9 : Profilierte Hohlkastendecke mit der Abwicklungslänge l

Da die obere wirksame Wärmekapazität aller Deckensysteme vom Fussbodenaufbau bestimmt wird, wird nur die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite jedes Deckentyps analysiert und optimiert.

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

Für jeden Deckentyp (Brettstapel, Hohlkastendecke, Holzbetonverbunddecke und Rippendecke) werden fünf Varianten entwickelt. Das Ziel der Variation ist, die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite jedes Deckentyps möglichst nah an die Grössenordnung des Wertes einer massiven Betondecke von $\kappa = 88 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ zu bringen.

Die zweidimensionalen Profilierungen werden mit dem Programm HEAT 2 berechnet. Für dreidimensionale Profilierungen werden die Wärmebrückenberechnungen mit ANSYS durchgeführt.

6.5 Messverfahren in der Hotbox

Bisher gibt es kein etabliertes Messverfahren zur Bestimmung der wirksamen Wärmekapazität. Daher wird das neu entwickelte Verfahren zunächst an einem ebenen Bauteilaufbau getestet. Dann wird versucht, es auf profilierte Bauteilaufbauten anzuwenden.

Der Messstand zur Messung der statischen Wärmedurchgangskoeffizienten mit dem Heizkastenverfahren im Labor der BFH-AHB wird so modifiziert, dass damit auch die wirksame Wärmekapazität von Bauteilen gemessen werden kann. Dazu muss die Temperatursteuerung des Prüfstands von stationären Temperaturen auf ein sinusförmiges Temperaturprofil umprogrammiert werden.

6.5.1 Beschreibung der Anlage

Die Messung wird in einem Prüfstand zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1:2010 *Wärmetechnisches Verhalten von Fenster und Türen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens - Teil 1: Komplette Fenster und Türen* durchgeführt. Der Prüfstand befindet sich in den Laboren der Berner Fachhochschule in Biel.

Die Anlage besteht aus zwei Klimakammern, die als Warm- und als Kaltseite bezeichnet werden. Die Abmessung (Breite, Höhe und Tiefe) der Warmseite ist (3600 x 3600 x 2100) mm. Im Innern der Warmseite befindet sich die sogenannte Hotbox. Diese Hotbox hat die Dimensionen (2740 x 2740 x 1050) mm. Die Dimensionen der Kaltseite ist (3600 x 3600 x 1500) mm.

Zwischen den beiden Klimakammern ist der Prüfraum mit der Prüfmassage installiert, in den der Probekörper eingebaut wird. Dieser Prüfraum ist (3600 x 3600 x 196) mm gross. Die Öffnung in der Prüfmassage misst (1230 x 1480 x 196) mm. Der Prüfraum weist einen hohen Wärmedurchlasswiderstand auf, hält den Probekörper in der richtigen Stellung und trennt die Warmseite von der Kaltseite.

Die folgende Abbildung zeigt eine Prinzipskizze der Anlage.

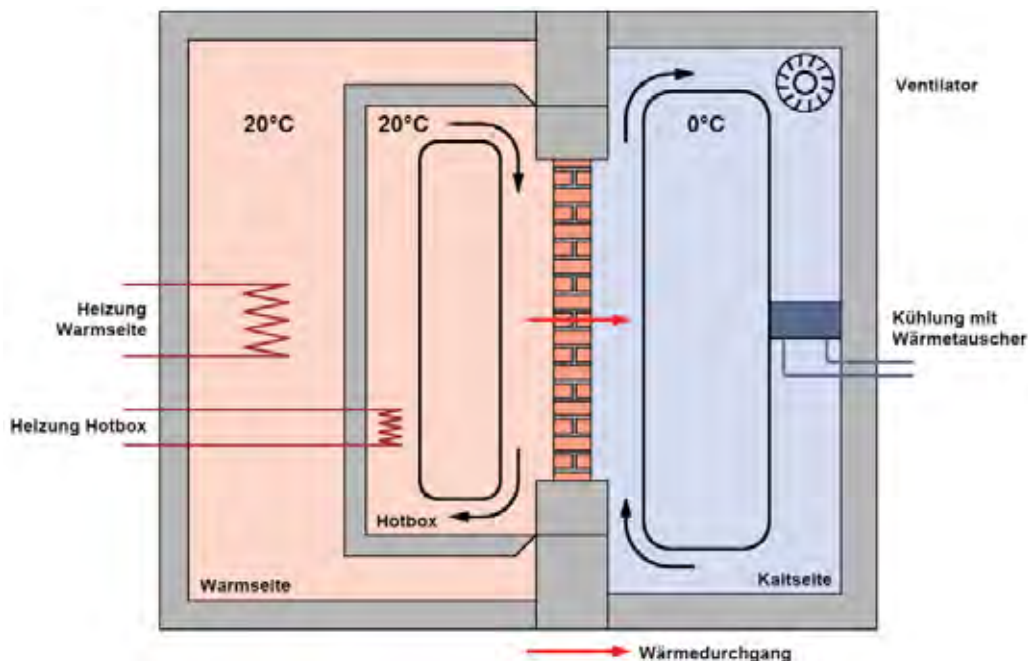


Abbildung 10: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1.

Abbildung 11 zeigt eine Prinzipskizze der Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für den Probekörper.

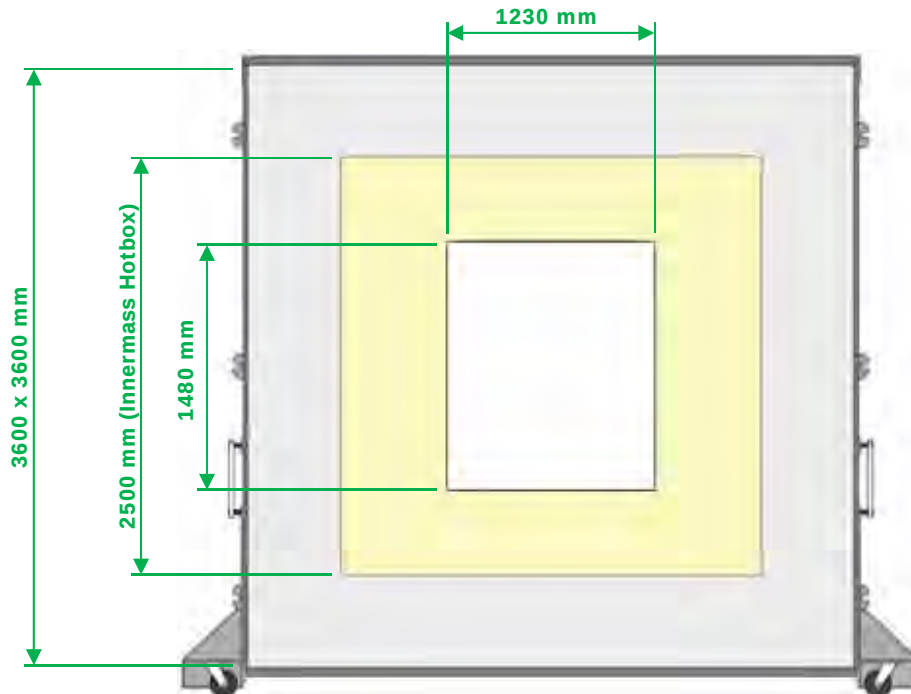


Abbildung 11: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für den Probekörper

6.5.2 Statische Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Zur Messung des stationären Wärmedurchgangskoeffizienten wird die Hotbox mit konstanten Temperaturrendbedingungen auf beiden Seiten des Prüfkörpers betrieben. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) beschreibt die Wärmemenge durch eine ein- oder mehrlagige Materialschicht, welche in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m² fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen um 1 K unterscheiden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes (R_T), welcher sich aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände (R) der einzelnen hintereinander liegenden Bauteilschichten sowie der Wärmeübergangswiderstände (R_{si} ; R_{se}) der Luftschichten an beiden Oberflächen zusammensetzt:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \text{ in } \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 11}$$

6.5.3 Dynamische Messungen der wirksamen Wärmekapazität

Aus Formel 9 bis Formel 10 folgt, dass die wirksame Wärmekapazität eines Bauteils als der Quotient der Amplitude der Wärmestromdichte, und der Amplitude der Temperaturschwankung der am Bauteil angrenzenden Luft, dividiert durch die Kreisfrequenz der Temperaturschwankung, ausgedrückt werden kann.

Dieser Zusammenhang wird nun genutzt, um die wirksame Wärmekapazität mit der Hotbox zu messen.

Als Randbedingung wird eine sinusförmige Temperaturschwankung der angrenzenden Luft auf der Kaltseite gemäss folgender Gleichung hergestellt:

$$\theta(t) = \theta_m + \hat{\theta} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \quad \text{Formel 12}$$

Hierbei bezeichnet

- $\theta_m = 5^\circ \text{C}$ den Mittelwert der Temperatur in $^\circ\text{C}$
- $\hat{\theta} = 5 \text{ K}$ die Amplitude der Temperaturschwankung in K
- t die Zeit in h
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer in h

Mit Hilfe von Wärmestromplatten wird nun die zur Temperaturschwankung zugehörige Schwankung der Wärmestromdichte durch die Oberfläche gemessen.

Sodann wird für die entsprechende Oberfläche die wirksame Wärmekapazität κ als Quotient der Amplitude der Schwingung der Wärmestromdichte und der Amplitude der Schwingung der Temperatur wie folgt berechnet.

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}}{\hat{\theta}} \quad \text{Formel 13}$$

6.5.4 Validierung des Messverfahrens

Die Messergebnisse für die dynamische Wärmekapazität werden mit numerischen Rechenwerten verglichen. Hierfür wird die dynamische Wärmekapazität des Prüfkörpers mithilfe des Wärmebrückenprogramms ANSYS überprüft.

Wenn der Rechenwert der dynamischen Wärmekapazität mit dem Messwert innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmt, gilt das Messverfahren als evaluiert.

7 Berechnungsergebnisse

7.1 Validierung des Rechenverfahrens

7.1.1 Vergleich des analytischen Verfahrens mit dem numerischen Verfahren

Die wirksame Wärmekapazität wird für alle Deckenkonstruktionen, welche in Kapitel 5 beschrieben sind, zum einen nach dem Verfahren der EN ISO 13786 als flächengewichteter Mittelwert der wirksamen Wärmekapazitäten der homogenen Bereiche des Bauteils berechnet und zum anderen mit einem dynamischen Wärmebrückenprogramm simuliert.

In Tabelle 5 ist eine Übersicht der Rechenergebnisse aufgeführt. Dargestellt sind die nach den genannten Verfahren berechneten wirksamen Wärmekapazitäten sowie die Differenzen der Berechnungsergebnisse absolut und in Prozent.

Die Details der Berechnung finden sich im *Bauteilkatalog*, Anlage 2, welcher als Anlage beigefügt wird.

Tabelle 5 : Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität für alle Decken mit dem analytischen Verfahren (LESOSAI) und dem numerischen Verfahren (HEAT 2)

		LESOSAI		HEAT2		Differenz		Differenz	
		wirksame Wärmekapazität		wirksame Wärmekapazität		wirksame Wärmekapazität		wirksame Wärmekapazität	
		K ₁ (unten) kJ/(m ² K)	K ₂ (oben) kJ/(m ² K)	K ₁ (unten) kJ/(m ² K)	K ₂ (oben) kJ/(m ² K)	K ₁ (unten) kJ/(m ² K)	K ₂ (oben) kJ/(m ² K)	K ₁ (unten) %	K ₂ (oben) %
HBV	-	28.57	79.71	28.71	79.88	0.14	0.17	0.49	0.21
	27 MH	20.19	79.66	20.42	80.02	0.23	0.36	1.13	0.45
	70 MH	31.5	79.67	31.65	80.11	0.15	0.44	0.47	0.55
	GFP	32.88	79.66	33.11	79.98	0.23	0.32	0.69	0.40
	GKP	18.14	79.67	18.38	79.99	0.24	0.32	1.31	0.40
BS	-	29.45	77.92	29.41	77.92	0.04	0	0.14	0.00
	27 MH	20.1	77.81	20.06	77.83	0.04	0.02	0.20	0.03
	70 MH	31.45	77.81	31.35	77.86	0.1	0.05	0.32	0.06
	GFP	32.77	77.8	32.76	77.82	0.01	0.02	0.03	0.03
	GKP	18.05	77.81	18.03	77.82	0.02	0.01	0.11	0.01
HKD	-	39.78	80.47	39.83	80.09	0.05	0.38	0.13	0.47
	27 MH	19.79	80.05	19.89	80.1	0.1	0.05	0.50	0.06
	70 MH	31.36	80.01	31.46	80.16	0.1	0.15	0.32	0.19
	GFP	32.41	80.05	32.51	80.07	0.1	0.02	0.31	0.02
	GKP	17.76	80.07	17.86	80.09	0.1	0.02	0.56	0.02
RP	-	20.38	79.86	18.59	79.64	1.79	0.22	9.63	0.28
	27 MH	21.25	79.17	20.88	78.75	0.37	0.42	1.77	0.53
	70 MH	32.68	78.82	31.72	78.37	0.96	0.45	3.03	0.57
	GFP	34.24	79.16	33.74	78.75	0.5	0.41	1.48	0.52
	GKP	18.77	79.18	18.68	78.78	0.09	0.4	0.48	0.51

Aus Tabelle 5 folgt, dass sich die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität auf der Deckenoberseite bei den genannten Rechenverfahren um weniger als 0.5% bei den Holzbetonverbunddecken, um weniger als 0.06 % bei den Brettstapeldecken, um bis zu 0.47 % bei den Hohlkastendecken und um nicht mehr als 0.57% bei den Rippendecken unterscheiden.

Für die Deckenunterseite unterscheiden sich die Werte nach den beiden Verfahren um 1.31 % bei den Holzbetonverbunddecken, um nicht mehr als 0.32 % für die Brettstapeldecke, um bis zu 0.56 % für die Hohlkastendecken und um nicht mehr als 9.63 % bei der Rippendecke.

Hier fällt zunächst auf, dass der Unterschied zwischen den Rechenwerten des analytischen und des numerischen Verfahrens für die Rippendecke ohne Unterdecke für die Deckenunterseite wesentlich grösser ist, als bei allen anderen untersuchten Konstruktionen. Der Grund für diesen grossen Unterschied ist wahrscheinlich, dass diese Deckenkonstruktion die inhomogenste Konstruktion ist.

Dies gilt besonders für die Rippendecke ohne Unterdecke, bei der die Holzbalken unten aus der Verkleidung herausragen. Dadurch entstehen Wärmebrückeneffekte, welche durch die Näherung mit homogenen Bereichen und einem flächengewichteten Mittelwert nach Formel 5 nicht mehr korrekt erfasst werden. Damit zeigt diese Konstruktion auch die Grenzen der Anwendung des Verfahrens nach EN ISO 13786 auf inhomogene Konstruktionen.

Für alle übrigen Deckenkonstruktionen liefern beide Verfahren sehr ähnliche Werte.

Aber auch das Verfahren der flächengewichteten Mittelwerte der dynamischen Wärmekapazität liefert selbst für die inhomogene Deckenkonstruktion der Hohlkastendecke noch erstaunlich präzise Werte, die sich von den exakteren Werte der dynamischen Wärmebrückenberechnung um nicht mehr als 0.56 % unterscheiden.

Für die obere wirksame Wärmekapazität aller Deckenkonstruktionen ergeben die Berechnungen erwartungsgemäss sehr ähnliche Werte. Dies zeigt, dass die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite durch die Zementplatte des schwimmenden Unterlagsbodens bestimmt wird. Da die Dicke dieser Platte bei allen Deckenaufbauten entweder 70 oder 80 mm beträgt und damit nur geringfügig variiert, ändert sich die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite nur in geringem Masse.

Um den Einfluss der Dicke der Estrichplatte auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite zu untersuchen, wurden für die Brettstapeldecke die Werte der wirksamen Wärmekapazität für eine Plattendicke zwischen 30 mm und 110 mm berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt.

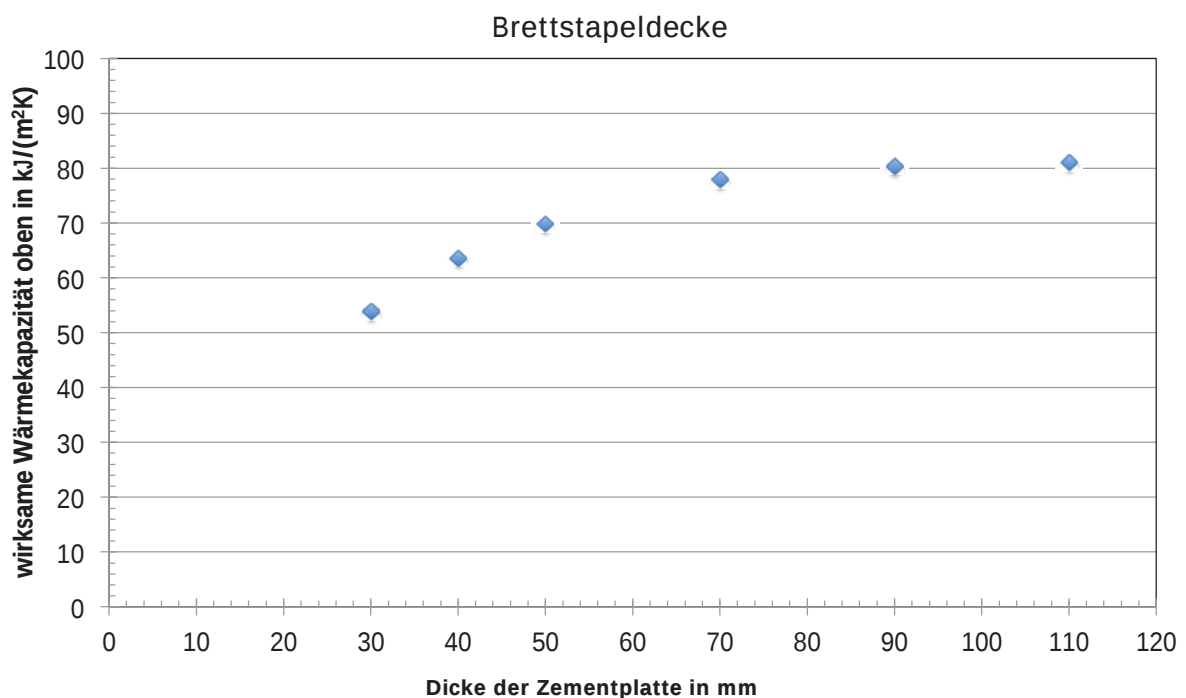


Abbildung 12 : Abhängigkeit der wirksamen Wärmekapazität der Deckenoberseite von der Dicke der Zementplatte des schwimmenden Unterlagsbodens

Diese Abbildung zeigt, dass die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite bei Dicken der Zementplatte von grösser 70 mm in eine Sättigung geht. D. h. dass eine Erhöhung der Dicke der Estrichplatte über diesen Wert keine wesentliche Verbesserung der wirksamen Wärmekapazität mehr erbringt.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird bei der Verwendung einer abgehängten Decke von dieser dominiert. Dies wird erwartungsgemäss durch die sehr ähnlichen Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseiten aller Deckentypen ebenfalls bestätigt.

7.1.2 Vergleich der numerischen Verfahren HEAT 2 und ANSYS

Die Berechnungen der dreidimensionalen Profilierung und mit anisotropen Wärmeleitfähigkeiten des Holzes können nicht mehr mit dem Programm HEAT 2 durchgeführt werden. Hierfür wird das numerische FEM Programm ANSYS, Version 18.1 verwendet.

Daher ist eine weitere Validierung der beiden numerischen Wärmebrückenprogramme erforderlich. Es werden die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseiten einer Brettstapeldecke nach Kapitel 5.2 verwandt:

- eine ebene Brettstapeldecke mit den wärmetechnischen Eigenschaften von *Nutzholz leicht* (500 kg/m^3) nach SN EN ISO 10456 *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchte technische Eigenschaften- deklarierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte*, Ausgabe 2010, Tab. 3
- eine ebene Brettstapeldecke mit den wärmetechnischen Eigenschaften von *Nutzholz schwer* (700 kg/m^3) nach SN EN ISO 10456, Tab. 3
- eine profilierte Brettstapeldecke mit einer Profilierungshöhe von 40 mm mit den wärmetechnischen Eigenschaften von *Nutzholz leicht* (500 kg/m^3) nach SN EN ISO 10456, Tab. 3
- eine profilierte Brettstapeldecke mit einer Profilierungshöhe von 40 mm mit den wärmetechnischen Eigenschaften von *Nutzholz schwer* (700 kg/m^3) nach SN EN ISO 10456, Tab. 3

Die Ergebnisse der Berechnung sind in der nachfolgenden Tabelle und Abbildung 13 zusammengestellt.

Tabelle 6 : Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität für die ebene und profilierte Brettstapeldecke mit Nutzholz leicht und Nutzholz schwer berechnet mit dem numerischen Programmen HEAT 2 und ANSYS.

	$\kappa \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$ HEAT 2	$\kappa \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$ ANSYS	Differenz (kJ/m ² K)	Differenz (%)
Eben Nutzholz leicht	29.6	29.5	0.34	0.34
Eben Nutzholz schwer	37.7	37.5	0.53	0.5
Profiliert Nutzholz leicht	38.7	38.7	0	0
Profiliert Nutzholz schwer	50.5	50.5	0	0

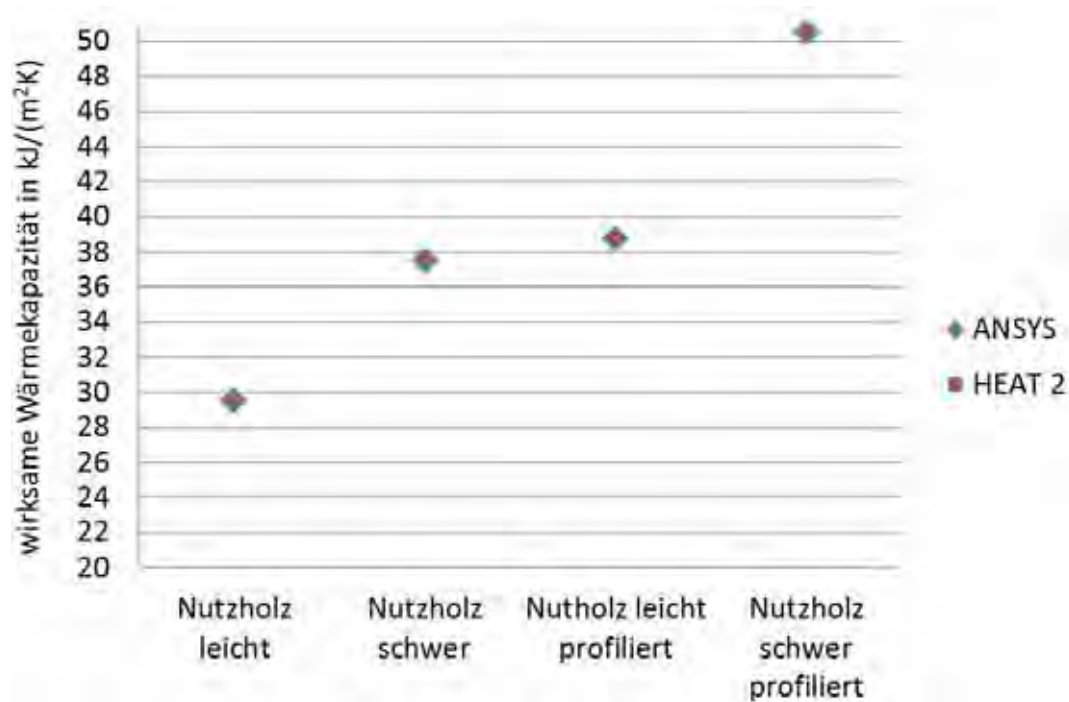


Abbildung 13 : Vergleichsberechnungen der dynamischen Wärmekapazität der Deckenunterseite einer Brettstapeldecke mit den beiden numerischen Programmen HEAT 2 und ANSYS.

Die Berechnungen ergeben eine maximale Abweichung von 0.5 % für die wirksame Wärmekapazität für die Holzart *Nutzholz schwer*. Die Differenz ist für die Holzart *Nutzholz leicht* mit 0,34 % deutlich geringer. Dabei liefert das Programm ANSYS geringere Werte wie das Programm HEAT 2.

Damit ergeben beide Programme innerhalb eines Fehlers von 0.5 % gleiche Werte für die wirksame Wärmekapazität der untersuchten homogenen Aufbauten und können somit als gleichwertig angesehen werden.

7.2 Optimierung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit

Der Einfluss der verschiedenen Maßnahmen zur Verbesserung der wirksamen Wärmekapazität wird für alle vier Deckentypen Brettstapeldecke, Holzbetonverbunddecke, Hohlkastendecke und Rippendecke untersucht.

7.2.1 Einfluss abgehängter Decken

Der Einfluss abgehängter Decken auf die wirksame Wärmekapazität wurde für alle vier Deckensysteme untersucht.

Die wirksame Wärmekapazität der Unterseite der Decken wurde mit dem Programm HEAT 2 berechnet.

7.2.1.1 Materialien

Zunächst wird der Einfluss verschiedener Materialien für die Beplankungen der abgehängten Decken auf die wirksame Wärmekapazität untersucht. Es werden folgende Beplankungen berücksichtigt:

- 27 mm Massivholz isotrop (*Nutzholz leicht* (500 kg/m³) nach SN EN ISO 10456, Tab. 3)

- 70 mm Massivholz isotrop (*Nutzholz leicht* (500 kg/m³) nach SN EN ISO 10456, Tab. 3)
- doppelte Beplankungen aus 2x15 mm dicken Gipsfaserplatten
- doppelte Beplankungen aus 2x12,5 mm dicken Gipskartonplatten

Die Ergebnisse sind mit den Aufbauten in der Anlage 2 des *Bauteilkatalogs*, der als Anlage beigefügt ist, beschrieben.

Es zeigt sich, dass die wirksame Wärmekapazität abgehängter Decken nur geringfügig von dem darüber liegenden Deckensystem beeinflusst wird.

Die geringste wirksame Wärmekapazität ergibt sich für die Gipskartonbeplankung $\kappa = 18 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$, die grösste für die Gipsfaserplatten mit $\kappa = 35 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$, gefolgt von 70 mm Massivholz mit $\kappa = 32 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$.

7.2.1.2 Anisotropie von Holz

Darüber hinaus wurde auch der Einfluss der Orientierung des Holzes und damit der Anisotropie der Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Holzarten für die Beplankungen abgehängter Decken untersucht.

In der nachfolgenden Abbildung wird der Aufbau der Beplankung der abgehängten Decke in Prinzipskizzen dargestellt. Angegeben sind die Dicken der Beplankung in Millimeter sowie die Orientierung des Holzes. Die Abkürzung L steht für die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Holzes in longitudinaler Richtung. Die Abkürzung R steht für die Wärmeleitfähigkeit des Holzes in radialer Richtung. Die jeweils erste Abkürzung ist die Orientierung des Holzes in horizontaler Richtung, die jeweils zweite Abkürzung gibt die Orientierung des Holzes in vertikaler Richtung an.

Darüber hinaus wird auf den abgehängten Decken jeweils eine 50 mm dicke Auflage aus Mineralwolle für die Berechnung angenommen. Damit hat die darüber liegende Decke nur einen geringen Einfluss auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite.

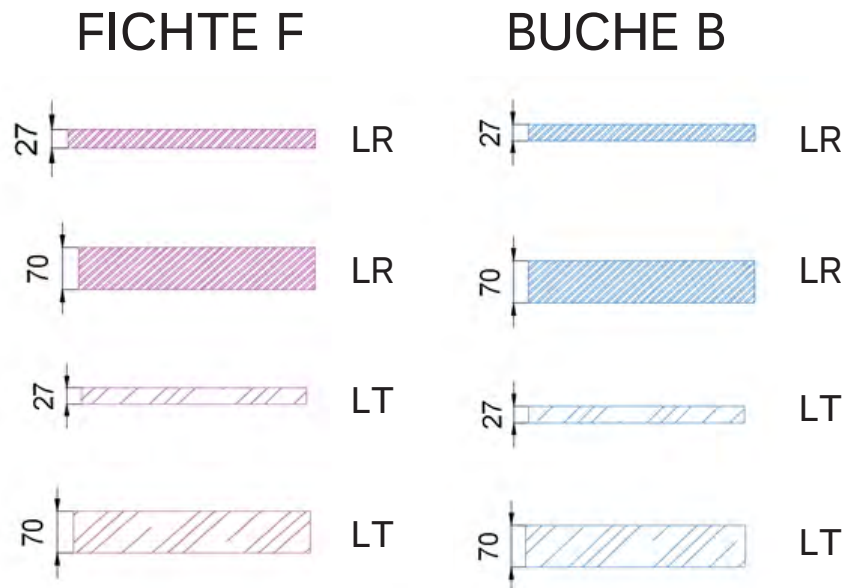


Abbildung 14 : Eigenschaften der Beplankung der abgehängten Decken unter der Brettstapeldecke. Die Abkürzung L steht für die Wärmeleitfähigkeit in longitudinaler Richtung; die Abkürzung R für die Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung und die Abkürzung T für die Wärmeleitfähigkeit in transversaler Richtung.

Die Ergebnisse sind mit den Aufbauten in der Anlage 3.2 des *Bauteilkatalogs*, der als Anlage beigefügt ist, beschrieben.

Die Berechnungsergebnisse der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in der nachfolgenden Abbildung 15 zusammengefasst.

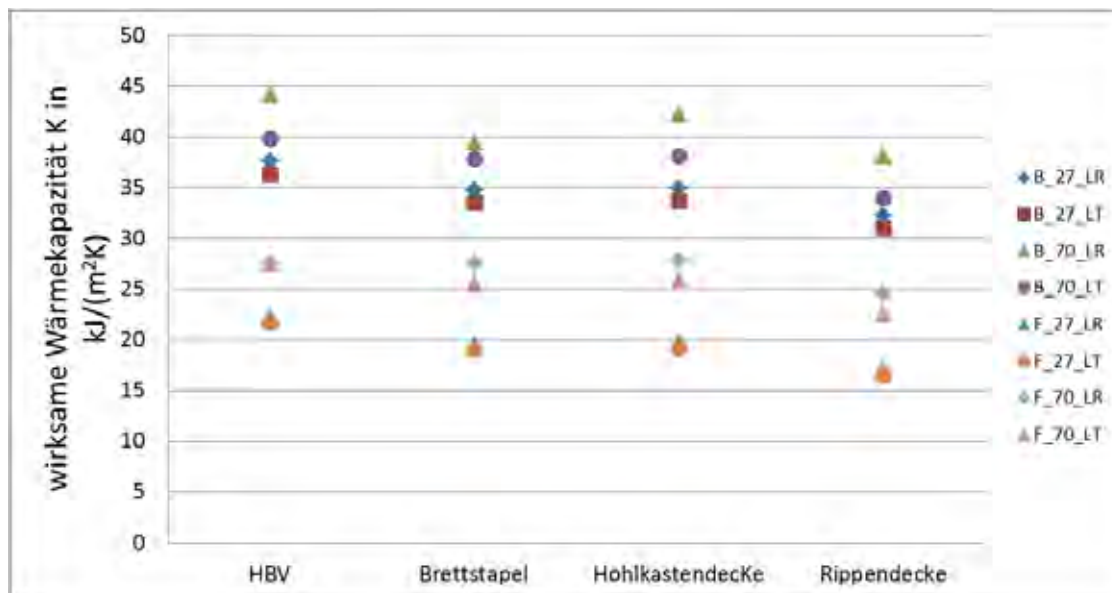


Abbildung 15 : Einfluss der Dicke der Beplankung der abgehängten Decke und der Holzorientierung für die vier Deckensysteme.

Abbildung 15 demonstriert zunächst, dass eine 70 mm dicke Beplankung höhere Werte für die wirksame Wärmekapazität ergibt, als eine 27 mm dicke Beplankung.

Beplankungen aus Buche ergeben höhere Werte für die wirksame Wärmekapazität der abgehängten Decke als Beplankungen aus Fichtenholz.

Der Einfluss der Dicke der Beplankung und der Holzsorte auf die wirksame Wärmekapazität sind damit größer als der Einfluss der Orientierung des Holzes.

7.2.2 Brettstapeldecke

7.2.2.1 Einfluss verschiedener Holzarten und ihrer Anisotropie.

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

Hierfür wurde mit dem Programm Heat 2 die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite einer Brettstapeldecke berechnet. Die wärmetechnischen Eigenschaften der Holzarten werden Tabelle 4 entnommen. Dies gilt auch für die anisotropen Wärmeleitfähigkeiten. Die Normwerte für die isotropen Wärmeleitfähigkeiten wurden der SN EN ISO 10456, Ausgabe 2010 entnommen.

Die Ergebnisse sind mit den Aufbauten in der Anlage 3.1 des *Bauteilkatalogs*, der als Anlage beigefügt ist, beschrieben.

Für Fichte ergeben sich Werte für die wirksame 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 wieder ein grösserer Einfluss der Holzart auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite als der Holzorientierung. Abbildung 16 zeigt die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von Brettstapeldecken in Abhängigkeit der Holzarten Fichte, Buche und Eiche.

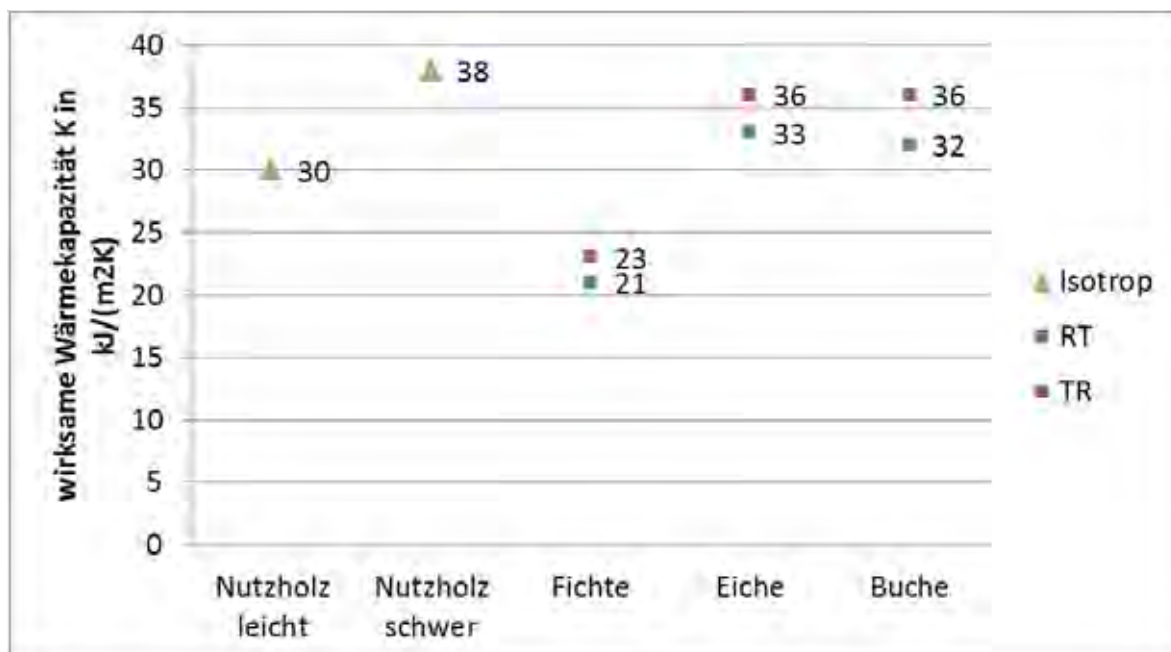


Abbildung 16 : Wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von Brettstapeldecken in Abhängigkeit der Holzarten Fichte, Buche und Eiche.

Bei genauer Betrachtung von Abbildung 16 erkennt man, dass sich für die Holzart Buche ein höherer Wert für die wirksame Wärmekapazität der Brettstapeldecke bei der Verwendung des Normwertes *Nutzholz leicht* für die Wärmeleitfähigkeit des Holzes ergibt.

Berücksichtigt man die Anisotropie des Holzes, so führt dieses zu einer Verringerung der wirksamen Wärmekapazität der Unterseite der Brettstapeldecke. 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 Verringerung sind die geringeren Werte der Wärmeleitfähigkeit in transversaler und radialer Richtung, verglichen mit den Normwerten.

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

7.2.3 Profilierung der Deckenunterseiten

Durch die Profilierung der Deckenunterseiten wird die Oberfläche des Bauteils und damit die wirksame Wärmekapazität erhöht. Für die Profilierung der Deckenunterseite wurden sowohl die Wirkung zweidimensionaler Profilierungen, als auch die von dreidimensionalen Profilierungen auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit untersucht.

7.2.3.1 Zweidimensionale Profilierung

Als Maßstab für die Vergrößerung der Oberfläche der Deckenunterseite dient das Verhältnis der Abwicklungslänge l zur Elementbreite b . In Abbildung 9 sind diese beiden Größen für eine Hohlkastendecke in einer Prinzipskizze dargestellt, welche sinngemäss auf die Profilierung der Brettstapeldecke angewandt werden.

Die Berechnungen zum Einfluss der Oberflächenvergrößerung der Deckenunterseite auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit wurden mit den isotropen Normwerten der SN 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.

Die Ergebnisse sind mit den Aufbauten in der Anlage 4 des *Bauteilkatalogs*, der als Anlage beigefügt ist, zusammengefasst.

Die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite als Funktion der Oberflächenvergrößerung in Form des Verhältnisses der Abwicklungslänge zur Elementbreite sind in Abbildung 17 dargestellt.

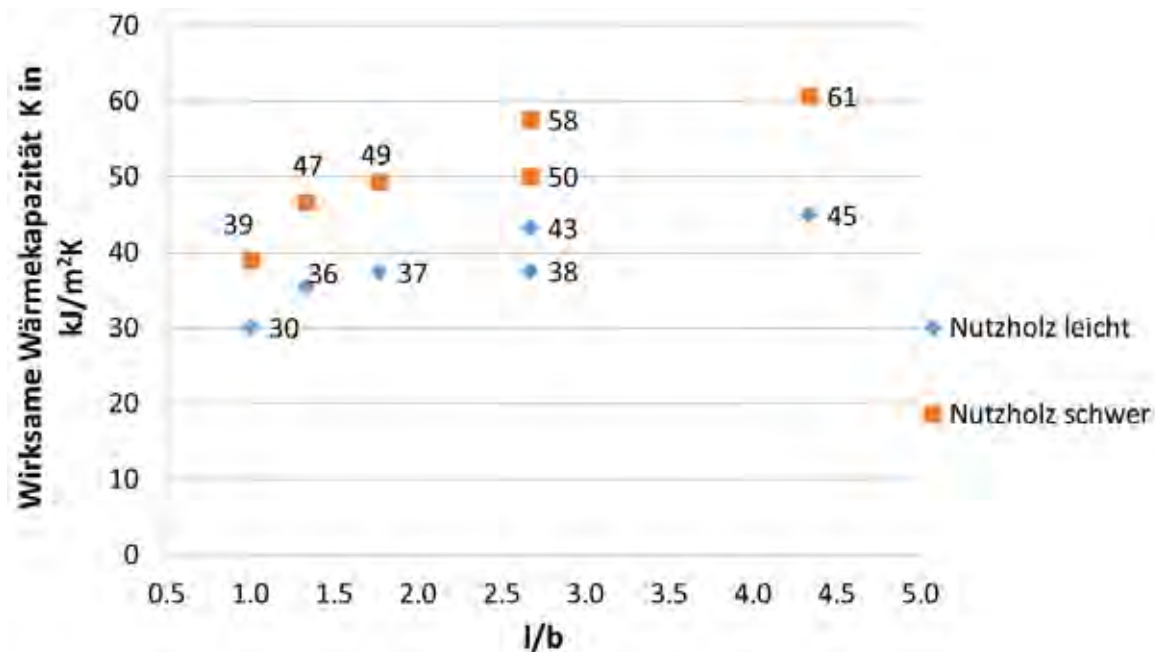


Abbildung 17: Einfluss der Oberflächenvergrößerung der Deckenunterseite auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite

Abbildung 17 zeigt, dass durch die Oberflächenvergrößerung bei *schweren Nutzholz*, was etwa Buche oder Eiche entspricht, die wirksame Wärmekapazität von 39 kJ/(m²K) auf 61 kJ/(m²K) gesteigert werden kann.

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

7.2.3.2 Dreidimensionale Profilierungen

Die Berechnung des Einflusses dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird mit dem Finite Elemente Programm ANSYS, Version 18.1 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 4 entnommen.

Der Aufbau der Brettstapeldecke entspricht dem Grundaufbau, der in Kapitel 5.2 beschrieben wurde.

Es werden drei unterschiedliche Profilierungen untersucht:

- Lattenrost
- Würfel
- Kassettendecke

7.2.3.2.1 Lattenrost

Die nachfolgende Abbildung 18 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
- F Breite des Zwischenraumes zwischen den Brettern

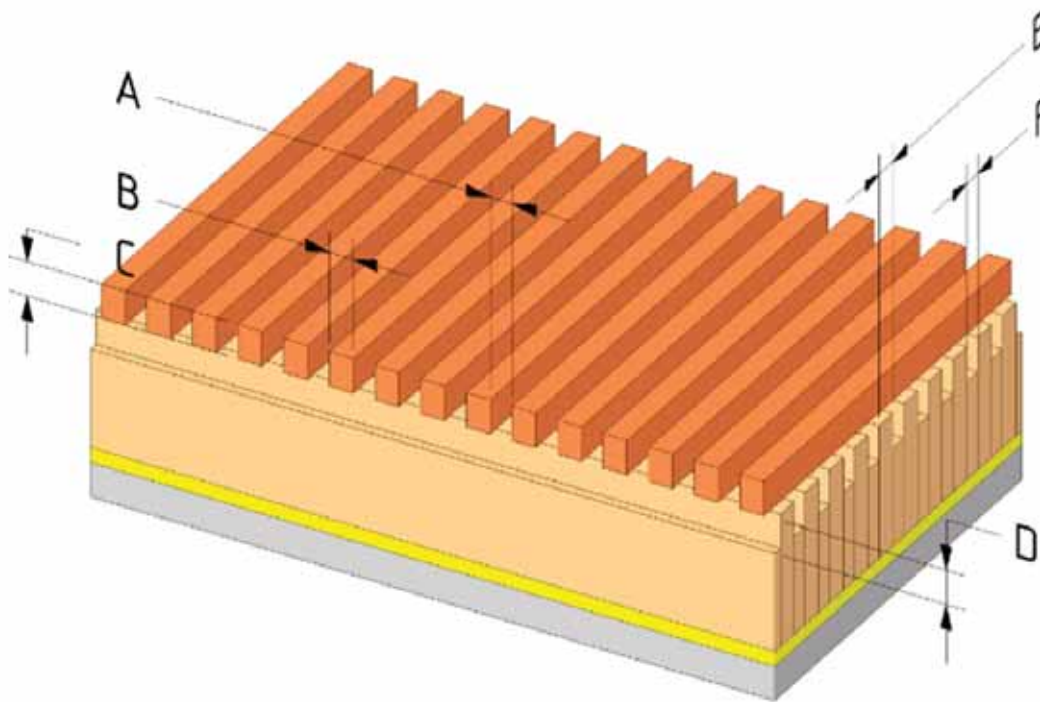


Abbildung 18: Perspektivische Darstellung der Deckenprofilierung mit einem Lattenrost. Die Abkürzungen stehen für folgende geometrische Eigenschaften: A für den Abstand zwischen den Latten, B für die Lattenbreite, C für die Höhe der Latten, D für die Profiltiefe, E für die Breite der überstehenden Bretter und F für die Breite des Zwischenraums 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.

Für die Optimierung wird das Programm ANSYS benutzt, welches sogenannte Antwortflächen erstellt. Diese Antwortflächen stellen den zu berechnenden Parameter, in diesem Falle die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite, als Funktion mehrerer Parameter dar. Durch Vorgabe der zu variierenden Parameter der Geometrie und des Bereiches, in dem diese Parameter variiert werden sollen, berechnet das Programm eine Vielzahl von Parameterkombinationen und ermöglicht so das effiziente Auffinden des optimalen Parametersatzes für die Geometrie.

In Abbildung 19 wird das Berechnungsergebnis für die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite als Funktion zweier Parameter für die Holzart Buche

dargestellt. Um die Optimierung auf zwei Parameter zu begrenzen, mussten die zusätzlichen Bedingungen

- Lattenhöhe C = Profiltiefe D und
- Abstand zwischen den Latten A = Lattenbreite B = Breite der überstehenden Bretter oder Lamellen E = Breite des Zwischenraums zwischen den Brettern F gewählt werden.

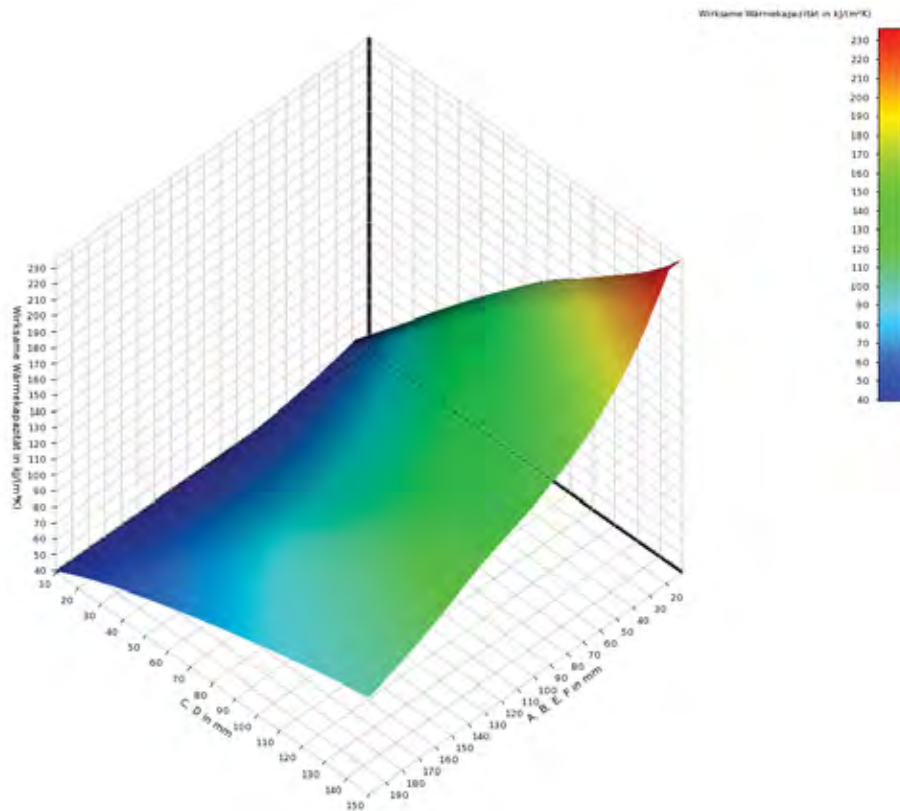


Abbildung 19: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Lattenrost in Abhängigkeit der Geometrieparameter Lattenhöhe C bzw. Profilüberstand D und Abstand der Latten A , Lattenbreite B , Breite der überstehenden Lamellen E und Breite des Zwischenraums F für die Holzart Buche.

In Abbildung 19 ist zu erkennen, dass die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite für möglichst schmale Latten und Profile und möglichst große Höhen der Latten und der überstehenden Bretter (Profilüberstand) maximale Werte erreicht.

In der folgenden Abbildung 20 sind die Optimierungsergebnisse für die Holzart Fichte dargestellt.

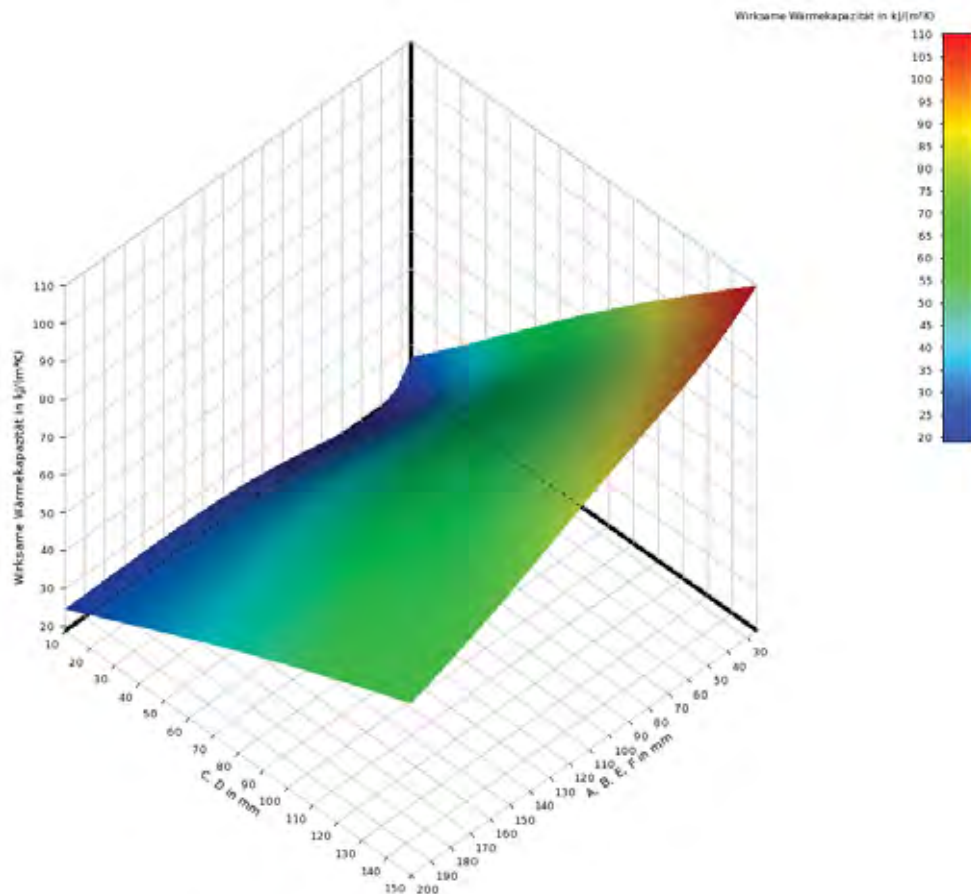


Abbildung 20: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Lattenrost in Abhängigkeit der Geometrieparameter Lattenhöhe C bzw. Profilüberstand D und Abstand der Latten A, Lattenbreite B, Breite der überstehenden Lamellen E und Breite des Zwischenraums F für die Holzart Fichte.

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite für möglichst schmale Latten und Profile und möglichst große Höhen der Latten und des Profilüberstands auch für die Holzart Fichte maximale Werte erreicht.

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.

Der Parametersatz der Geometrie für diese optimale wirksame Wärmekapazität ist in der folgenden Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Optimaler Parametersatz für die dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite mit Lattenrost für die Holzsorten Buche und Fichte.

	Beispiel Buche [mm]	Beispiel Fichte [mm]
A: Raum zwischen dem Rost	22	22
B: Breite des Rostes	50	32
C: Überstand des Rostes	70	145
D: Profiltiefe	70	160
E: Dicke der überstehenden Lamellen	50	46
F: Breite des Zwischenraumes	40	16

Ein Blick auf Tabelle 7 zeigt, dass die enorme Steigerung der wirksamen Wärmekapazität nur aufgrund der großen Oberflächenvergrößerung zustande kommt.

Dies bedeutet aber, dass die Dicke der Decke um den Überstand des Rostes und die Profiltiefe erhöht werden muss. 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 optimal für die wirksame Wärmekapazität 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 untersucht, wie sich eine reduzierte Belüftung der Oberflächen 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 höher der raumseitige Wärmeübergangswiderstand wird. Die Ergebnisse dieser Variation des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands für die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in der nachfolgenden Abbildung 21 dargestellt.

Aus dieser Grafik wird ersichtlich, dass durch eine Erhöhung des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands von $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ auf $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ 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 reduziert. 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 %.

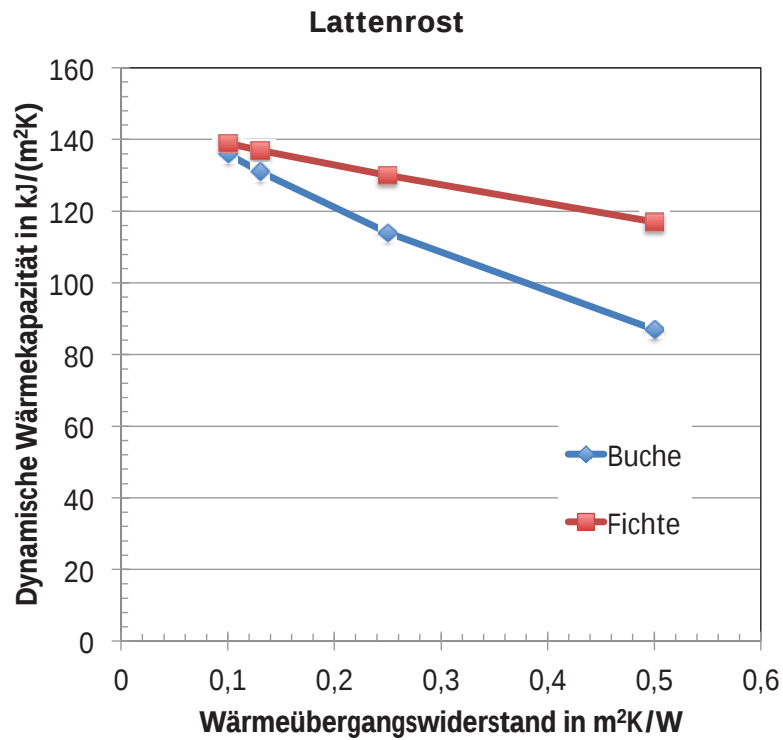


Abbildung 21: Einfluss des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Holzarten Buche und Fichte bei dreidimensionaler Profilierung mit einem Lattenrost

7.2.3.2.2 Würfel

Die zweite Geometrie der dreidimensionalen Profilierung besteht aus Würfeln. Die Abbildung enthält eine perspektivische Darstellung der Profilierung der Deckenunterseite. Die Geometrie ist durch folgende Parameter gekennzeichnet:

- A, D die Würfelbreite
- B, E der Spalt zwischen den Würfeln
- C der Überstand oder die Höhe des Würfels

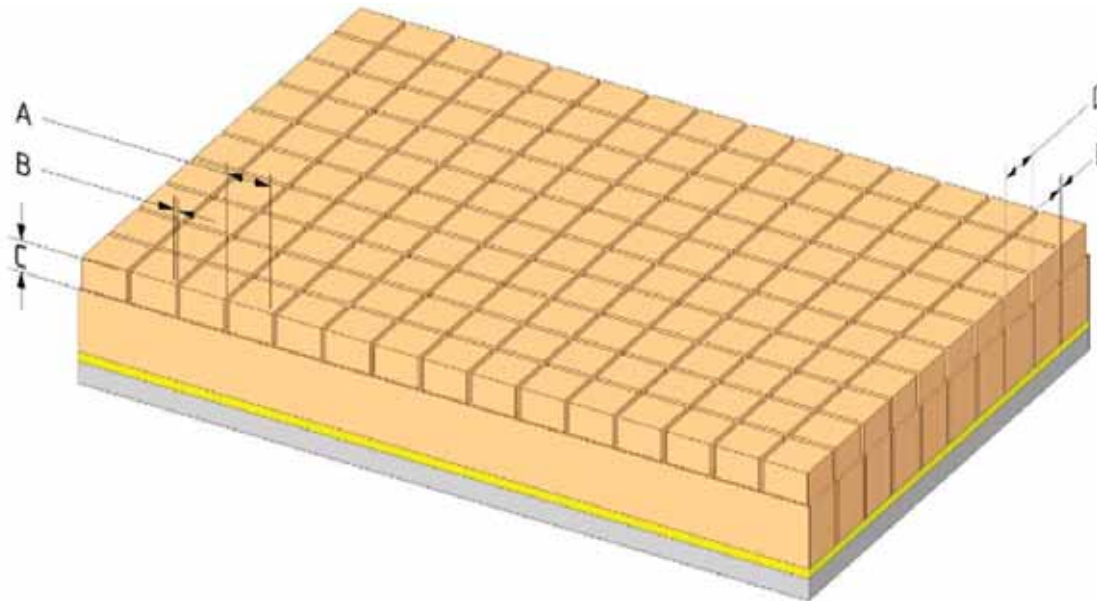


Abbildung 22: perspektivische Darstellung der würfelförmigen Profilierung. Die Abkürzungen A und B stehen für die Würfelbreite, B und E für die Spaltbreite zwischen den Würfeln, C für die Höhe der Würfel.

Auch für die Optimierung der Geometrie der zweiten dreidimensionalen Profilierung der Deckenunterseite mit Würfeln wurden die Optimierungsfunktionen von ANSYS verwendet.

Auch für diese Profilierung werden beispielhaft die Ergebnisse der Optimierung der wirksamen Wärmekapazität als Funktion zweier Parameter für die Holzart Buche und Fichte dargestellt. Auch für diesen Optimierungsschritt mussten die Parameter mit folgender Bedingung eingeschränkt werden:

- Spaltbreite B = der Würfelbreite E

In Abbildung 22 wird das Berechnungsergebnis für die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite als Funktion zweier Parameter für die Holzart Buche dargestellt.

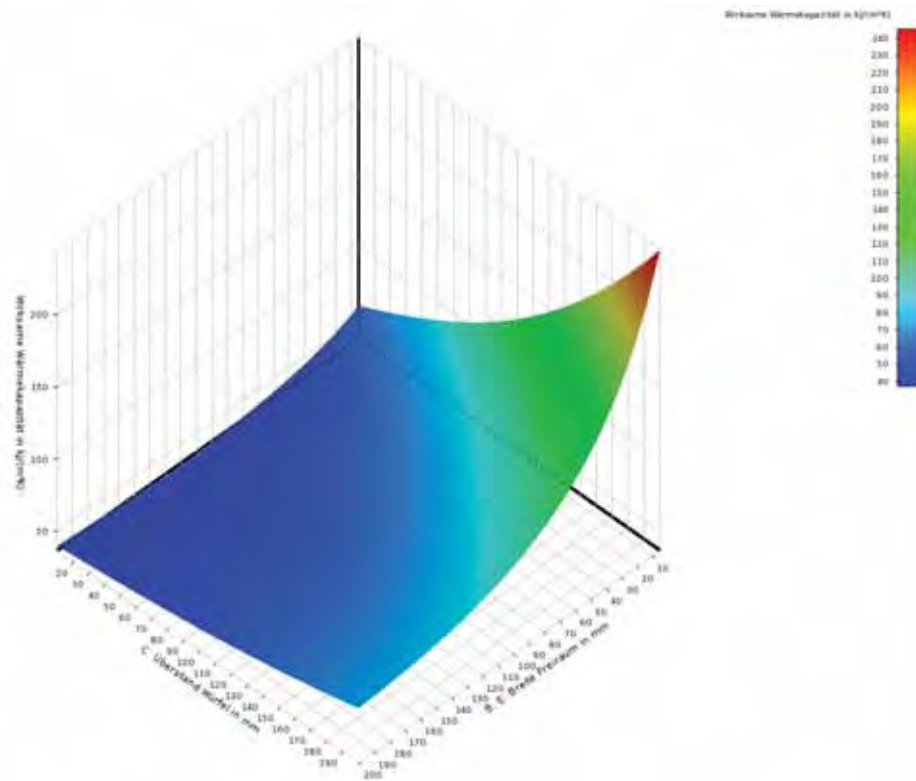


Abbildung 23: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Würfel in Abhängigkeit der Geometrieparameter Würfelhöhe C und Würfelbreite B bzw. Spaltbreite E für die Holzart Buche.

In Abbildung 23 ist zu erkennen, dass die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite für möglichst schmale und hohe Würfel in geringem Abstand maximale Werte erreicht.

In der folgenden Abbildung 24 sind die Optimierungsergebnisse für die Holzart Fichte dargestellt.

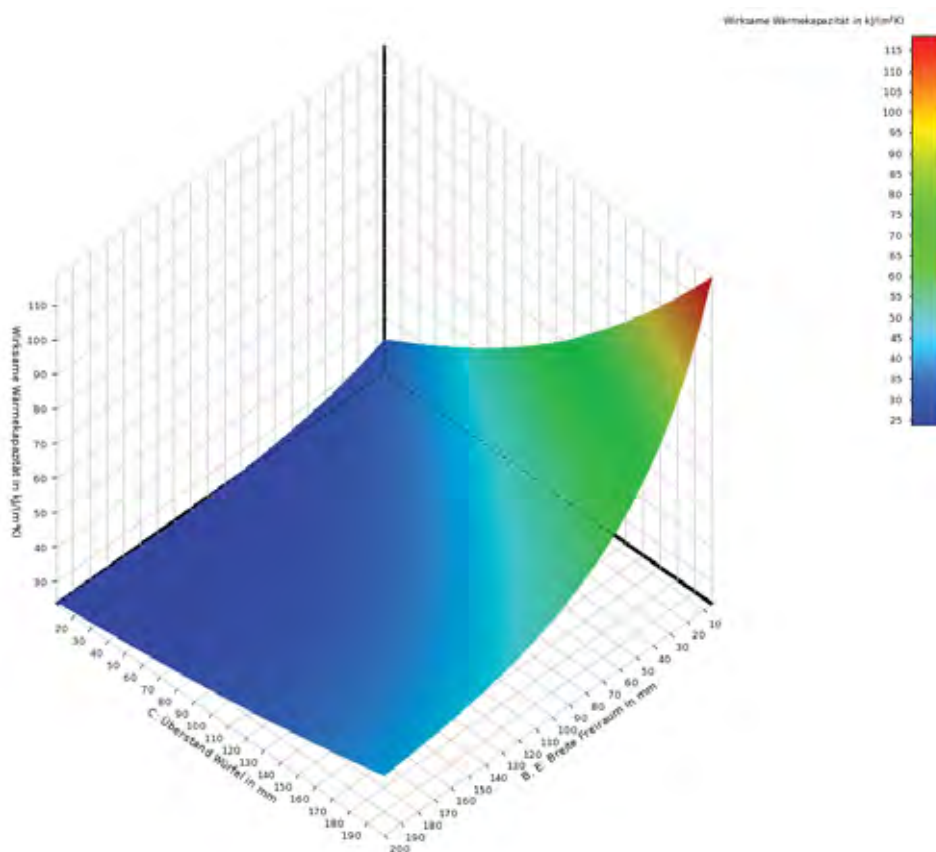


Abbildung 24: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Würfel in Abhängigkeit der Geometrieparameter Würfelhöhe C und Würfelbreite B bzw. Spaltbreite E für die Holzart Fichte.

In Abbildung 24 ist zu erkennen, dass auch für Fichte die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite für möglichst schmale und hohe Würfel in geringem Abstand maximale Werte erreicht.

Mit der Optimierung konnte eine wirksame Wärmekapazität von $110 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für Buche und von $103 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für Fichte für die Deckenunterseite der Brettstapeldecke erzielt werden.

Der Parametersatz der Geometrie für diese optimale wirksame Wärmekapazität ist in der folgenden Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Optimaler Parametersatz für die dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite mit Würfeln für die Holzsorten Buche und Fichte.

	Beispiel Buche [mm]	Beispiel Fichte [mm]
A: Länge des Würfels	90	90
B: Raum zwischen den Würfeln längs	8	8
C: Überstand des Würfels	90	180
D: Breite des Würfels	90	90
E: Raum zwischen den Würfeln quer	8	8

Ein Blick auf Tabelle 8 zeigt auch für diese Profilierung, dass die enorme Steigerung der wirksamen Wärmekapazität nur aufgrund der hohen Oberflächenvergrößerung zustande kommt.

Dies bedeutet aber, dass die Dicke der Decke um den Überstand der Würfel erhöht werden muss. Dies führt im Falle der Buche zu einer Erhöhung der Deckenstärke um 90 mm und im Falle der Fichte sogar zu einer Erhöhung der Deckenstärke von 180 mm.

Darüber hinaus hat die Berechnung ergeben, dass relativ kleine Spaltbreiten zwischen den Würfeln optimal für die wirksame Wärmekapazität sind. Daher muss auch hier die Frage gestellt werden, ob bei solch kleinen Spaltbreiten nicht die Belüftung der Oberflächen und somit der Wärmestrom durch diese Oberflächen reduziert wird.

Daher wird auch für die dreidimensionale Profilierung mit Würfeln untersucht, wie sich eine reduzierte Belüftung der Oberflächen auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite auswirken würde. Hierzu wird der raumseitige Wärmeübergangswiderstand ebenfalls zwischen $R_{si} = 0,1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ und $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ variiert. Die Ergebnisse dieser Variation des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands für die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in der Abbildung 25 dargestellt.

Aus dieser Grafik wird ersichtlich, dass durch eine Erhöhung des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands von $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ auf $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ sich die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von $110 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $71 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also um 35 % für die Holzart Buche reduziert. Die Reduzierung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite fällt für die Holzart Fichte geringer aus: sie reduziert sich von $103 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $85 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also lediglich um 17 %.

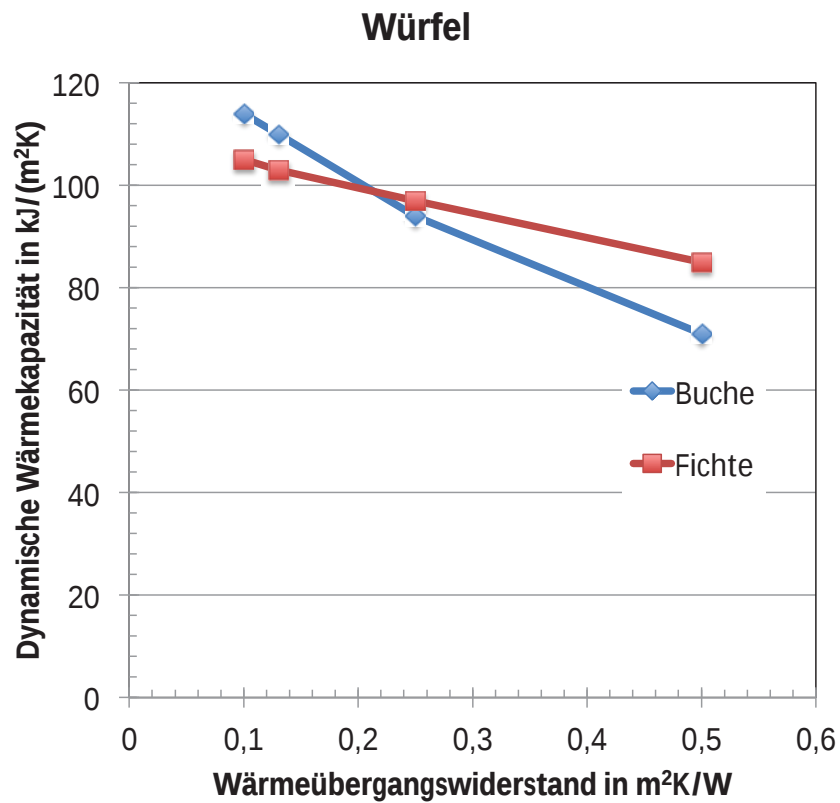


Abbildung 25: Einfluss des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Holzarten Buche und Fichte bei dreidimensionaler Profilierung mit Würfeln

7.2.3.2.3 Kassettendecke

Die dritte dreidimensionale Profilierungsart der Deckenunterseite der Brettstapeldecke stellt eine Kassettendecke dar.

Abbildung 26 enthält eine perspektivische Darstellung dieser dreidimensionalen Profilierung. Die Abkürzungen bezeichnen folgende Parameter der Geometrie:

- A die Dicke der Querrippe
- B die Länge der Kassette
- C die Dicke der Längsrippe
- D die Breite der Kassette
- E der Überstand oder die Höhe der Kassette

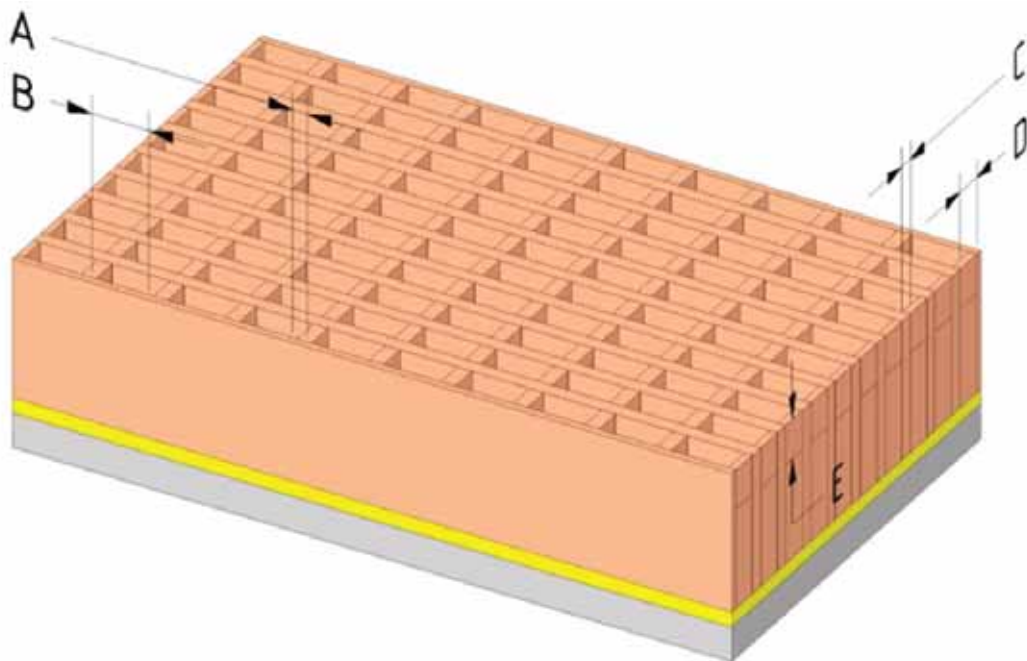


Abbildung 26: perspektivische Darstellung der Geometrie der Kassettendecke. Die Abkürzungen stehen für folgende Parameter der Geometrie: A für die Dicke der Querrippe, B für die Länge der Kassette, C für die Dicke der Längsrippe, D für die Breite der Kassette und E für den Überstand oder die Höhe der Kassette

Auch diese dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite wurde mit den Optimierungsfunktionen des Programms ANSYS in Bezug auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite optimiert.

Wiederum werden beispielhaft die Ergebnisse der Optimierung der wirksamen Wärmekapazität als Funktion zweier Parameter für die Holzart Buche und Fichte dargestellt. Für diesen Optimierungsschritt mussten die Parameter mit folgender Bedingung eingeschränkt werden:

- Dicke der Querrippe A = Länge der Kassette B = Dicke der Längsrippe C = Breite der Kassette D

In Abbildung 27 wird das Berechnungsergebnis für die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite als Funktion zweier Parameter für die Holzart Buche dargestellt.

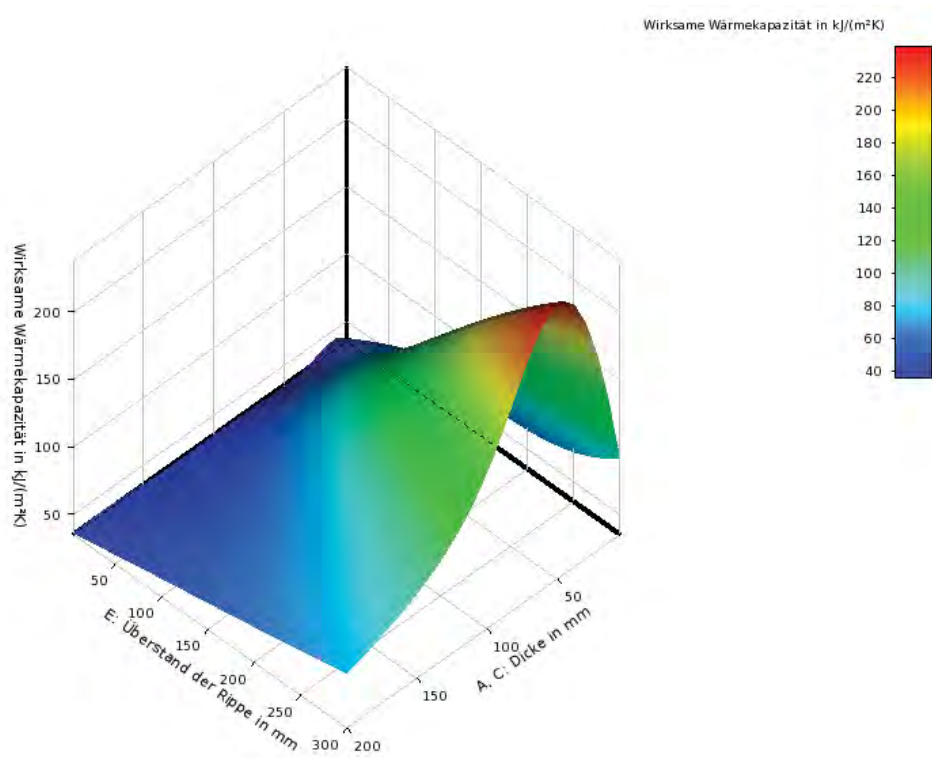


Abbildung 27: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Kassette in Abhängigkeit der Geometrieparameter Kassettenhöhe E und Kassettenbreite B, D und Kassettenwandstärke A, C für die Holzart Buche.

In Abbildung 27 ist zu erkennen, dass die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite für möglichst hohe Kassetten ein Optimum erreicht. Allerdings gibt es eine optimale Breite der Kassette bzw. der Kassettenwand.

In der folgenden Abbildung 28 sind die Optimierungsergebnisse für die Holzart Fichte dargestellt.

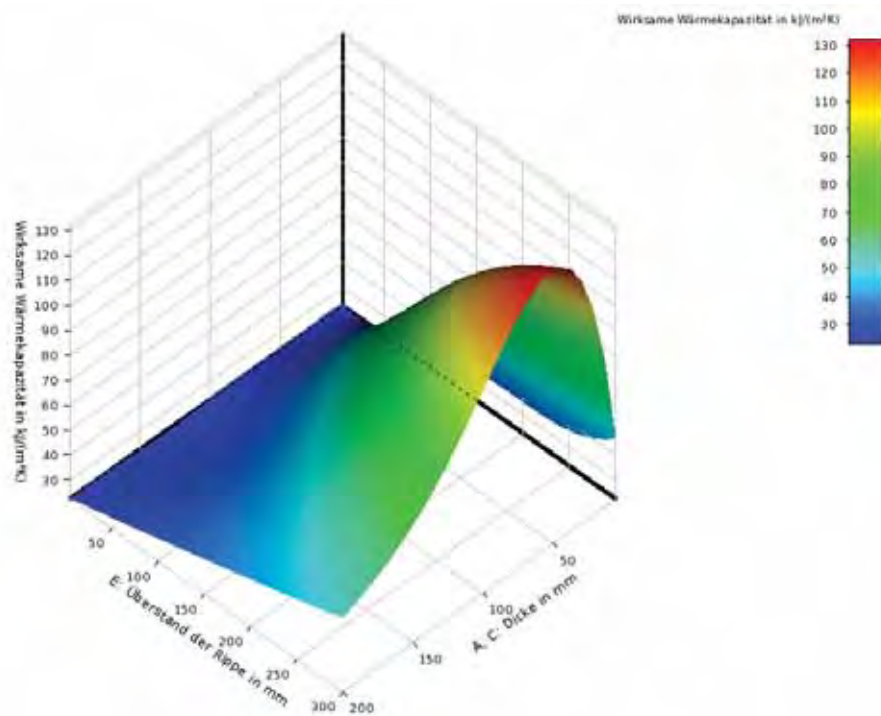


Abbildung 28: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Kassette in Abhängigkeit der Geometrieparameter Kassettenhöhe E und Kassettenbreite B, D und Kassettenwandstärke A, C für die Holzart Fichte.

In Abbildung 28 ist zu erkennen, dass die wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite für möglichst hohe Kassetten ein Optimum erreicht. Allerdings gibt es auch für die Holzart Fichte eine optimale Breite der Kassette bzw. der Kassettenwand.

Mit der Optimierung konnte eine wirksame Wärmekapazität von $114 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für Buche und von $118 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für Fichte für die Deckenunterseite der Brettstapeldecke erzielt werden.

Der Parametersatz für diese optimale wirksame Wärmekapazität ist in der folgenden Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Optimaler Parametersatz für die dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite mit Kassetten für die Holzsorten Buche und Fichte.

	Beispiel Buche[mm]	Beispiel Fichte [mm]
A: Dicke der Querrippe	30	30
B: Länge der Kassette	60	60
C: Dicke der Längsrippe	30	30
D: Breite der Kassette	60	60
E: Überstand der Rippe	125	300

Ein Blick auf Tabelle 9 zeigt auch für diese Profilierung, dass die enorme Steigerung der wirksamen Wärmekapazität nur aufgrund der hohen Oberflächenvergrößerung zustande kommt.

Dies bedeutet aber, dass die Dicke der Decke um den Überstand des Kassetten erhöht werden muss. Dies führt im Falle der Buche zu einer Erhöhung der Deckenstärke um 125 mm und im Falle der Fichte sogar zu einer Erhöhung der Deckenstärke von 300 mm.

Darüber hinaus ergibt auch hier die Berechnung, dass relativ kleine Dimensionen der Kassetten optimal für die wirksame Wärmekapazität sind. Daher wird auch hier die Frage gestellt, ob bei solch kleinen Kassetten nicht die Belüftung der Oberflächen und somit der Wärmestrom durch diese Oberflächen reduziert wird.

Daher wird auch für die dreidimensionale Profilierung mit Kassetten untersucht, wie sich eine reduzierte Belüftung der Oberflächen auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite auswirken würde. Hierzu wird wieder 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 Ergebnisse dieser Variation des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands für die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in der Abbildung 29 dargestellt.

Aus dieser Grafik wird ersichtlich, dass durch eine Erhöhung des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands von $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ auf $R_{si} = 0,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ sich die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von $114 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $77 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also um 32 % für die Holzart Buche reduziert. Die Reduzierung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite fällt für die Holzart Fichte geringer aus: sie reduziert sich von $118 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$ auf $101 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \text{ K})$, also lediglich um 14 %.

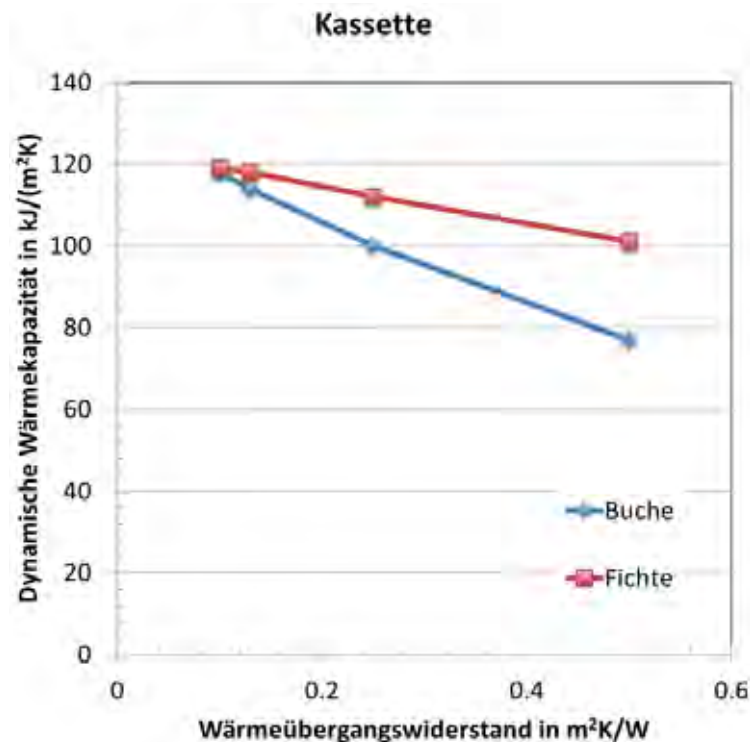


Abbildung 29: Einfluss des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Holzarten Buche und Fichte bei dreidimensionaler Profilierung mit Kassetten

7.2.4 Weitere Profilierungsgeometrien

Es werden nun für fünf unterschiedliche Profilierungsgeometrien, unter Berücksichtigung einer minimalen Deckenaufbauhöhe, ein optimierter Parametersatz mit der entsprechenden wirksamen Wärmekapazität beschrieben.

Dabei werden neben den bisher verwandten Profilierungsgeometrien Lattenrost, Würfel und Kassette zusätzlich eine Doppelprofilierung und eine Trapezgeometrie untersucht.

Die Doppelprofilierung besteht aus einer Profilierung, welche durch herausstehende Bretter der Brettstapeldecke gebildet wird und einer dazu senkrecht verlaufende Profilierung der Bretter selbst.

Diese Trapezprofilierung besteht aus einer zweidimensionalen Profilierung mit trapezförmigem Querschnitt.

Diese Profilierung wurde dreidimensional berechnet, um auch den Einfluss der longitudinalen Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Profilierungsebene berücksichtigen zu können

Der geometrische Aufbau ist dem Kapitel 4.3.2 folgende des *Bauteilkatalogs*, welcher als Anlage beigefügt ist, zu entnehmen.

Die Rechenergebnisse für die wirksame Wärmekapazität finden sich in Anlage 5 des *Bauteilkatalogs*.

Es ergeben sich für die Holzbetonverbunddecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von 29 kJ/(m²K) auf 42 kJ/(m²K) bis 49 kJ/(m²K) für Fichte, also Steigerungen zwischen 48 % und 69 %.

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 kJ/(m²K) auf 42 kJ/(m²K) bis 49 kJ/(m²K) für Fichte, also Steigerungen zwischen 91 % und 123 %.

Es ergeben sich für die Hohlkastendecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von 26 kJ/(m²K) auf 37 kJ/(m²K) bis 48 kJ/(m²K) für Fichte, also Steigerungen zwischen 42 % und 85 %.

Es ergeben sich für die Rippendecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von 36 kJ/(m²K) auf 45 kJ/(m²K) bis 61 kJ/(m²K) für Fichte, also Steigerungen zwischen 25 % und 69 %.

8 Messung der wirksamen Wärmekapazität

Im Rahmen des Projektes soll ein Messverfahren zur Bestimmung der wirksamen Wärmekapazität entwickelt werden.

Die Messung wird in einem Prüfstand zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkasten (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1:2010 durchgeführt.

8.1 Ebene Brettstapeldecke

Die Messungen erfolgen zunächst mit einer ebenen Brettstapeldecke mit folgendem Aufbau

- 152 mm Brettstapeldecke
- 7 mm OSB Platte auf der Warmseite

Mit diesem Prüfkörper werden zwei Messungen durchgeführt: die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten mit stationären Temperaturrandbedingungen und eine Messung der wirksamen Wärmekapazität mit sinusförmigen Temperaturrandbedingungen auf der Kaltseite.

8.1.1 Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten erfolgt für drei Mitteltemperaturen 5 °C, 10 °C, und 15 °C. Es ergeben sich folgende Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Prüfkörpers:

- $U = (0,56 \pm 0,017) \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für die Mitteltemperatur 5° C
- $U = (0,57 \pm 0,017) \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für die Mitteltemperatur 10° C
- $U = (0,55 \pm 0,016) \text{ W/(m}^2\text{K)}$ für die Mitteltemperatur 15° C

Die Einzelheiten der Messung finden sich im Messbericht *Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Brettstapeldecke in Anlehnung an SN EN 12567-1 und SN EN ISO 8990*, der als Anlage beigefügt ist.

Berechnet man den Wärmedurchgangskoeffizienten des Prüfkörpers nach folgender Formel

$$U = \frac{1}{R_{Si} + R_T + R_{Se}} \quad \text{Formel 14}$$

$$= \frac{1}{R_{Si} + \frac{s_{BS}}{\lambda_{BS}} + \frac{s_{OSB}}{\lambda_{OSB}} + R_{Se}}$$

Dabei bezeichnet

- R_{Si} den Wärmeübergangskoeffizienten auf der Kaltseite
- R_{Se} den Wärmeübergangskoeffizienten auf der Warmseite
- s_{BS} die Dicke des Brettstapels
- λ_{BS} die effektive Wärmeleitfähigkeit des Brettstapels
- s_{OSB} die Dicke der OSB Platte
- λ_{OSB} die Wärmeleitfähigkeit der OSB Platte

und nimmt für die Wärmeleitfähigkeit des Brettstapels eine effektive Wärmeleitfähigkeit von 0,10 W/(m K) an, so ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von

$$U = 0,57 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Damit ist das Messergebnis innerhalb der Fehlergrenzen mit einem Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit für Fichte verträglich, der niedriger ist als der Wert nach SN EN ISO 10456 für Nutzholz mit einer Rohdichte von 450 kg/m³ von 0,12 W/(m K).

8.1.2 Messung der wirksamen Wärmekapazität

Für die Messung der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke wird auf der Kaltseite die Lufttemperatur sinusförmig nach folgender Gleichung variiert:

$$\Theta(t) = \left(5 + 5 \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{t}{24 \text{ h}} \right) \right) ^\circ \text{C} \quad \text{Formel 15}$$

Die sinusförmige Wärmestromdichte durch die Oberfläche des Prüfkörpers auf der Kaltseite wird mit Wärmestromplatten gemessen. Danach werden die Amplitude der Lufttemperaturschwankung und die Amplitude der Wärmestromdichte ermittelt. Die wirksame Wärmekapazität des Prüfkörpers ergibt sich dann nach folgender Gleichung

$$\kappa = \frac{24 \cdot 3600 \text{ s}}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}}{\hat{\Theta}} \text{ in } \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \text{Formel 16}$$

Hierbei bezeichnet

- $\hat{\Theta}$ die Amplitude der Temperaturschwankung in K
- $\hat{q}$ die Amplitude der Wärmestromdichte in W/m²

Das Messergebnis für die wirksame Wärmekapazität der Brettstapeldecke lautet:

$$\kappa = (22.5 \pm 0.48(3 \sigma)) \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$$

Die Details der Messung der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke können dem Messbericht *Messung der wirksamen Wärmekapazität einer Brettstapeldecke* entnommen werden, der als Anlage beigefügt ist.

Zur Überprüfung der Plausibilität der Messung wurde die wirksame Wärmekapazität mit dem Programm ANSYS berechnet. Die Werte der wärmeschutztechnischen Kenngrößen der Materialien sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10: Materialeigenschaften für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität mit ANSYS

	Fichte	OSB Platte
Rohdichte ρ in kg/m^3	420	615
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(m K)	R= 0.086	0.13
	T= 0.071	
	L= 0.223	
Wärmekapazität C_p in $\text{MJ/(m}^3\text{ K)}$	0.634	0.923

Für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität des Prüfkörpers werden die gleichen Temperaturrendbedingungen wie bei der Messung angesetzt. Es ergibt sich eine wirksame Wärmekapazität von

$$\kappa = 22.9 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$$

Damit stimmt das Messergebnis der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke mit dem Rechenwert innerhalb der Fehlergrenzen überein.

8.2 Profilierte Brettstapeldecke

Mit einer weiteren Messung wurde versucht, das Messverfahren auch auf Brettstapeldecken mit profilierter Deckenunterseite anzuwenden.

Bei profilierten Bauteilen kann die wirksame Wärmekapazität nicht mehr direkt aus der Amplitude der Wärmestromdichte abgeleitet werden, da die Wärmestromdichte nicht mehr, wie bei ebenen Bauteilen, überall auf der Oberfläche konstant ist. Vielmehr ist die Wärmestromdichte von der Position des Messpunktes abhängig.

Daher kann die wirksame Wärmekapazität von profilierten Bauteilen nur indirekt aus den gemessenen Wärmestromdichten ermittelt werden.

Das Verfahren ist hierbei wie folgt:

Die Wärmestromdichten werden an verschiedenen Positionen der profilierten Oberflächen gemessen. An jeder Position wird die Amplitude der sinusförmigen Wärmestromdichte bestimmt.

Danach werden mit einem Wärmebrückenprogramm die erwarteten Wärmestromdichten an diesen Positionen berechnet.

Wenn die berechneten Wärmestromdichten mit den gemessenen Wärmestromdichten an den verschiedenen Positionen übereinstimmen, wird die Amplitude der gesamten Wärmestromdichte der profilierten Oberfläche mit dem Wärmebrückenprogramm berechnet und daraus die dynamische Wärmekapazität der Deckenunterseite bestimmt.

Der Prüfkörper für diese Messung hat folgenden Aufbau:

- 152/192 mm Brettstapel
- 10 mm OSB Platte

Die Profilierung wird durch Bretter gebildet, die 40 mm aus der Deckenunterseite herausragen.

Die profilierte Oberfläche wird zur Kaltseite hin eingebaut.

Die Wärmestromplatten werden auf der Oberseite der herausstehenden Bretter (Position 1), an den Seiten der herausstehenden Bretter (Position 3 und 4) und am Spaltgrund zwischen den Brettern (Position 2), jeweils mittig, angebracht.

Der Messwert der Amplitude der Temperaturschwankung der Luft beträgt

$$\hat{\theta} = (5.09 \pm 0.05) \text{ K}$$

Die Messwerte der Amplituden der Wärmestromdichten an den vier Messpositionen sind in der nachfolgenden Tabelle 11 zusammengefasst.

Die Details dieser Messung können dem Messbericht *Messung der wirksamen Wärmekapazität einer profilierten Brettstapeldecke*, der als Anlage beigefügt ist, entnommen werden.

Tabelle 11: Amplituden der Wärmestromdichten gemessen an den Positionen 1, 2, 3 und 4.

Fläche	Wärmestromdichte in W/m^2
Oben (Position 1)	$\hat{q}_{oben} = (4.3 \pm 0.21)$
Unten (Position 2)	$\hat{q}_{unten} = (13.4 \pm 0.09)$
Seite (Position 3 und 4)	$\hat{q}_{seite} = (6.63 \pm 0.08)$

Die Berechnung der Amplituden der Wärmestromdichten an den verschiedenen Positionen erfolgt mit dem Programm ANSYS. Bei dieser Berechnung werden die wärmeschutztechnischen Kennwerte der Materialien aus Tabelle 10 verwandt.

Für die Berechnung wird, wie bei der Messung der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke, auf der Kaltseite die Lufttemperatur sinusförmig nach folgender Gleichung variiert:

$$\Theta(t) = \left(5 + 5 \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{t}{24 \text{ h}} \right) \right) ^\circ \text{C} \quad \text{Formel 17}$$

Der Wärmeübergangswiderstand auf der warmen Seite beträgt $R_{si} = 0.14 \text{ m}^2\text{K/W}$ bei einer Lufttemperatur von 20°C . Der Wärmeübergangswiderstand auf der Kaltseite beträgt $R_{si} = 0.03 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Tabelle 12 zeigt die Mess- und die Rechenwerte der gemessenen Wärmestromdichten und auch ihre Differenz für die vier Messpositionen.

Tabelle 12: Differenz der berechneten und der gemessenen Amplituden des Wärmestromflusses in W/m^2 für die verschiedenen Messpositionen

Wärmestromdichte in $\text{W/m}^2\text{K}$			
Position	Messung	ANSYS	Differenz
Oben (Position 1)	$\hat{q}_{oben} = (4.3 \pm 0.21)$	$\hat{q}_{oben} = 3.77$	0.54
Unten (Position 2)	$\hat{q}_{unten} = (13.4 \pm 0.09)$	$\hat{q}_{unten} = 12.0$	1.4
Seite (Position 3 und 4)	$\hat{q}_{seite} = (6.63 \pm 0.08)$	$\hat{q}_{seite} = 5.73$	0.9

Damit stimmen die berechneten und die gemessenen Amplituden der Wärmestromdichte an den verschiedenen Messstellen innerhalb der Messfehler nicht überein.

Somit sind weitere Untersuchungen und ergänzende Messungen erforderlich, um die Ursachen für diese Abweichungen zu identifizieren und so auch die exakte Messung der wirksamen Wärmekapazität von profilierten Decken zu ermöglichen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass das neu entwickelte Verfahren der wirksamen Wärmekapazität mittels dynamischer Wärmebrückenberechnung mit der Software HEAT 2 und ANSYS gleichwertig zu dem Verfahren nach EN ISO 13786 ist.

Es wurden die wirksamen Wärmekapazitäten der vier am häufigsten vorkommenden Deckenkonstruktionen bestimmt.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite wird von der Dicke der Platte des schwimmenden Zementestrichs dominiert. Die Berechnungen zeigen auch, dass die wirksame Wärmekapazität ab einer Dicke von 7 cm nur noch geringfügig zunimmt.

Ausserdem wurde die wirksame Wärmekapazität von vier Deckenkonstruktionen Brettstapeldecke, Holzbetonverbunddecke, Hohlkastendecke und Rippendecke ohne Unterdecke als Ausgangssituation berechnet.

Die wirksame Wärmekapazität abgehängter Decken mit verschiedenen Beplankungsmaterialien Holz, Gipskarton und Gipsfaserplatten wird ebenfalls bestimmt.

Die geringste wirksame Wärmekapazität ergibt sich für die Gipskartonbeplankung, die grösste für die Gipsfaserplatten, gefolgt von 70 mm Massivholz.

Mit dieser baulichen Massnahme kann die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite nur geringfügig gegenüber der Rohdecke verbessert werden, teilweise wird sie sogar verringert.

Für Beplankungen der abgehängten Decken aus Holz wird die Auswirkung der Holzart und der Orientierung des Holzes und damit der anisotropen Wärmeleitfähigkeiten des Holzes auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite untersucht.

Als Ergebnis der Berechnungen ergibt sich, dass der Einfluss der Dicke der Beplankung und der Holzsorte auf die wirksame Wärmekapazität größer sind als der Einfluss der Orientierung des Holzes.

Für die Brettstapeldecke ohne Unterdecke wird auch der Einfluss verschiedener Hölzer (Fichte, Buche und Eiche) und ihre Orientierung auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite untersucht.

Es zeigt sich wieder ein grösserer Einfluss der Holzart auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite als der der Holzorientierung.

Auch der Einfluss einer zweidimensionalen Profilierung der Deckenunterseite wurde berechnet. Diese Berechnungen wurden mit den isotropen Werten der Wärmeleitfähigkeit nach SN EN ISO 10456 für *Nutzholz leicht* mit einer Rohdichte von 500 kg/m^3 und für *Nutzholz schwer* mit einer Rohdichte von 700 kg/m^3 durchgeführt.

Durch die Oberflächenvergrößerung bei *schweren Nutzholz*, was etwa Buche oder Eiche entspricht, kann die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von $39 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ auf $61 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ gesteigert werden.

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

Schliesslich wird der Einfluss dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität von allen vier Deckentypen untersucht. Dabei werden zunächst für eine Brettstapeldecke mit drei Profilierungstypen, Lattenrost, Würfel und Kassette sehr hohe wirksame Wärmekapazitäten der Deckenunterseite erreicht. Allerdings benötigt man zum Erzielen dieser hohen Werte eine Erhöhung der Deckenhöhe bei der Lattenrostgeometrie um 140 mm bei Buche und um 305 mm bei Fichte, bei der Würfelgeometrie um 90 mm bei Buche und um 180 mm bei Fichte und bei der Kassettengeometrie um 125 mm bei Buche und um 300 mm bei Fichte. Diese Deckenerhöhung lediglich zur Erhöhung der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit erscheint unrealistisch. Hier muss zukünftig die Deckenkonstruktion so optimiert werden, dass die zusätzliche Erhöhung reduziert und die Schichten noch zu anderen Zwecken, wie z. B. zur Tragfähigkeit der Decke herangezogen werden können.

Die Werkzeuge zur weiteren Optimierung der wirksamen Wärmekapazität wurden in diesem Projekt entwickelt.

Darüber hinaus ergeben sich die grössten Werte für die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für kleine und tiefe Spalte in der Profilierung. Es besteht das Risiko, dass die Oberflächen, die zu diesen Spalten orientiert sind, eine verringerte Belüftung mit Raumluft erfahren und somit der Wärmeübergangswiderstand dieser Flächen vergrössert wird. Um diesen Effekt abzuschätzen wurde der Wärmeübergangswiderstand dieser Flächen in den Berechnungen von 0,13 m²K/W auf 0,5 m²K/W erhöht. Dies verringert die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite zwischen 32 % und 43 % für Buche und zwischen 14 % und 17 % für Fichte, je nach Profilierungsgeometrie.

Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um die Belüftung dieser Flächen besser zu verstehen und somit die Wärmeübergangswiderstände präziser einschätzen zu können.

Es wurden für alle vier Deckentypen für fünf dreidimensionale Profilierungsgeometrien Geometrien mit niedrigerer Aufbauhöhe und somit kleinerer Erhöhung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite optimiert.

Dabei werden neben der Lattenrost-, Würfel- und Kassettengeometrie noch zwei weitere dreidimensionale Profilierungen, die Doppelprofilierung und die Trapezprofilierung untersucht.



Abbildung 30: Doppelprofilierung der Unterdecke



Abbildung 31: Trapezprofilierung der Unterdecke

Es ergeben sich für die Holzbetonverbunddecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von 29 kJ/(m²K) auf 42 kJ/(m²K) bis 49 kJ/(m²K) für Fichte, also Steigerungen zwischen 45 % und 69 %.

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 %.

Es ergeben sich für die Hohlkastendecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von $26 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $37 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $48 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für Fichte, also Steigerungen zwischen 42 % und 85 %.

Es ergeben sich für die Rippendecke durch die dreidimensionalen Profilierungen mit Aufbauhöhen von 60 mm bis 70 mm Verbesserungen der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite von $36 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ auf $45 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ bis $61 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$ für Fichte, also Steigerungen zwischen 25 % und 69 %.

Auch hier können zukünftig mit den nun zur Verfügung stehenden Optimierungsmethoden weitere Optimierungen der wirksamen Wärmekapazität, auch unter Berücksichtigung anderer Parameter der Decken, wie z. B. der Tragfähigkeit, durchgeführt werden.

Schliesslich wurde die wirksame Wärmekapazität einer ebenen Brettstapeldecke in der *Hotbox* in Biel gemessen. Das Messergebnis für die wirksame Wärmekapazität der Brettstapeldecke lautet $\kappa = (22.5 \pm 0.48(3 \sigma)) \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität des Prüfkörpers ergibt eine wirksame Wärmekapazität von $\kappa = 22.9 \text{ kJ}/(\text{m}^2\text{K})$.

Damit stimmt das Messergebnis der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke mit dem Rechenwert innerhalb der Fehlergrenzen überein.

Mit einer weiteren Messung der wirksamen Wärmekapazität einer profilierten Brettstapeldecke wurde versucht, das Messverfahren auch auf Brettstapeldecken mit profilierter Deckenunterseite anzuwenden. Bei dieser Messung stimmen aber die Messwerte für die Amplituden der Wärmeströme nicht innerhalb der Messfehler mit den berechneten Werten überein.

Daher sind zur Erweiterung des Messverfahrens auf profilierte Bauteile noch weitere Messungen erforderlich. Hier besteht zukünftig weiterer Entwicklungsbedarf, um die Anwendung der Messmethode zu erweitern.

10 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, Nägeli AG und Lignum Schweiz für die Unterstützung des Forschungsprojekts. Besonders wertvoll waren die Beiträge, durch die Erfahrungen aus der Praxis in das Projekt einfließen. Besonders möchten wir uns bei der Firma Nägeli AG für die Herstellung der Prüfkörper bedanken.

11 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für Holzbau, Tragwerke und Architektur und des Projektverantwortlichen gültig.

12 Verzeichnisse

12.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Übersicht Projektpartner.	8
Tabelle 2: Varianten der Decken und Unterdecken.....	11
Tabelle 3 : Kombinationen der Holzorientierung für jede Holzart	18
Tabelle 4 : Eigenschaften der Holzarten Fichte, Eiche und Buche.	18
Tabelle 5 : Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität für alle Decken mit dem analytischen Verfahren (LESOSAI) und dem numerischen Verfahren (HEAT 2).....	23
Tabelle 6 : Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität für die ebene und profilierte Brettstapeldecke mit Nutzholz leicht und Nutzholz schwer berechnet mit dem numerischen Programmen HEAT 2 und ANSYS.....	25
Tabelle 7: Optimaler Parametersatz für die dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite mit Lattenrost für die Holzsorten Buche und Fichte.....	35
Tabelle 8: Optimaler Parametersatz für die dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite mit Würfeln für die Holzsorten Buche und Fichte.	40
Tabelle 9: Optimaler Parametersatz für die dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite mit Kassetten für die Holzsorten Buche und Fichte.	44
Tabelle 10: Materialeigenschaften für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität mit ANSYS	49
Tabelle 11: Amplituden der Wärmestromdichten gemessen an den Positionen 1, 2, 3 und 4.....	50
Tabelle 12: Differenz der berechneten und der gemessenen Amplituden des Wärmestromflusses in W/m^2 für die verschiedenen Messpositionen.....	50

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Holzbetonverbunddecke.....	9
Abbildung 2 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Brettstapeldecke.....	9
Abbildung 3 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Hohlkastendecke.....	10
Abbildung 4 : Aufbau der Rohdecke des Deckentyps Rippendecke	10
Abbildung 5 : Zeitlicher Verlauf der Wärmestromdichte der Deckenober- und der Deckenunterseite der Brettstapeldecke.....	16
Abbildung 6 :Prinzipskizze der unterschiedlichen Richtungen der Wärmeleitfähigkeit des Holzes mit den Koordinaten: radial, tangential und longitudinal.	17
Abbildung 7 : Aufbau der Brettstapeldecke mit den unterschiedlichen Holzarten und möglichen Richtungen der anisotropen Wärmeleitfähigkeiten des Holzes. Die Abkürzung R steht für radial, L für longitudinal und T für tangential.	18
Abbildung 8 : ebene Hohlkastendecke.....	19

Abbildung 9 : Profilierte Hohlkastendecke mit der Abwicklungslänge l	19
Abbildung 10: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1.....	20
Abbildung 11: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für den Probekörper ...	21
Abbildung 12 : Abhängigkeit der wirksamen Wärmekapazität der Deckenoberseite von der Dicke der Zementplatte des schwimmenden Unterlagsbodens.....	24
Abbildung 13 : Vergleichsberechnungen der dynamischen Wärmekapazität der Deckenunterseite einer Brettstapeldecke mit den beiden numerischen Programmen HEAT 2 und ANSYS.	26
Abbildung 14 : Eigenschaften der Beplankung der abgehängten Decken unter der Brettstapeldecke. Die Abkürzung L steht für die Wärmeleitfähigkeit in longitudinaler Richtung; die Abkürzung R für die Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung und die Abkürzung T für die Wärmeleitfähigkeit in transversaler Richtung.	28
Abbildung 15 : Einfluss der Dicke der Beplankung der abgehängten Decke und der Holzorientierung für die vier Deckensysteme.....	28
Abbildung 16 : Wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite von Brettstapeldecken in Abhängigkeit der Holzarten Fichte, Buche und Eiche.	29
Abbildung 17: Einfluss der Oberflächenvergrößerung der Deckenunterseite auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite	31
Abbildung 18: 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 Zwischenraums zwischen den Brettern.	32
Abbildung 19: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Lattenrost in Abhängigkeit der Geometrieparameter Lattenhöhe C bzw. Profilüberstand D und Abstand der Latten A, Lattenbreite B, Breite der überstehenden Lamellen E und Breite des Zwischenraums F für die Holzart Buche.	33
Abbildung 20: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Lattenrost in Abhängigkeit der Geometrieparameter Lattenhöhe C bzw. Profilüberstand D und Abstand der Latten A, Lattenbreite B, Breite der überstehenden Lamellen E und Breite des Zwischenraums F für die Holzart Fichte.	34
Abbildung 21: Einfluss des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Holzarten Buche und Fichte bei dreidimensionaler Profilierung mit einem Lattenrost	36
Abbildung 22: perspektivische Darstellung der würfelförmigen Profilierung. Die Abkürzungen A und B stehen für die Würfelbreite, B und E für die Spaltbreite zwischen den Würfeln, C für die Höhe der Würfel.....	37
Abbildung 23: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Würfel in Abhängigkeit der Geometrieparameter Würfelhöhe C und Würfelbreite B bzw. Spaltbreite E für die Holzart Buche.....	38

Abbildung 24: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Würfel in Abhängigkeit der Geometrieparameter Würfelhöhe C und Würfelbreite B bzw. Spaltbreite E für die Holzart Fichte.....	39
Abbildung 25: Einfluss des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Holzarten Buche und Fichte bei dreidimensionaler Profilierung mit Würfeln	41
Abbildung 26: perspektivische Darstellung der Geometrie der Kassettendecke. Die Abkürzungen stehen für folgende Parameter der Geometrie: A für die Dicke der Querrippe, B für die Länge der Kasette, C für die Dicke der Längsrippe, D für die Breite der Kasette und E für den Überstand oder die Höhe der Kasette	42
Abbildung 27: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Kasette in Abhängigkeit der Geometrieparameter Kassettenhöhe E und Kassettenbreite B, D und Kassettenwandstärke A, C für die Holzart Buche.....	43
Abbildung 28: Wirksame Wärmekapazität der profilierten Deckenunterseite mit der Profilierung Kasette in Abhängigkeit der Geometrieparameter Kassettenhöhe E und Kassettenbreite B, D und Kassettenwandstärke A, C für die Holzart Fichte.....	44
Abbildung 29: Einfluss des raumseitigen Wärmeübergangswiderstands auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite für die Holzarten Buche und Fichte bei dreidimensionaler Profilierung mit Kassetten.....	45
Abbildung 30: Doppelprofilierung der Unterdecke.....	52
Abbildung 31: Trapezprofilierung der Unterdecke	52

12.3 Literaturverzeichnis

- [1] C. Geyer, Abschätzung der dynamischen Wärmeaufnahme einer Geschossdecke, Biel, 2012.
- [2] U. Baumann, Rechnerische Optimierung der dynamischen Wärmekapazität von Holzdecken, Biel: Bachelorthesis, 2013.
- [3] SIA 180:2014, Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [4] SN EN ISO 13786:2007, Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen Dynamischthermische Kenngrößen, Zürich: Schweizer Ingenieur- und Architektenverein.
- [5] 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.
- [6] P. Niemz, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW- Verlag, 1993.



Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit

Forschungsbericht

Bauteilkatalog

Bericht Nr.	R.007844-10-72FE-01-02
Auftrag Nr.	R.007844-10-72FE-01
Klassifizierung	Öffentlich
Datum	31. Oktober 2017
Auftraggeber	Bundesamt für Umwelt – BAFU Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung Werner Riegger 3003 Bern
Projektnummer BAFU	2016.09
Adresse der Forschungsstelle	Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur Kompetenzbereich Bauphysik und Energie Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel Tel / Fax +41 (0)32 344 03 41/91 www.ahb.bfh.ch
Verfasser	Amabel Melián Hernández
Projektverantwortlicher	Prof. Dr. Christoph Geyer
Institutsleiter	Prof. Andreas Müller
Berner Fachhochschule Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur	



Handwritten signatures of the authors and project manager, including a signature that appears to read 'H. Müller' at the bottom.

Inhalt

1	Einführung.....	3
2	Berechnungsmethoden	3
2.1	Berechnung nach SN EN ISO 13786.....	3
2.2	Berechnung mit Wärmebrückenprogrammen	5
3	Beschreibung der Materialien	5
4	Untersuchte Deckensysteme	6
4.1	Abgehängte Decken	6
4.1.1	Kurzbezeichnung der Varianten	6
4.1.2	Aufbau der Deckensysteme.....	7
4.1.3	Wirksame Wärmekapazitäten mit abgehängten Decken.....	11
4.2	Anisotropie des Holzes	12
4.2.1	Einfluss der Anisotropie des Holzes und der Holzart für die Brettstapeldecke ..	12
4.2.2	Einfluss der Anisotropie bei abgehängten Decke	14
4.3	Profilierung der Deckenunterseite.....	19
4.3.1	Zweidimensionale Profilierung.....	19
4.3.2	Dreidimensionale Profilierung.....	21
5	Verzeichnisse	31
5.1	Tabellenverzeichnis	31
5.2	Anlagen.....	32

1 Einführung

Im vorliegenden Bauteilkatalog wird die wirksame Wärmekapazität von Schweizer Deckensystemen dokumentiert. Die wirksame Wärmekapazität wird für die Beurteilung der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen benötigt, wenn die Lufttemperatur an ihrer Oberfläche zeitlich schwankt.

Es werden die wirksamen Wärmekapazitäten von vier typischen Schweizer Deckensystemen untersucht. Dabei wird jeweils die wirksame Wärmekapazität der Oberseite und der Unterseite der Decke bestimmt.

2 Berechnungsmethoden

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils ist ein Maß für den Wärmestrom, der von der Raumluft in das Bauteil hinein oder heraus fließt, wenn sich die Raumlufttemperatur zeitlich ändert.

Eine sinusförmige Schwingung der Raumlufttemperatur erzeugt eine sinusförmige Schwingung der Wärmestromdichte durch die Oberfläche des Bauteils, welches an die Raumluft angrenzt. Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils ist also umso größer, je größer die Amplitude der Schwingung der Wärmestromdichte ist.

Die wirksame Wärmekapazität einer Decke wird mit zwei Berechnungsverfahren bestimmt:

- dem Matrixformalismus der Norm SN EN ISO 13786 *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - dynamisch thermische Kenngrößen -Berechnungsverfahren*, Ausgabe April 2008
- und zwei Wärmebrückenprogrammen, dem Programm HEAT 2 der Firma Blocon und dem Programm ANSYS der Firma CADFEM (Schweiz), mit dem es möglich ist, für sinusförmige Temperaturrandbedingungen der Luft, die zeitabhängigen Wärmestromdichten durch die Oberflächen zu berechnen.

2.1 Berechnung nach SN EN ISO 13786

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität nach SN EN ISO 13786 ist auf homogene, ebene Bauteile beschränkt. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft wird folgender Ansatz gewählt

$$\theta(t) = \theta_m + \hat{\theta} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{T}\right) \quad \text{Formel 1}$$

Hierbei bezeichnet

- $\theta_m = 20^\circ \text{C}$ den Mittelwert der Temperatur in $^\circ\text{C}$
- $\hat{\theta} = 5 \text{ K}$ die Amplitude der Temperaturschwankung in K
- t die Zeit in h
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer in h

Die Temperatur- bzw. Wärmestromschwankung werden nun als komplexe Größen mit den Amplituden $\hat{\theta}$ bzw. $\hat{q}$ geschrieben.

Diese Temperaturschwankung an der Oberfläche durchdringt das Bauteil. Die Fortpflanzung dieser Schwingungen im Bauteil hängt von den wärmeschutztechnischen Grössen der einzelnen Bauteilschichten, also von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität, ab.

Die wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden dann in einer komplexen Matrix, Z_{ij} zusammengefasst. Diese Matrix beschreibt den Einfluss des Bauteils auf die Fortpflanzung der Temperaturschwankung im Bauteil. Die Temperatur- und Wärmestromschwankung auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils wird schliesslich mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_e \\ \hat{q}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{\theta}_i \\ \hat{q}_i \end{pmatrix} \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet

- $\hat{\theta}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.
- $\hat{q}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.

Aus dieser Gleichung kann dann mit geeigneten Randbedingungen die wirksame oder dynamische Wärmekapazität berechnet werden. Für Aussenbauteile, an denen eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 3}$$

Für Innenbauteile, an denen an beiden Oberflächen eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ergibt sich die wirksame Wärmekapazität der beiden Oberflächen

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 4}$$

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_e}{\hat{\theta}_e} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{22}-1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 5}$$

Dieses Verfahren kann in begrenztem Umfang auch auf inhomogene Bauteile angewandt werden, indem diese Bauteile analog zum Verfahren der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengesetzter Bauteile nach SN EN ISO 6946 *Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient*, Ausgabe April 2008 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

$$\kappa = f_a \cdot \kappa_a + f_b \cdot \kappa_b \quad \text{Formel 6}$$

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
- κ_b die wirksame Wärmekapazität des zweiten homogenen Bereichs

Die wirksame Wärmekapazität wird für alle Deckenkonstruktionen auch nach diesem Näherungsverfahren berechnet, um zu überprüfen, wie genau dieses Verfahren zur Bestimmung der wirksamen Wärmekapazität für die untersuchten Deckensysteme ist.

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität erfolgt für die homogenen Bereiche mit dem Programm LESOSAI, Version 2016 (build 1008) Hieraus wird die wirksame Wärmekapazität des Bauteils mit Formel 6 ermittelt.

2.2 Berechnung mit Wärmebrückenprogrammen

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität erfolgt mit dem Programm HEAT 2 der Firma Blocon bzw. ANSYS der Firma CADFEM (Schweiz).

Die Wärmebrückenberechnungen werden so durchgeführt, dass die Anforderungen an die Modellierung und die Randbedingungen der SN EN ISO 10211 *Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen*, Ausgabe April 2008 eingehalten werden.

Insbesondere werden die Schnittkanten des Modells in die Symmetrieebene der Bauteile, d. h. die Mitte der Balken oder des Gefachs gelegt, und als adiabate Flächen, also Flächen, durch die keine Wärmeströme fließen, angenommen.

Für die Wärmeübergangskoeffizienten wird ein Wert von $R_{si} = 0.13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ angesetzt.

Die Berechnungen erfolgen mit einer sinusförmigen Raumlufthtemperatur mit einer Temperaturamplitude von $\hat{\theta} = 5\text{K}$ gemäss Formel 1.

3 Beschreibung der Materialien

Für die wärmeschutztechnischen Kennwerte werden typische Werte für die Berechnungen verwandt. Sie werden entweder den einschlägigen SIA Normen, den Produktdatenblättern von Herstellern oder der Literatur entnommen. In der folgenden Tabelle 1 sind die verwandten Werte und die Bezeichnungen der Materialien zusammengestellt.

	Rohdichte ρ	Spezifische Kapazität c_p	volumetrische Kapazität	Wärmeleitfähigkeit λ		
Element	kg/m ³	J/kg·K	MJ/m ³ ·K	W/m·K		
Balken	500	1600	0.80	0.130		
Brettschichtholz	500	1600	0.80	0.130		
Brettstapel	500	1600	0.80	0.130		
Dreischichtplatte	470	1440	0.68	0.230		
Gipsfaserplatte	1200	1008	1.21	0.430		
Gipskartonplatte	700	1008	0.71	0.210		
Holzwerkstoffplatte	600	1692	1.02	0.140		
Luft						
100 mm (162 mm, 80 mm, 160 mm)	1.23	1008	0.00	0.455		
50 mm (62mm, 40 mm)	1.23	1008	0.00	0.238		
Massivholz	500	1584	0.79	0.130		
Trittschalldämmung I	80	1030	0.08	0.033		
Trittschalldämmung II	80	1030	0.08	0.035		
Trittschalldämmung III	80	1030	0.08	0.032		
Hohlraumbedämpfung	30	1030	0.03	0.033		
OSB Platte	615	1500	0.92	0.130		
Splitt	1800	1000	1.80	0.700		
Überbeton	2400	1008	2.42	2.500		
Zementestrich	2200	1008	2.22	1.400		
Nutholz leicht	500	1600	0.80	0.130		
Nutholz schwer	700	1600	1.12	0.180		
Fichte	420	1510	0.63	R= 0.09	T= 0.07	L= 0.22
Eiche	640	1590	1.02	R=0.17	T= 0.14	L= 0.29
Buche	720	2021	1.46	R=0.12	T= 0.09	L= 0.26

Tabelle 1: Eigenschaften der verwandten wärmeschutztechnischen Kennwerte der Materialien für die Berechnungen, in Anlage 1 findet man eine detaillierte Tabelle mit den Quellenangaben. Die Abkürzung R steht für radial, T für tangential und L für longitudinal bei anisotropen Holz

4 Untersuchte Deckensysteme

Es werden zunächst vier typische Deckensysteme untersucht. Dies sind Holzbetonverbunddecken, Brettstapeldecken, Hohlkastendecken und Rippendecken.

Alle Berechnungen erfolgen mit einem schwimmenden Unterlagsboden auf einer doppelten oder einlagigen Wärme- und Trittschalldämmung. Die Dicke der Estrichplatte variiert von Decke zu Decke in geringem Umfang.

4.1 Abgehängte Decken

Darüberhinaus wird für jede Geschossdecke eine Variante ohne abgehängte Decke und vier Varianten mit unterschiedlichen abgehängten Decken berechnet. Als Beplankung der abgehängten Decke werden 27 mm und 70 mm dicke Massivholzplatten, doppelte Beplankungen aus 2 x 15 mm Gipsfaserplatten und 2 x 12,5 mm dicke Gipskartonplatten untersucht.

4.1.1 Kurzbezeichnung der Varianten

Die Varianten werden zur besseren Übersicht mit einer Kurzbezeichnung versehen. Die Kurzbezeichnung setzt sich aus dem Namen der Decke und der verwandten abgehängten Decke zusammen. So steht beispielsweise HBV 70MH für eine Holzbetonverbunddecke mit einer abgehängten Decke mit einer Beplankung aus einer 70 mm dicken Massivholzplatte. In der nachfolgenden Tabelle sind die Abkürzungen für die Deckensysteme und die abgehängten Decken zusammengestellt.

		Abkürzungen
Decke	Holzbetonverbunddecke	HBV
	Brettstapel	BS
	Hohlkastendecke	HKD
	Rippendecke	RD
Unterdecke	Ohne Unterdecke	-
	70 mm Massivholz	70MH
	27 mm Massivholz	27MH
	2 x 15 mm Gipsfaserplatte	GFP
	2 x 12.5 mm Gipskartonplatte	GKP

Tabelle 2: Kurzbezeichnungen der Varianten der Decken und Unterdecken.

4.1.2 Aufbau der Deckensysteme

In den folgenden Tabellen werden die untersuchten Deckensysteme im Detail beschrieben.

4.1.2.1 Holzbetonverbunddecke

Die wirksame Wärmekapazität der Oberseite wird für die Holzbetonverbunddecke in allen Berechnungen mit einem schwimmenden Unterlagsboden auf einer doppelagigen Wärme- und Trittschalldämmung bestimmt.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für fünf Varianten ohne und mit vier unterschiedlichen abgehängten Decken berechnet.

Die nachfolgenden Tabellen beschreiben die Bauteilschichten der untersuchten Decken. Die Bezeichnungen der Bauteilschichten stimmen mit denen der Tabelle 1 überein.

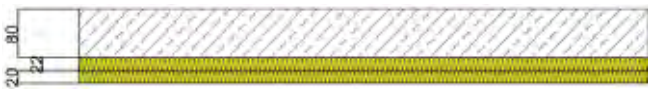
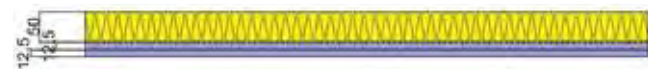
Abkürzungen	Bauteil	Schicht
Schwimmender Unterlagsboden		
-		- 80 mm Zementestrich - 22 mm Mineralwolle Trittschalldämmung II - 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung III
Decke		
HBV		- 120 mm Überbeton - 120 mm Brettschichtholz
Abgehängte Decken		
27MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 27 mm Massivholz
70MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 70 mm Massivholz
GFP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 15 mm Gipsfaserplatte
GKP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 12.5 mm Gipskartonplatte

Tabelle 3: Beschreibung der Bauteilschichten der Holzbetonverbunddecke, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken

4.1.2.2 Brettstapeldecke

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenoberseite wird für die Brettstapeldecke in allen Berechnungen mit einem schwimmenden Unterlagsboden auf einer einlagigen Wärme- und Trittschalldämmung bestimmt.

Die wirksame Wärmekapazität der Unterseite wird für fünf Varianten, ohne und mit vier unterschiedlichen abgehängten Decken, berechnet.

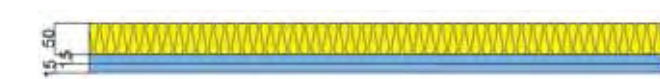
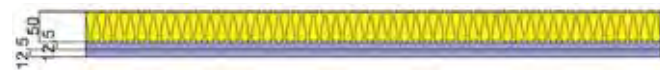
Abkürzungen	Bauteil	Schicht
Schwimmender Unterlagsboden		
-		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I
Decke		
BS		- 200 mm Brettstapel
Abgehängte Decken		
27MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 27 mm Massivholz
70MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 70 mm Massivholz
GFP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 15 mm Gipsfaserplatte
GKP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 12,5 mm Gipskartonplatte

Tabelle 4: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecken, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken

4.1.2.3 Hohlkastendecke

Die wirksame Wärmekapazität der Oberseite wird für die Hohlkastendecke in allen Berechnungen mit einem schwimmenden Unterlagsboden auf einer doppelagigen Wärme- und Trittschalldämmung bestimmt.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für fünf Varianten, ohne und mit vier unterschiedlichen abgehängten Decken, berechnet.

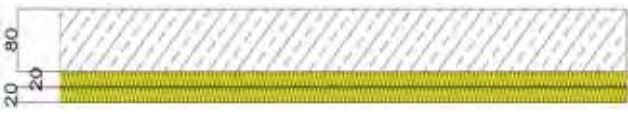
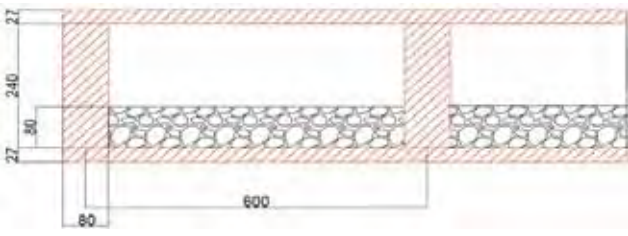
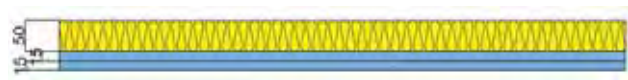
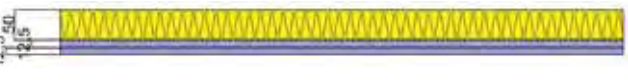
Abkürzungen	Bauteil	Schicht
Schwimmender Unterlagsboden		
-		- 80 mm Zementestrich - 2 x 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I
Decke		
HKD		- 27 mm Holzwerkstoffplatte - 240 mm Holzbalken (b = 80 mm/e = 600 mm) - 80 mm Splitt (zwischen Balken) - 27 mm Holzwerkstoffplatte
Abgehängte Decken		
27MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 27 mm Massivholz
70MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 70 mm Massivholz
GFP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 15 mm Gipsfaserplatte
GKP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 12,5 mm Gipskartonplatte

Tabelle 5: Beschreibung der Bauteilschichten der Hohlkastendecken, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken

4.1.2.4 Rippendecke

Die wirksame Wärmekapazität der Oberseite wird für die Rippendecke in allen Berechnungen mit einem schwimmenden Unterlagsboden auf einer einlagigen Trittschalldämmung bestimmt.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für fünf Varianten, ohne und mit vier unterschiedlichen abgehängten Decken, berechnet. Bei der Variante ohne abgehängte Decke wird eine Gipsfaserplatte als Verkleidung zwischen den Balken angenommen.

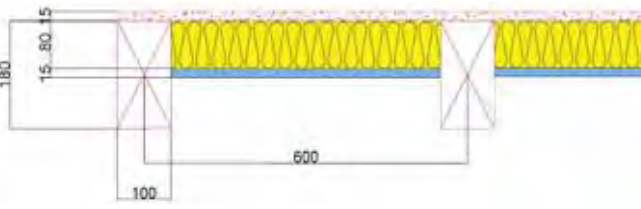
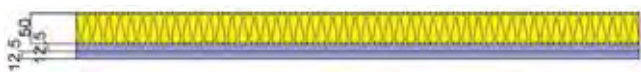
Abkürzungen	Bauteil	Schicht
Schwimmender Unterlagsboden		
-		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I
Decke		
RD		- 15 mm OSB - 180 mm Holzbalken (e= 600 mm/b= 100 mm) - 80 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung (zwischen Balken) - 15 mm Gipsfaserplatte (zwischen Balken nur ohne abgehängter Decke) - 100 mm Hohlraum (zwischen Balken mit abgehängter Decke)
Abgehängte Decken		
27MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 27 mm Massivholz
70MH		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 70 mm Massivholz
GFP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 15 mm Gipsfaserplatte
GKP		- 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung - 2 x 12.5 mm Gipskartonplatte

Tabelle 6: Beschreibung der Bauteilschichten der Rippendecken, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken

4.1.3 Wirksame Wärmekapazitäten mit abgehängten Decken

Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite erfolgt zweidimensional mit dem dynamischen Wärmebrückenprogramm HEAT 2. Die Rechenwerte für die wirksame Wärmekapazität der Deckenober- und -unterseite sind Anlage 2 zu entnehmen.

4.2 Anisotropie des Holzes

Holz ist ein anisotropes Material. Es hat unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten in den Richtungen radial, tangential und longitudinal. Für die Berechnungen wird vereinfachend angenommen, dass die verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten radial, tangential und longitudinal parallel zu den x-, y- und z-Achsen des kartesischen Systems orientiert sind.

4.2.1 Einfluss der Anisotropie des Holzes und der Holzart für die Brettstapeldecke

Es werden für die Brettstapeldecke für Varianten mit verschiedenen Holzarten Buche, Fichte und Eiche und verschiedene Richtungen der Wärmeleitfähigkeiten des Holzes die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite berechnet.

Die Varianten werden zur besseren Übersicht auch hier mit einer Kurzbezeichnung versehen. Die Kurzbezeichnung setzt sich aus dem Namen der Decke, der Holzart, der Richtung für die Wärmeleitfähigkeit und der verwandten abgehängten Decke zusammen. So steht beispielsweise BS_B_RT für die Brettstapeldecke mit Brettern aus Buche in einer radialen bzw. tangentialen Richtung der Wärmeleitfähigkeit parallel zur x- und y-Achse

		Abkürzungen
Holzart	Eiche	E
	Buche	B
	Fichte	F
Richtung XY	Radial-Tangential	RT
	Tangential - Radial	TR

Tabelle 7: Kurzbezeichnungen der Varianten der Holzart und der Orientierung der Wärmeleitfähigkeit für die Brettstapeldecke.

In der folgenden Tabelle werden die Bauteilaufbauten der untersuchten Varianten für die Brettstapeldecke im Detail beschrieben.

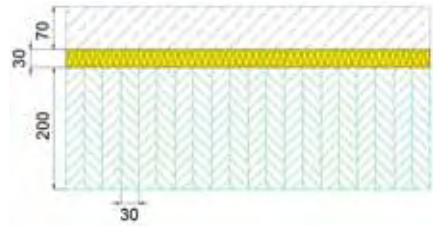
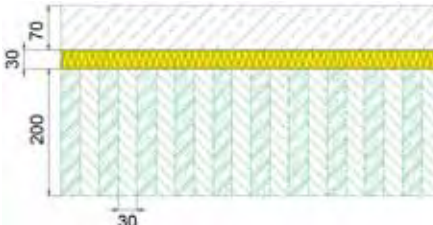
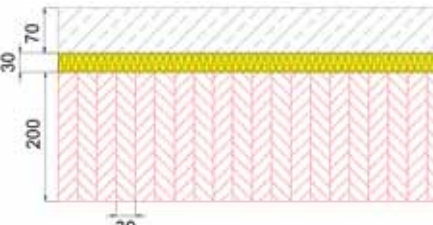
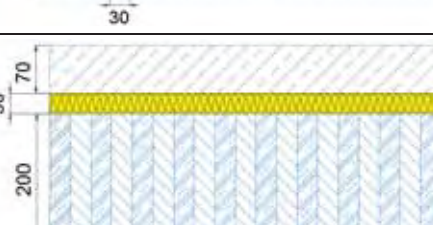
Ak.	Bauteil	Schicht
BS_F_RT		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Fichte Radial-Tangential
BS_F_TR		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Fichte Tangential-Radial
BS_E_RT		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Eiche Radial-Tangential
BS_E_TR		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Eiche Tangential-Radial
BS_B_RT		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Buche Radial-Tangential
BS_B_TR		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Buche Tangential-Radial

Tabelle 8: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke für Fichte, Eiche und Buche

Die wirksame Wärmekapazitäten dieser Aufbauten werden zweidimensional mit dem Programm HEAT 2 berechnet. Die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in Anlage 3.1 zusammengestellt.

4.2.2 Einfluss der Anisotropie bei abgehängten Decke

Der Einfluss der Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit des Holzes auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für alle vier Deckensysteme untersucht. Jedes Deckensystem wird mit den wärmetechnischen Kennwerten nach SN EN ISO 10456 für die Rohdecke berechnet. Die Unterdecke wird mit einer Beplankung aus Massivholz mit einer Dicke von 27 mm und mit einer Dicke von 70 mm jeweils für die Holzarten Fichte und Buche untersucht.

In der nachfolgenden Tabelle sind die Abkürzungen für die Deckensysteme und die abgehängten Decken zusammengestellt. Ein Beispiel ist BS_F_70LT für eine Brettstapeldecke mit der Unterdecke als 70 mm dicke Massivholzplatte aus Fichte mit der Wärmeleitfähigkeit der longitudinalen bzw. radialen Richtung. In der nachfolgenden Tabelle sind die Abkürzungen für die Deckensysteme und die abgehängten Decken zusammengestellt.

		Abkürzungen
Decke	Holzbetonverbunddecke	HBV
	Brettstapel	BS
	Hohlkastendecke	HKD
	Rippendecke	RD
Unterdecke	70 mm Massivholz	70
	27 mm Massivholz	27
Holzart	Fichte	F
	Buche	B
Richtung XY	Longitudinal-Tangential	LT
	Longitudinal -Radial	LR

Tabelle 9: Kurzbezeichnungen der Varianten der Decken, Unterdecken, der Holzart und der Richtung der Wärmeleitfähigkeit.

In den folgenden Tabellen werden die Bauteilaufbauten der untersuchten Varianten im Detail beschrieben:

- Tabelle 10 für die Holzbetonverbunddecke
- Tabelle 11 für die Brettstapeldecke
- Tabelle 12 für die Hohlkastendecke
- Tabelle 13 für die Rippendecke

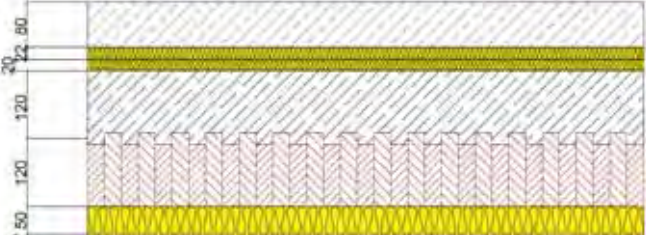
Ak.	Bauteil	Schicht
HOLZBETONVERBUNDDECKE		
HBV		- 80 mm Zementestrich - 22 mm Mineralwolle Trittschalldämmung II - 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung III - 120 mm Überbeton - 120 mm Brettschichtholz (isotrop) - 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung
HBV_F_27LR		- 27 mm Fichte longitudinal- radial
HBV_F_70LR		- 70 mm Fichte longitudinal- radial
HBV_F_27LT		- 27 mm Fichte longitudinal- tangential
HBV_F_70LT		- 70 mm Fichte longitudinal- tangential
HBV_B_27LR		- 27 mm Buche longitudinal- radial
HBV_B_70LR		- 70 mm Buche longitudinal- radial
HBV_B_27LT		- 27 mm Buche longitudinal- tangential
HBV_B_70LT		- 70 mm Buche longitudinal- tangential

Tabelle 10: Beschreibung der Bauteilschichten der Holzbetonverbunddecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.

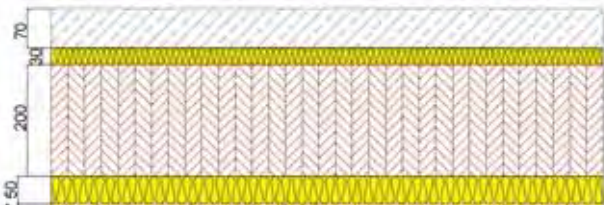
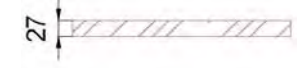
Ak.	Bauteil	Schicht
BRETTSTAPEL		
		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel (isotrop) - 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung
BS_F_27LR		- 27 mm Fichte longitudinal- radial
BS_F_70LR		- 70 mm Fichte longitudinal- radial
BS_F_27LT		- 27 mm Fichte longitudinal- tangential
BS_F_70LT		- 70 mm Fichte longitudinal- tangential
BS_B_27LR		- 27 mm Buche longitudinal- radial
BS_B_70LR		- 70 mm Buche longitudinal- radial
BS_B_27LT		- 27 mm Buche longitudinal- tangential
BS_B_70LT		- 70 mm Buche longitudinal- tangential

Tabelle 11: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.

Ak.	Bauteil	Schicht
HOHLKASTENDECKE		
HKD		- 80 mm Zementestrich - 2 x 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 27 mm Holzwerkstoffplatte (isotrop) - 240 mm Holzbalken (b = 80 mm/e= 600 mm) - 80 mm Splitt (zwischen Balken) - 27 mm Holzwerkstoffplatte (isotrop) - 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung
HKD_F_27LR		- 27 mm Fichte longitudinal- radial
HKD_F_70LR		- 70 mm Fichte longitudinal- radial
HKD_F_27LT		- 27 mm Fichte longitudinal- tangential
HKD_F_70LT		- 70 mm Fichte longitudinal- tangential
HKD_B_27LR		- 27 mm Buche longitudinal- radial
HKD_B_70LR		- 70 mm Buche longitudinal- radial
HKD_B_27LT		- 27 mm Buche longitudinal- tangential
HKD_B_70LT		- 70 mm Buche longitudinal- tangential

Tabelle 12: Beschreibung der Bauteilschichten der Hohlkastendecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.

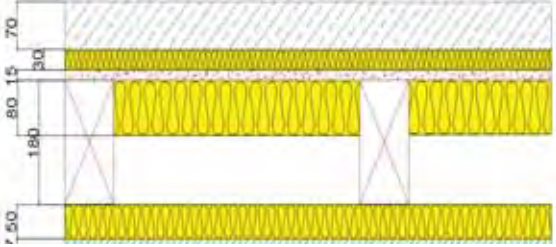
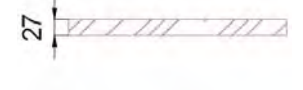
Ak.	Bauteil	Schicht
RIPPENDECKE		
		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 15 mm OSB - 180 mm Holzbalken (e= 600 mm/b= 100 mm) - 80 mm Mineralwolle (zwischen Balken mit abgehängter Decke) - 50 mm Mineralwolle zur Hohlraumbedämpfung
RD_F_27LR		- 27 mm Fichte longitudinal- radial
RD_F_70LR		- 70 mm Fichte longitudinal- radial
RD_F_27LT		- 27 mm Fichte longitudinal- tangential
HBV_F_70LT		- 70 mm Fichte longitudinal- tangential
RD_B_27LR		- 27 mm Buche longitudinal- radial
RD_B_70LR		- 70 mm Buche longitudinal- radial
RD_B_27LT		- 27 mm Buche longitudinal- tangential
RD_B_70LT		- 70 mm Buche longitudinal- tangential

Tabelle 13: Beschreibung der Bauteilschichten der Rippendecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.

Die wirksame Wärmekapazitäten dieser Aufbauten werden zweidimensional mit dem Programm HEAT 2 berechnet. Die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in Anlage 3.2 zusammengestellt.

4.3 Profilierung der Deckenunterseite

Durch die Profilierung der Deckenunterseiten wird die Oberfläche des Bauteils und damit die wirksame Wärmekapazität erhöht. Für die Profilierung der Deckenunterseite wurden sowohl die Wirkung zweidimensionaler Profilierungen, als auch der Einfluss dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit der Deckenunterseite untersucht.

4.3.1 Zweidimensionale Profilierung

Als Maßstab für die Vergrößerung der Oberfläche der Deckenunterseite zweidimensionaler Profilierungen dient das Verhältnis der Abwicklungslänge l zur Elementbreite b . Die Abwicklungslänge ergibt sich als die Summe der Abwicklungslängen der Teilflächen der Deckenunterseite

$$l = l_1 + l_2 + \dots + l_n.$$

In Tabelle 14 sind diese beiden Größen für eine Brettstapeldecke in die Vertikalschnitte eingezeichnet und die Oberflächenvergrößerung als l/b angegeben.

In Tabelle 14 und Tabelle 15 sind eine ebene Brettstapeldecke und die Geometrie fünf unterschiedlicher Profilierungen der Deckenunterseite angegeben. Für jede Profilierung wird die Elementbreite b , die Abwicklungslänge l und die Oberflächenvergrößerung l/b angegeben.

	Decke	Abwicklungslänge
Eben		$b = 240 \text{ mm}$ $l = 240 \text{ mm}$ $l/b = 1$
A		$b = 600 \text{ mm}$ $l = 800 \text{ mm}$ $l/b = 1.3$
B		$b = 600 \text{ mm}$ $l = 1600 \text{ mm}$ $l/b = 2.7$
C		$b = 300 \text{ mm}$ $l = 2300 \text{ mm}$ $l/b = 7.7$

Tabelle 14: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke mit Profilierungen unterschiedlicher Abwicklungslängen.

	Decke	Abwicklungslänge
D		$b = 300 \text{ mm}$ $l = 800 \text{ mm}$ $l/b = 2.7$
E		$b = 260 \text{ mm}$ $l = 460 \text{ mm}$ $l/b = 1.8$

Tabelle 15: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke mit Profilierungen unterschiedlicher Abwicklungslängen.

Die wirksame Wärmekapazitäten dieser Aufbauten werden zweidimensional mit dem Programm HEAT 2 berechnet.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite ist mit den wärmetechnischen Eigenschaften von *Nutzholz leicht* (κ_L) und *Nutzholz schwer* (κ_S) nach SN EN ISO 10456, Tab.3 berechnet.

Die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in Anlage 4 zusammengestellt.

4.3.2 Dreidimensionale Profilierung

Auch der Einfluss dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für die vier Deckentypen analysiert. Es werden fünf unterschiedliche Profilierungen untersucht. In der nachfolgenden Tabelle 16 sind die Geometrien der verschiedenen Profilierungstypen als perspektivische Prinzipskizzen dargestellt.

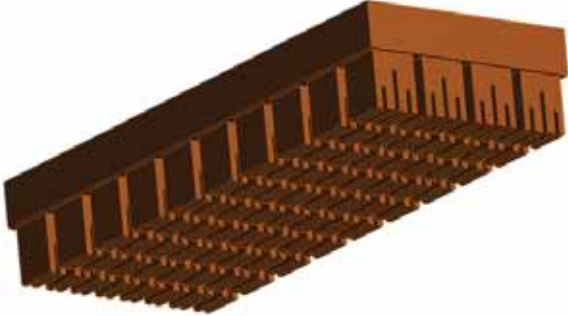
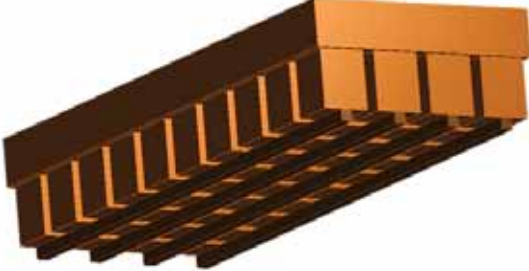
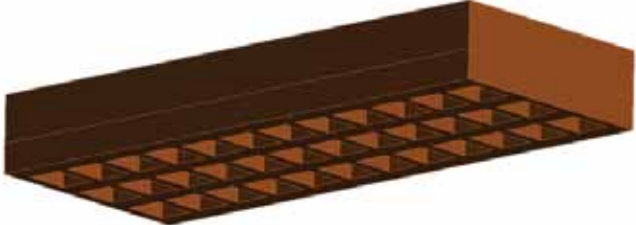
Dreidimensionale Profilierung der Deckenunterseite	
Doppelprofil	
Trapez	
Würfel	
Lattenrost	
Kassettendecke	

Tabelle 16: Geometrien verschiedener dreidimensionaler Profilierungen der Deckenunterseite.

Der Einfluss der dreidimensionalen Profilierung auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für alle vier Deckensysteme untersucht.

4.3.2.1 Brettstapeldecke

Die Optimierungen der dreidimensionalen Profilierungen der Deckenunterseite werden zweimal, ohne Begrenzung der Aufbauhöhe der Profilierung und mit Begrenzung der Aufbauhöhe der Profilierung, durchgeführt.

4.3.2.1.1 Ohne Begrenzung Aufbauhöhe

In der folgenden Tabelle ist der Aufbau der Brettstapeldecke und der verschiedenen dreidimensionalen Profilierungen in verschiedenen Schnitten angegeben. Die Geometrien der Profilierungen wurden so optimiert, dass sie die maximale Steigerung der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite erbrachten. Tabelle 17 und Tabelle 18 zeigen die Bauteilaufbauten der Brettstapeldecke und der Profilierungen für die Holzart Fichte und Buche.

Die wirksame Wärmekapazitäten dieser Aufbauten werden dreidimensional mit dem Programm ANSYS berechnet.

Die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite wird für Fichte und für Buche berechnet. Die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in Anlage 5.1 für Fichte und in Anlage 5.2 für Buche zusammengestellt.

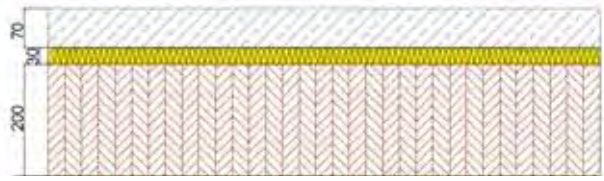
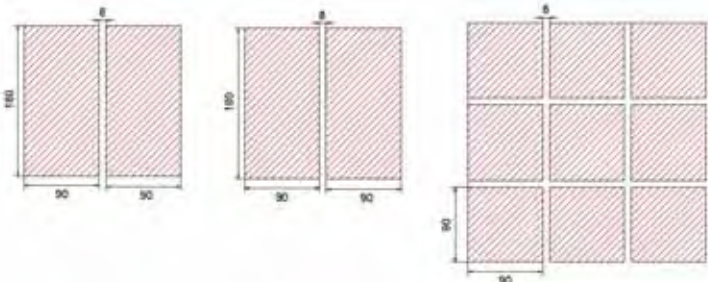
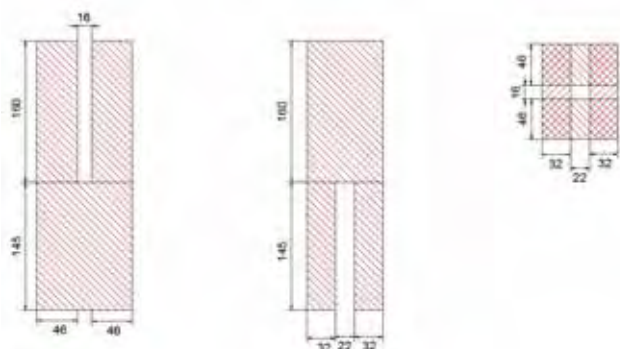
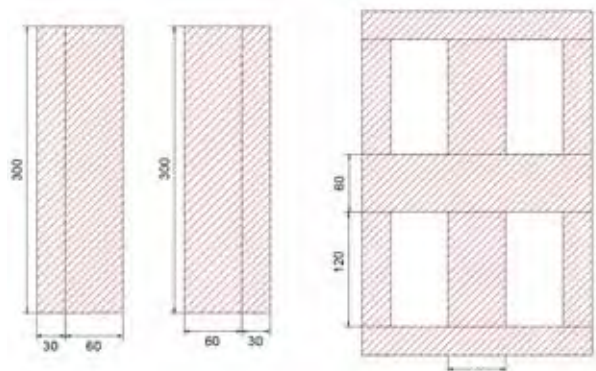
Ak.	Bauteil	Schicht
BRETTSTAPEL		
BS		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel (Fichte)
Würfel		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Lattenrost		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Kassettendecke		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt

Tabelle 17: Beschreibung der Brettstapeldecke mit den Geometrien der optimierten dreidimensionalen Profilierungen mit Fichte.

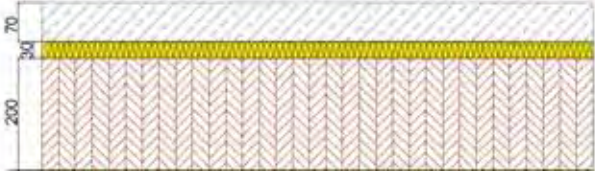
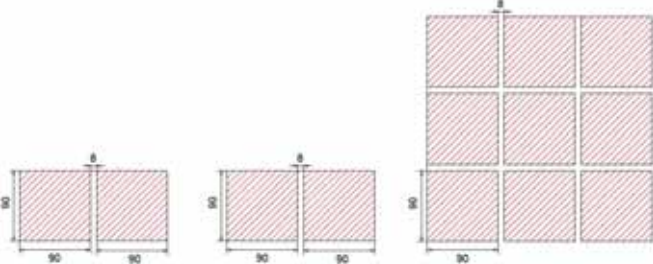
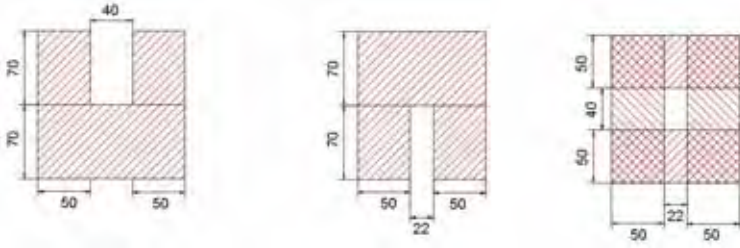
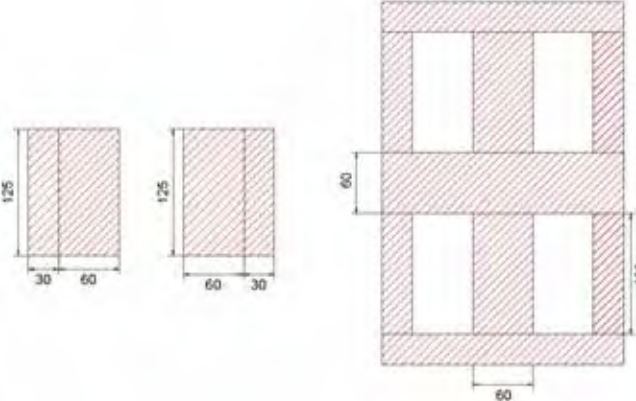
Ak.	Bauteil	Schicht
BRETTSTAPEL		
BS		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel (Buche)
Würfel		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Lattenrost		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Kassettendecke		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt

Tabelle 18: Beschreibung der Brettstapeldecke mit den Geometrien der optimierten dreidimensionalen Profilierungen mit Buche.

4.3.2.1.2 Mit Begrenzung Aufbauhöhe

Die nachfolgenden Tabellen beschreiben die geometrischen Parameter dreidimensionaler Profilierungen, deren Aufbauhöhe auf 60 mm bis 70 mm begrenzt wurde. Diese wurden zunächst für die Brettstapeldecke untersucht.

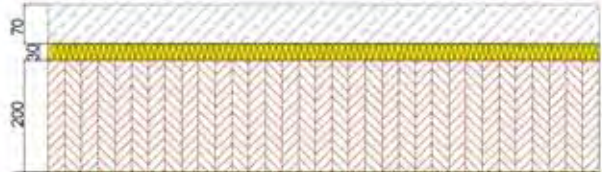
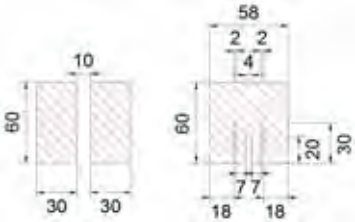
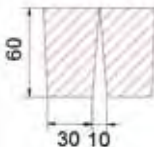
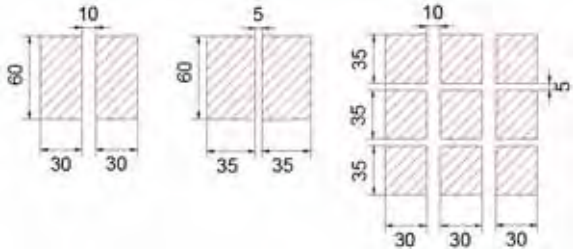
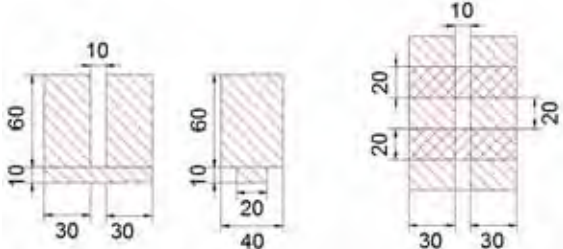
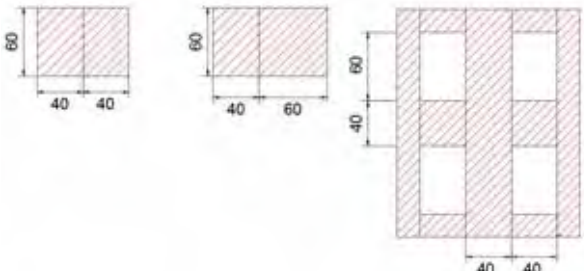
Ak.	Bauteil	Schicht
BRETTSTAPELDECKE		
BS		- 80 mm Zementestrich - 22 mm Mineralwolle Trittschall-dämmung II - 20 mm Mineralwolle Trittschall-dämmung III - 120 mm Überbeton - 120 mm Brettschichtholz (Buche)
Doppelprofil		- Oben Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern. - Oben Rechts: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter. - Unten: Perspektivische Darstellung der Profilierung.
Trapez		- Vertikalschnitt senkrecht zur Profilierungsebene
Würfel		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Lattenrost		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Kassettendecke		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt

Tabelle 19: Beschreibung der Brettstapeldecke mit Fichte mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhen.

4.3.2.2 Holzbetonverbunddecke

Auch für die Holzbetondecken wurden dreidimensionale Profilierungen der Deckenunterseite mit einer begrenzten Aufbauhöhe von 60 mm bis 70 mm berechnet.

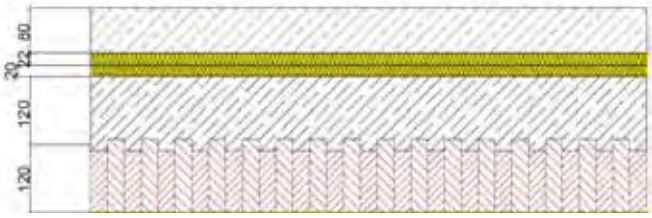
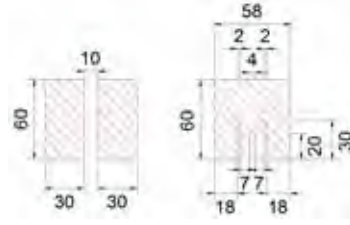
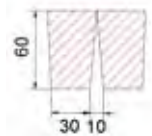
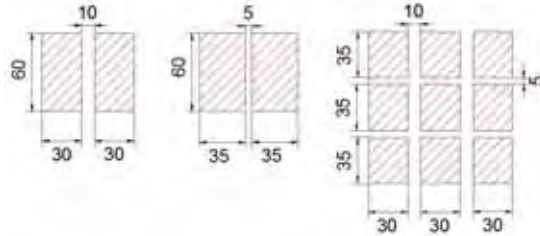
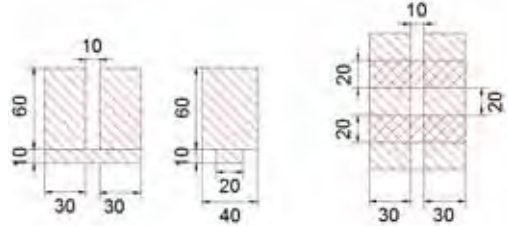
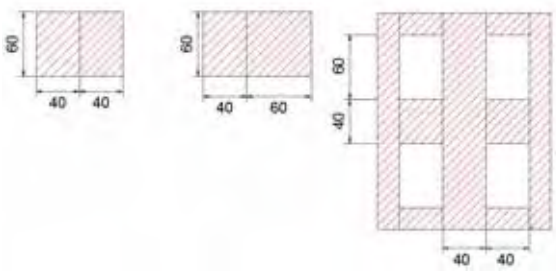
Ak.	Bauteil	Schicht
HOLZBETONVERBUNDDECKE		
HBV		- 80 mm Zementestrich - 22 mm Mineralwolle Trittschalldämmung II - 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung III - 120 mm Überbeton - 120 mm Brettschichtholz (Fichte)
Doppelprofil		- Oben Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern. - Oben Rechts: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter. - Unten: Perspektivische Darstellung der Profilierung.
Trapez		- Vertikalschnitt senkrecht zur Profilierungsebene
Würfel		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Lattenrost		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Kassettendecke		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt

Tabelle 20: Beschreibung der Holzbetonverbunddecke mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzter Aufbauhöhe

4.3.2.3 Hohlkastendecke

Auch für die Hohlkastendecke wurden dreidimensionale Profilierungen der Deckenunterseite mit einer begrenzten Aufbauhöhe von 60 mm bis 70 mm berechnet.

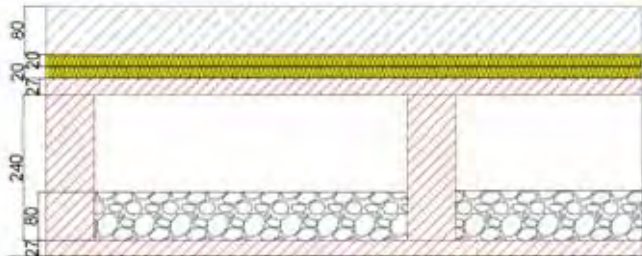
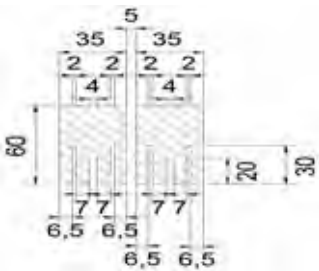
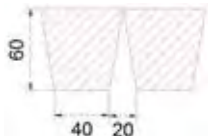
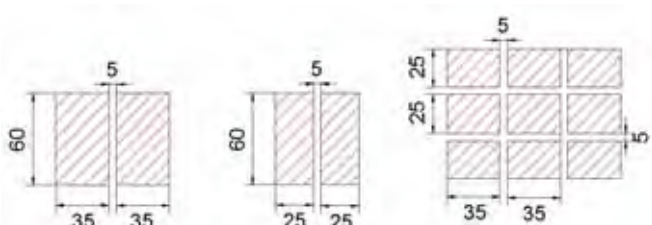
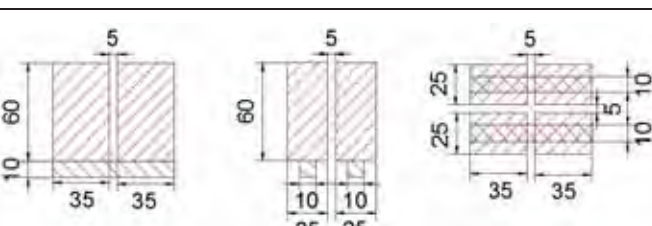
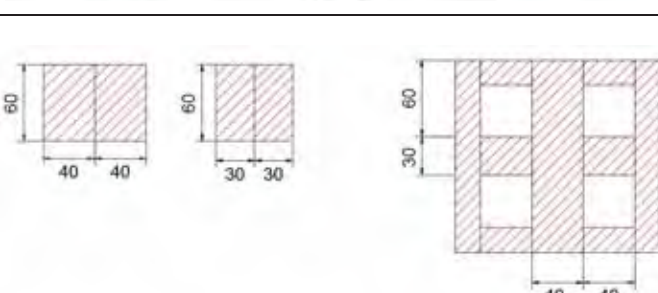
Ak.	Bauteil	Schicht
HOHLKASTENDECKE		
HKD		- 80 mm Zementestrich - 2 x 20 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 27 mm Holzwerkstoffplatte (Fichte) - 240 mm Holzbalken (b = 80 mm/e = 600 mm - Fichte) - 80 mm Splitt (zwischen Balken) - 27 mm Holzwerkstoffplatte (Fichte)
Doppelprofil		- Oben Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern. - Oben Rechts: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter. - Unten: Perspektivische Darstellung der Profilierung.
Trapez		- Vertikalschnitt senkrecht zur Profilierungsebene
Würfel		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Lattenrost		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Kassettendecke		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt

Tabelle 21: Beschreibung der Hohlkastendecke mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhen

4.3.2.4 Rippendecke

Auch für die Rippendecke wurden dreidimensionale Profilierungen der Deckenunterseite mit einer begrenzten Aufbauhöhe von 60 mm bis 70 mm berechnet.

Ak.	Bauteil	Schicht
RIPPENDECKE		
		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Mineralwolle Trittschalldämmung I - 15 mm OSB - 180 mm Holzbalke (e= 600 mm/b= 100 mm- Fichte) - 80 mm Mineralwolle (zwischen Balken mit abgehängter Decke) - 15 mm Gipsfaserplatte (nur im Grundbau)
Doppelprofil		- Oben Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern. - Oben Rechts: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter. - Unten: Perspektivische Darstellung der Profilierung.
Trapez		- Vertikalschnitt senkrecht zur Profilierungsebene
Würfel		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Lattenrost		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt
Kassettendecke		- Links: Vertikalschnitt senkrecht zu den überstehenden Brettern - Mitte: Vertikalschnitt in der Ebene der überstehenden Bretter - Rechts: Horizontalschnitt

Tabelle 22: Beschreibung der Bauteilschichten der Rippendecke mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhen.

4.3.2.5 Berechnungsergebnisse

Die wirksame Wärmekapazitäten dieser Aufbauten mit den dreidimensionalen Profilierungen werden dreidimensional mit dem Programm ANSYS berechnet.

Die Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der Deckenunterseite sind in Anlage 5 zusammengestellt.

5 Verzeichnisse

5.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der verwandten wärmeschutztechnischen Kennwerte der Materialien für die Berechnungen, in Anlage 1 findet man eine detaillierte Tabelle mit den Quellenangaben. Die Abkürzung R steht für radial, T für tangential und L für longitudinal bei anisotropen Holz	6
Tabelle 2: Kurzbezeichnungen der Varianten der Decken und Unterdecken.	7
Tabelle 3: Beschreibung der Bauteilschichten der Holzbetonverbunddecke, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken	8
Tabelle 4: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecken, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken	9
Tabelle 5: Beschreibung der Bauteilschichten der Hohlkastendecken, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken	10
Tabelle 6: Beschreibung der Bauteilschichten der Rippendecken, des Fussbodenaufbaus und der abgehängten Decken	11
Tabelle 7: Kurzbezeichnungen der Varianten der Holzart und der Orientierung der Wärmeleitfähigkeit für die Brettstapeldecke.	12
Tabelle 8: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke für Fichte, Eiche und Buche	13
Tabelle 9: Kurzbezeichnungen der Varianten der Decken, Unterdecken, der Holzart und der Richtung der Wärmeleitfähigkeit.	14
Tabelle 10: Beschreibung der Bauteilschichten der Holzbetonverbunddecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.	15
Tabelle 11: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.	16
Tabelle 12: Beschreibung der Bauteilschichten der Hohlkastendecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.	17
Tabelle 13: Beschreibung der Bauteilschichten der Rippendecke mit der Unterdecke aus den Holzarten Fichte und Buche.	18
Tabelle 14: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke mit Profilierungen unterschiedlicher Abwicklungslängen.	20
Tabelle 15: Beschreibung der Bauteilschichten der Brettstapeldecke mit Profilierungen unterschiedlicher Abwicklungslängen.	21
Tabelle 16: Geometrien verschiedener dreidimensionaler Profilierungen der Deckenunterseite.	22
Tabelle 17: Beschreibung der Brettstapeldecke mit den Geometrien der optimierten dreidimensionalen Profilierungen mit Fichte.	24
Tabelle 18: Beschreibung der Brettstapeldecke mit den Geometrien der optimierten dreidimensionalen Profilierungen mit Buche.	25
Tabelle 19: Beschreibung der Brettstapeldecke mit Fichte mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhen.....	26
Tabelle 20: Beschreibung der Holzbetonverbunddecke mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhe.....	27
Tabelle 21: Beschreibung der Hohlkastendecke mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhen	28

Tabelle 22: Beschreibung der Bauteilschichten der Rippendecke mit den Geometrien dreidimensionaler Profilierungen mit begrenzten Aufbauhöhen.....	29
---	----

5.2 Anlagen

Anlage 1: Eigenschaften der Materialien.....	33
Anlage 2: Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der abgehängten Decken	35
Anlage 3: Einfluss der Anisotropie des Holzes und der Holzart auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite	44
Anlage 4: Einfluss zweidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität der Brettstapeldecke.....	50
Anlage 5: Einfluss dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit für alle Deckentypen	53

Anlage 1: Eigenschaften der Materialien

Anlage 1:Eigenschaften der Materialien

Element	Material	Quelle	Rohdichte ρ	Spezifische Kapazität c _p	volumetrische Kapazität	Wärmeleitfähigkeit λ
Balken	Massivholz	EN ISO 10456	kg/m ³	J/kg·K	MJ/m ³ ·K	W/m·K
Brettschichtholz	Holz	EN ISO 10456	500	1600	0.80	0.130
Brettstapel	Holz	EN ISO 10456	500	1600	0.80	0.130
Dreischichtplatte	Holz	LESOSAI	470	1440	0.68	0.230
Gipsfaserplatte	Gipsfaser	EN ISO 10456	1200	1008	1.21	0.430
Gipskartonplatte	Gipskarton	EN ISO 10456	700	1008	0.71	0.210
Holzwerkstoffplatte	Holz	EN ISO 10456	600	1692	1.02	0.140
Luft	Luft					
100 mm (162 mm, 80 mm, 160 mm)		EN ISO 6946	1.23	1008	0.00	0.455
50 mm (62mm, 40 mm)		EN ISO 6946	1.23	1008	0.00	0.238
Massivholz	Holz	EN ISO 10456	500	1584	0.79	0.130
Trittschalldämmung I	Mineralwolle	PRODUKTDATENBLATT (SAGLAN- T ST)	80	1030	0.08	0.033
Trittschalldämmung II	Mineralwolle	PRODUKTDATENBLATT (Isocalor- Isover)	80	1030	0.08	0.035
Trittschalldämmung III	Mineralwolle	PRODUKTDATENBLATT (PS81- Isover)	80	1030	0.08	0.032
Hohlraumbedämpfung	Mineralwolle	PRODUKTDATENBLATT (SAGLAN- T SA30)	30	1030	0.03	0.033
OSB Platte	OSB	Bauphysik Kalender 2013	615	1500	0.92	0.130
Splitt	Splitt	Basiskatalog Österreich	1800	1000	1.80	0.700
Überbeton	Beton	EN ISO 10456	2400	1008	2.42	2.500
Zementestrich	Zement	EN ISO 1745	2200	1008	2.22	1.400
Nutholz leicht	Holz	EN ISO 10456	500	1600	0.80	0.130
Nutholz schwer	Holz	EN ISO 10456	700	1600	1.12	0.180
Fichte	Holz	W. U. Sonderegger ¹ / M. Fleischmann ²	420	1510	0.63	R= 0.09 T= 0.07 L= 0.22
Eiche	Holz	P. Niemz ³	640	1590	1.02	R=0.17 T= 0.14 L= 0.29
Buche	Holz	W. U. Sonderegger ¹ / M. Fleischmann ²	720	2021	1.46	R=0.12 T= 0.09 L= 0.26

¹ 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.

² M. Fleischmann; «Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells», Doctoral Thesis; TU Wien; 2005.

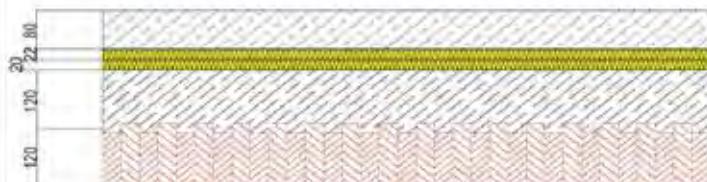
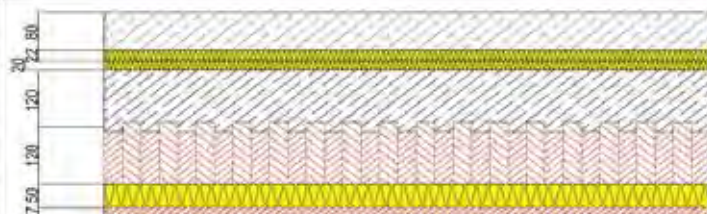
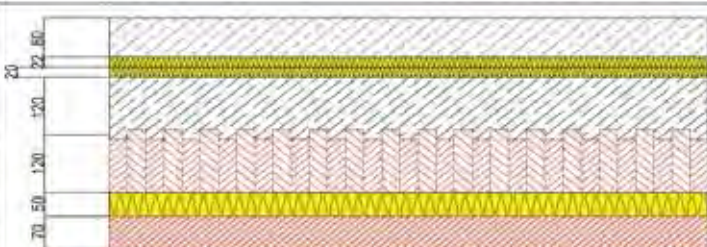
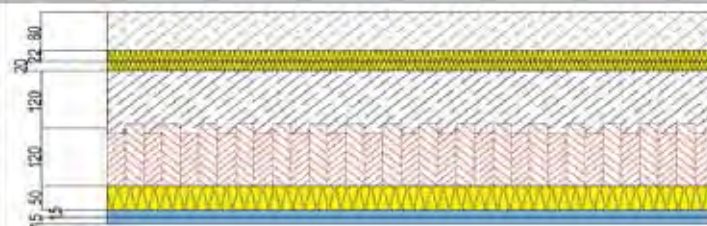
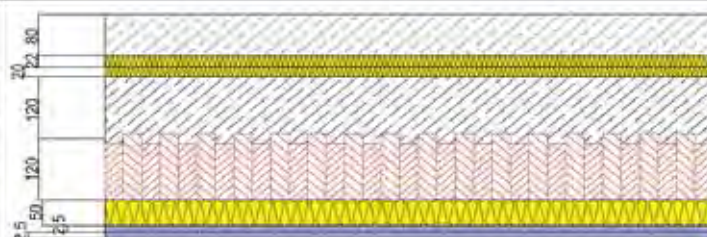
³ P. Niemz, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe, DRW- Verlag, 1993.

Anlage 2: Rechenwerte der wirksamen Wärmekapazität der abgehängten Decken

Anlage 2.1: Holzbetonverbunddecke (1 von 2)

	Schichten	Dichte d	Rohdichte ρ	Wärmeleitfähigkeit λ	Spezifische Wärmekapazität c_p	volumetrische Wärmekapazität VHC	Wärmedurchgangswiderstand R
		mm	kg/m ³	W/m · K	J/kg · K	MJ/m ³ · K	
	Wärmeübergang oben						0.13
	Zementestrich	80	2200	1.4	1008	2.22	0.06
	Trittschalldämmung II	22	80	0.04	1030	0.08	0.63
	Trittschalldämmung III	20	80	0.03	1030	0.08	0.63
	Überbeton	120	2400	2.5	1008	2.42	0.05
	Brettschichtholz	120	500	0.13	1584	0.79	0.92
	Hohlraumbedämpfung	50	30	0.03	1030	0.03	1.67
	Massivholz	27	500	0.13	1584	0.79	0.21
	Massivholz	70	500	0.13	1584	0.79	0.54
	Gipsfaserplatte	15	1200	0.43	1008	1.21	0.03
	Gipskartonplatte	12.5	700	0.21	1008	0.71	0.06
	Wärmeübergang unten						0.13

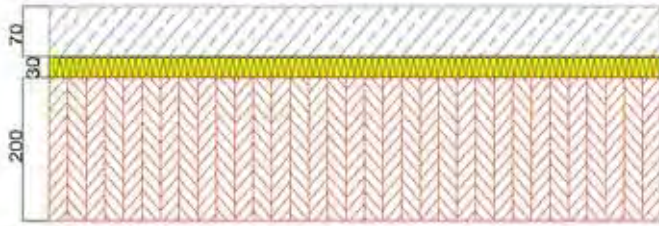
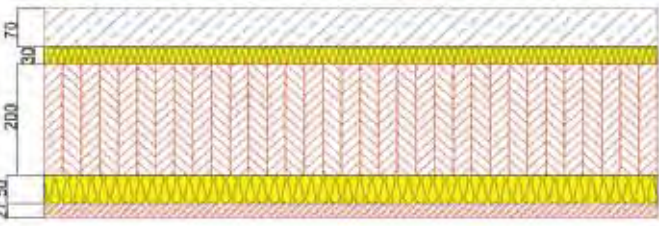
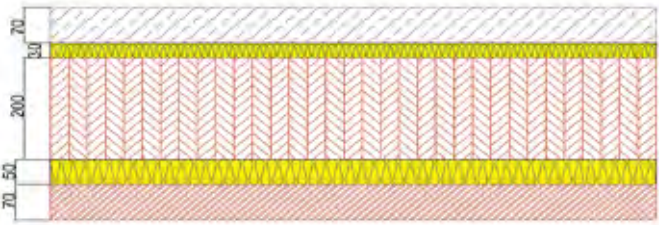
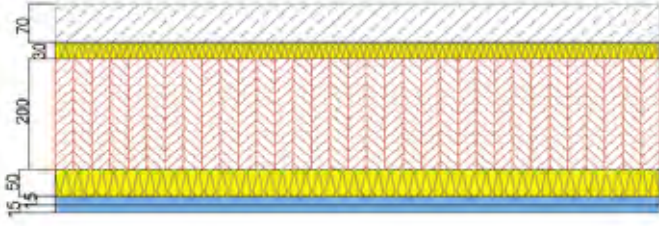
Anlage 2.1: Holzbetonverbunddecke (2 von 2)

		Zementestrich	Mineralwolle	Überbeton	Brettschichtholz					
		Trittschalldämmung II	Trittschalldämmung III	Gipsfaserplatte	Gipskartonplatte	Massivholz	Wärmedurchgangswiderstand R_D	Wärmedurchgangskoeffizient U	Wirksame Wärmekapazität oben K_{oben}	Wirksame Wärmekapazität unten K_{unten}
							$m^2 K/W$	$W/m^2 K$	$kJ/m^2 K$	$kJ/m^2 K$
HBV			2.54	0.39	80	29				
HBV 27 MH			4.42	0.23	80	21				
HBV 70 MH			4.7	0.21	80	32				
HBV GFP			4.28	0.23	80	33				
HBV GKP			4.33	0.23	80	18				

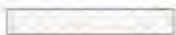
Anlage 2.2: Brettstapeldecke (1 von 2)

	Schichten	Dichte d	Rohdichte ρ	Wärmeleitfähigkeit λ	Spezifische Wärmekapazität c_s	volumetrische Wärmekapazität VHC	Wärmedurchgangswiderstand R
		mm	kg/m ³	W/m·K	J/kg·K	MJ/m ³ ·K	m ² K/W
	Wärmeübergang oben						0.13
	Zementestrich	70	2200	1.4	1008	2.22	0.05
	Trittschalldämmung I	30	80	0.03	1030	0.08	0.94
	Brettstapel	200	500	0.13	1584	0.79	1.54
	Hohlraumbedämpfung	50	30	0.03	1030	0.03	1.67
	Massivholz	27	500	0.13	1584	0.79	0.21
	Massivholz	70	500	0.13	1584	0.79	0.54
	Gipsfaserplatte	15	1200	0.43	1008	1.21	0.03
	Gipskartonplatte	12.5	700	0.21	1008	0.71	0.06
	Wärmeübergang unten						0.13

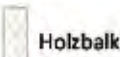
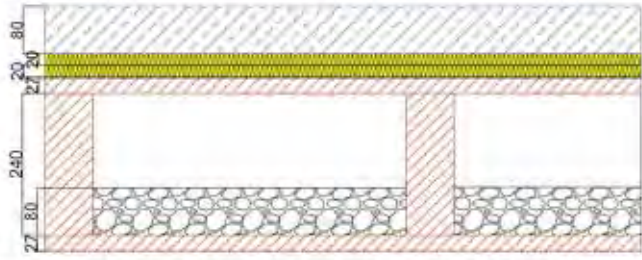
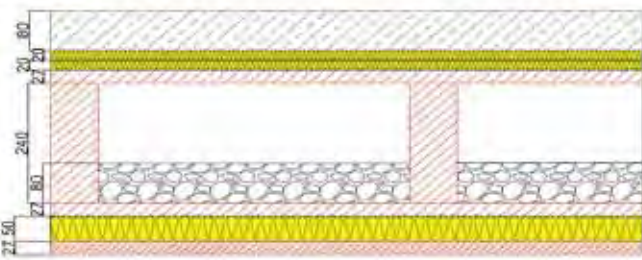
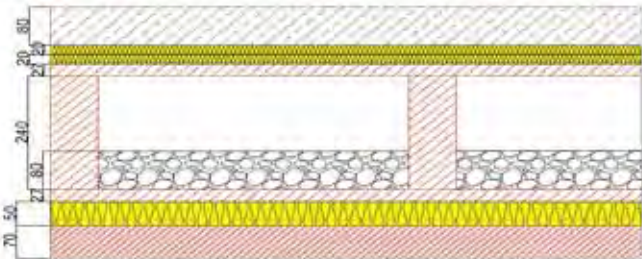
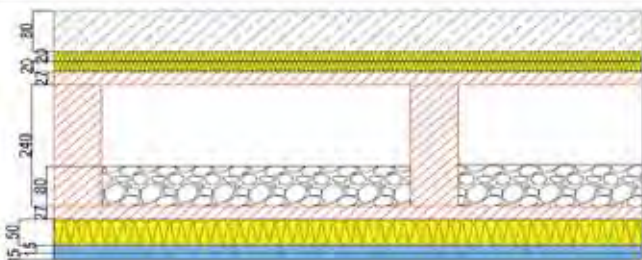
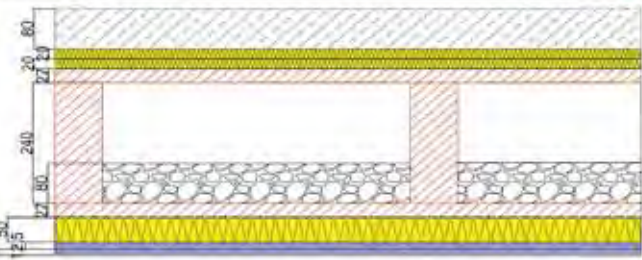
Anlage 2.2: Brettstapeldecke (2 von 2)

		 Zementestrich  Trittschalldämmung I  Gipsfaserplatte  Gipskartonplatte  Massivholz  Mineralwolle  Brettstapel	Wärmedurchgangswiderstand R_{tr} m^2K/W	Wärmedurchgangskoeffizient U W/m^2K	Wirksame Wärmekapazität oben K_{oben} kJ/m^2K	Wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} kJ/m^2K
BS			2.79	0.36	78	29
BS 27 MH			4.66	0.22	78	20
BS 70 MH			4.99	0.20	78	31
BS GFP			4.52	0.22	78	33
BS GKP			4.57	0.22	78	18

Anlage 2.3: Hohlkastendecke (1 von 2)

Schichten	Dichte d	Rohdichte ρ	Wärmeleitfähigkeit	Spezifische Wärmekapazität c	volumetrische Wärmekapazität VHC	Wärmedurchgangswiderstand R
	mm	kg/m ³	W/m · K	J/kg · K	MJ/m ³ · K	m ² K/W
Wärmeübergang oben						0.13
 Zementestrich	80	2200	1.4	1008	2.22	0.06
 Trittschalldämmung I	20	80	0.03	1030	0.08	0.63
 Holzwerkstoffplatte	27	600	0.14	1692	1.02	0.19
 Splitt	80	1800	1.8	1000	1.80	0.04
 Holzbalken (b= 80 mm/e= 600 mm)	240	500	0.13	1584	0.79	1.85
 Hohlraumbedämpfung	50	30	0.03	1030	0.03	1.67
 Massivholz	27	500	0.13	1584	0.79	0.21
 Massivholz	70	500	0.13	1584	0.79	0.54
 Gipsfaserplatte	15	1200	0.43	1008	1.21	0.03
 Gipskartonplatte	12.5	700	0.21	1008	0.71	0.06
Wärmeübergang unten						0.13

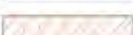
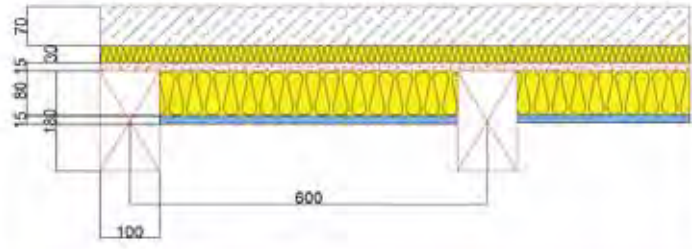
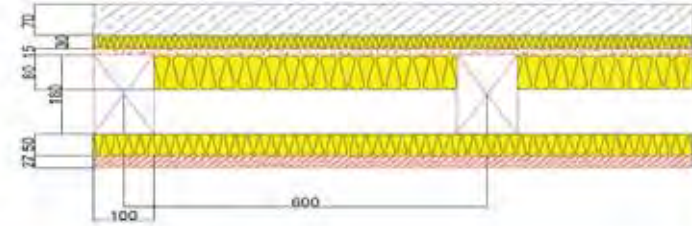
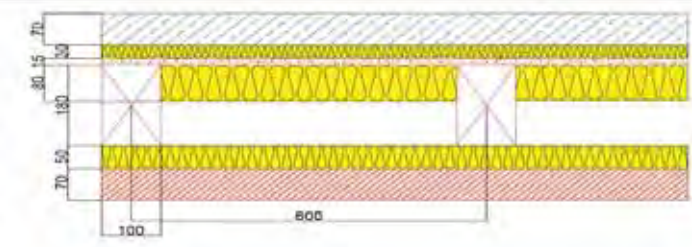
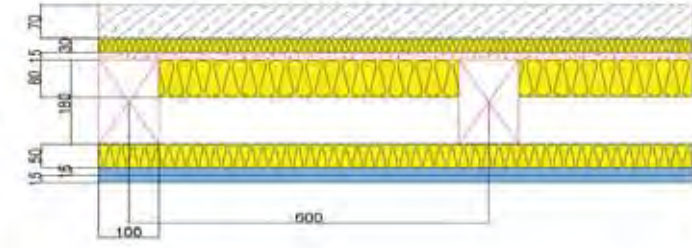
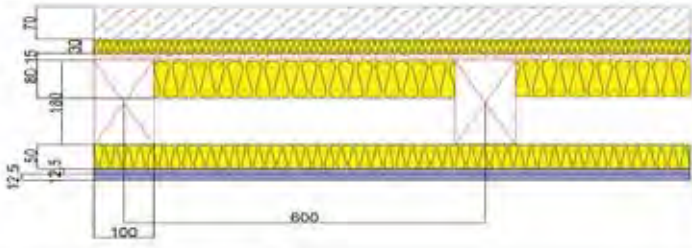
Anlage 2.3: Hohlkastendecke (2 von 2)

		 Zementestrich  Holzwerkstoffplatte  Trittschalldämmung I  Gipsfaserplatte  Gipskartonplatte  Massivholz	 Mineralwolle  Splitt  Holzbalken	Wärmedurchgangswiderstand R_T $\text{m}^2\text{K/W}$	Wärmedurchgangskoeffizient U $\text{W/m}^2\text{K}$	Wirksame Wärmekapazität oben K_{oben} $\text{kJ/m}^2\text{K}$	Wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} $\text{kJ/m}^2\text{K}$
HKD				4.2	0.20	81	40
HKD 27 MH				6.1	0.16	80	20
HKD 70 MH				6.4	0.16	80	31
HKD GFP				5.9	0.17	80	33
HKD GKP				6	0.17	80	18

Anlage 2.4: Rippendecke (1 von 2)

	Schichten	Dichte ρ	Rohdichte ρ_0	Wärmeleitfähigkeit λ	Spezifische Wärmekapazität c	Volymetrische Wärmekapazität VHC	Wärmedurchgangswiderstand R
		mm	kg/m ³	W/m · K	J/kg · K	MJ/m ³ · K	m ² K/W
	Wärmeübergang oben						0.13
	Zementestrich	70	2200	1.4	1008	2.22	0.05
	Trittschalldämmung I	30	80	0.03	1030	0.08	0.94
	OSB	15	650	0.13	1692	1.10	0.12
	Holzbalken (b= 100 mm/e= 600 mm)	180	500	0.13	1584	0.79	1.38
	Hohlraumbedämpfung	80	30	0.03	1030	0.03	2.67
	Hohlraum (zwischen Balken)	100	1.23	0.46	1008	0.00	0.22
	Hohlraumbedämpfung	50	30	0.03	1030	0.03	1.67
	Massivholz	27	500	0.13	1584	0.79	0.21
	Massivholz	70	500	0.13	1584	0.79	0.54
	Gipsfaserplatte	15	1200	0.43	1008	1.21	0.03
	Gipskartonplatte	12.5	700	0.21	1008	0.71	0.06
	Wärmeübergang unten						0.13

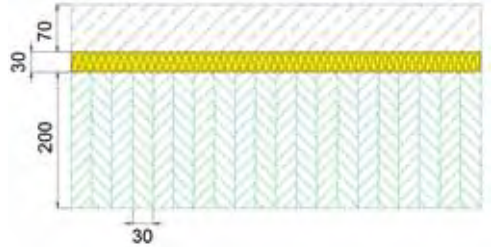
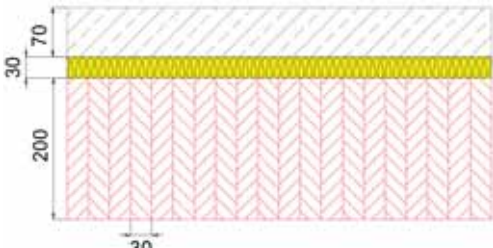
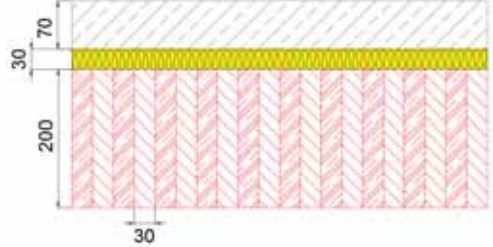
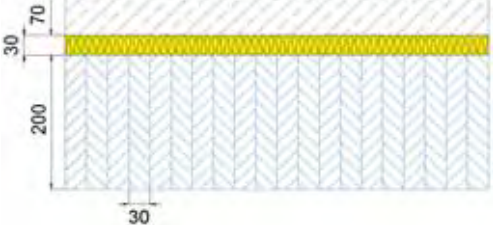
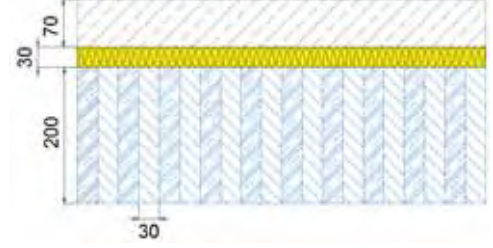
Anlage 2.4: Rippendecke (2 von 2)

	 Zementestrich  OSB Platte  Trittschalldämmung I  Gipsfaserplatte  Gipskartonplatte  Massivholz	 Mineralwolle  Holzbalken	Wärmedurchgangswiderstand R_T $\text{m}^2\text{K/W}$	Wärmedurchgangskoeffizient U $\text{W/m}^2\text{K}$	Wirksame Wärmekapazität oben K_{oben} $\text{kJ/m}^2\text{K}$	Wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} $\text{kJ/m}^2\text{K}$
RD			5.4	0.18	80	19
RD 27 MH			6.5	0.15	79	21
RD 70 MH			7.7	0.13	79	32
RD GFP			6.4	0.16	79	34
RD GKP			6.4	0.16	79	19

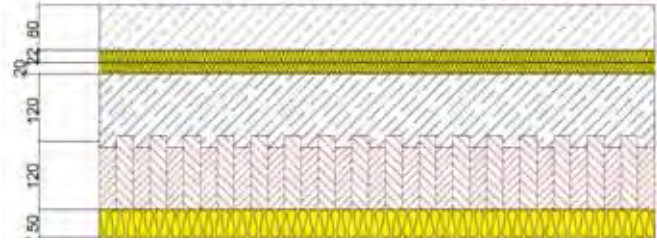
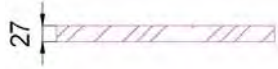
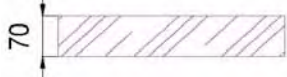
Anlage 3: Einfluss der Anisotropie des Holzes und der Holzart auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite

- einer Brettstapeldecke
- und von abgehängten Decken unter verschiedenen Deckensystemen

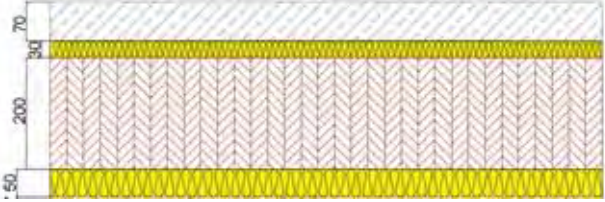
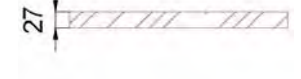
Anlage 3.1: Brettstapeldecke (Fichte, Eiche, Buche) Radial-Tangential/Tangential-Radial

Ak	Bauteil	Schicht	wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} kJ/m ² K
BS_F_RT		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Fichte Radial-Tangential	21
BS_F_TR		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Fichte Tangential-Radial	23
BS_E_RT		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Eiche Radial-Tangential	33
BS_E_TR		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Eiche Tangential-Radial	36
BS_B_RT		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Buche Radial-Tangential	32
BS_B_TR		- 70 mm Zementestrich - 30 mm Trittschalldämmung I - 200 mm Brettstapel: Buche Tangential-Radial	36

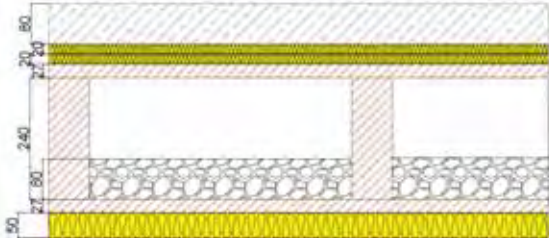
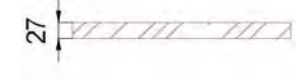
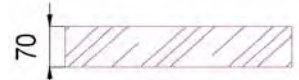
Anlage 3.2: Unterdecke Longitudinal-Radial/Longitudinal-Tangential (Seite 1 von 4)

Ak	Bauteil	wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} kJ/m ² K
HBV		
HBV_F_27LR		22
HBV_F_70LR		28
HBV_F_27LT		22
HBV_F_70LT		28
HBV_B_27LR		38
HBV_B_70LR		44
HBV_B_27LT		36
HBV_B_70LT		40

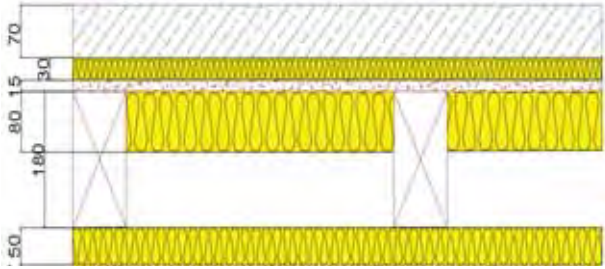
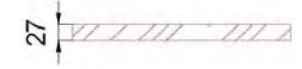
Anlage 3.2: Unterdecke Longitudinal-Radial/Longitudinal-Tangential (Seite 2 von 4)

Ak.	Bauteil	wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} kJ/m ² K
BS		
BS_F_27LR		19
BS_F_70LR		28
BS_F_27LT		19
BS_F_70LT		26
BS_B_27LR		35
BS_B_70LR		39
BS_B_27LT		34
BS_B_70LT		38

Anlage 3.2: Unterdecke Longitudinal-Radial/Longitudinal-Tangential (Seite 3 von 4)

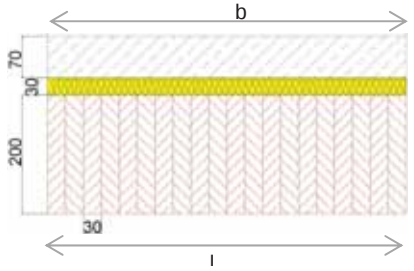
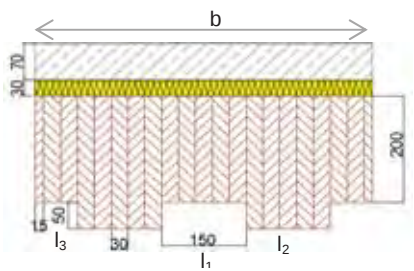
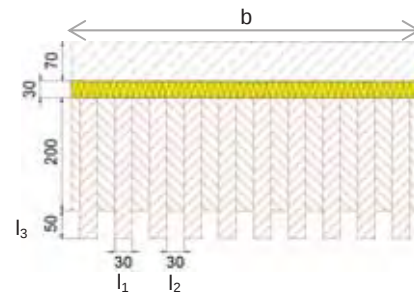
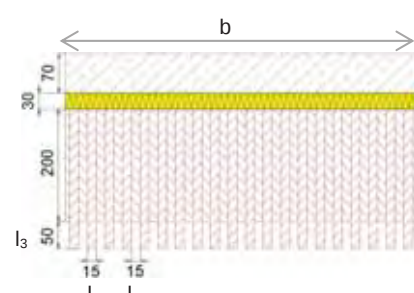
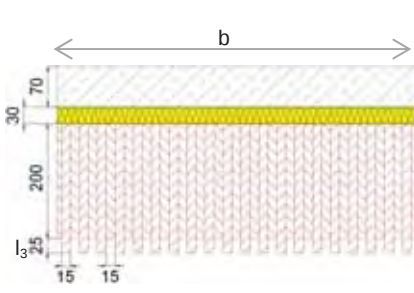
Ak.	Bauteil	wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} kJ/m ² K
HKD		
HKD_F_27LR		20
HKD_F_70LR		28
HKD_F_27LT		19
HKD_F_70LT		26
HKD_B_27LR		35
HKD_B_70LR		42
HKD_B_27LT		34
HKD_B_70LT		38

Anlage 3.2: Unterdecke Longitudinal-Radial/Longitudinal-Tangential (Seite 4 von 4)

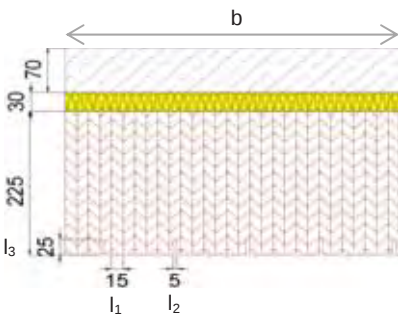
Ak	Bauteil	wirksame Wärmekapazität unten K_{unten} kJ/m ² K
RD		
RD_F_27LR		17
RD_F_70LR		25
RD_F_27LT		17
HBV_F_70LT		23
RD_B_27LR		32
RD_B_70LR		38
RD_B_27LT		31
RD_B_70LT		34

Anlage 4: Einfluss zweidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmekapazität der Brettstapeldecke

Anlage 4: Einfluss zweidimensionaler Profilierung auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite einer Brettstapeldecke (Seite 1 von 2)

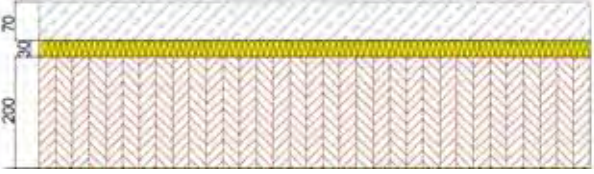
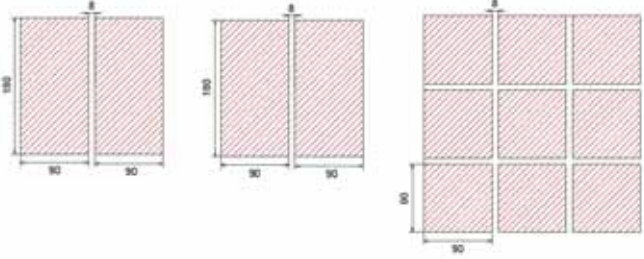
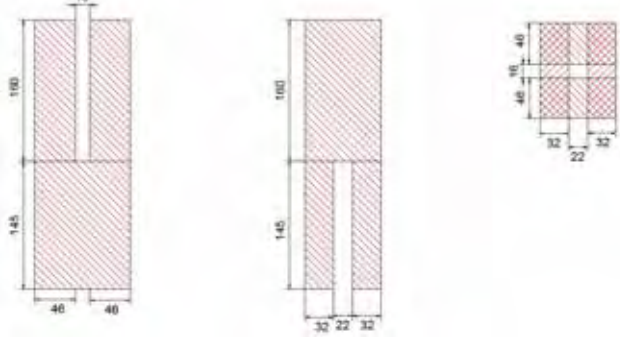
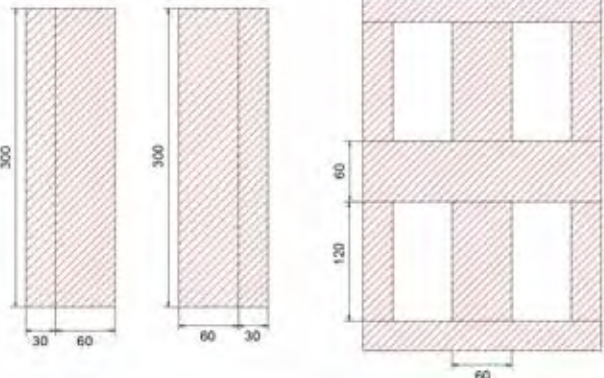
	Bauteil	Abwicklungslänge/Breite	wirksame Wärmekapazität
Original		$b = 300 \text{ mm}$ $l = 300 \text{ mm}$ $b/l = 1$	$\kappa_L = 30 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ $\kappa_S = 39 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
A		$b = 300 \text{ mm}$ $l = 400 \text{ mm}$ $b/l = 1.3$	$\kappa_L = 36 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ $\kappa_S = 47 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
B		$b = 600 \text{ mm}$ $l = 1600 \text{ mm}$ $b/l = 2.7$	$\kappa_L = 43 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ $\kappa_S = 58 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
C		$b = 300 \text{ mm}$ $l = 1300 \text{ mm}$ $b/l = 4.3$	$\kappa_L = 45 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ $\kappa_S = 61 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$
D		$b = 300 \text{ mm}$ $l = 800 \text{ mm}$ $b/l = 2.7$	$\kappa_L = 38 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ $\kappa_S = 50 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$

Anlage 4: Einfluss zweidimensionaler Profilierung auf die wirksame Wärmekapazität der Deckenunterseite einer Brettstapeldecke (Seite 2 von 2)

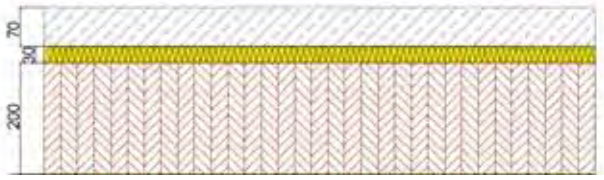
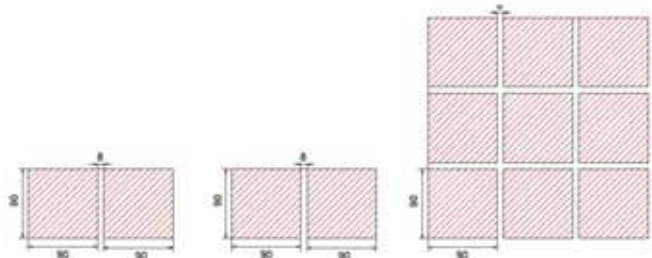
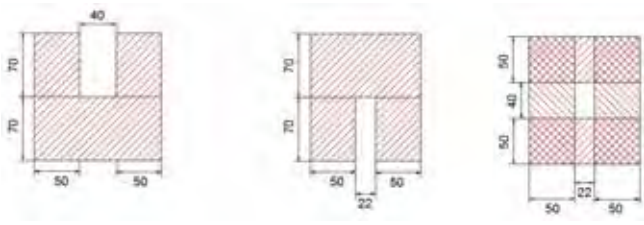
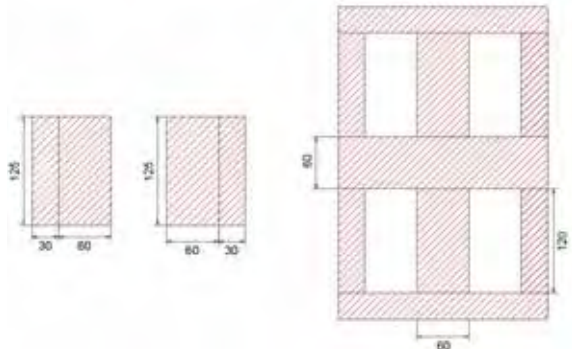
	Bauteil	Abwicklungslänge/Breite	wirksame Wärmekapazität
E		$b = 950 \text{ mm}$ $l = 1450 \text{ mm}$ $b/l = 1.5$	$\kappa_L = 37 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$ $\kappa_S = 49 \text{ kJ/(m}^2\text{K)}$

Anlage 5: Einfluss dreidimensionaler Profilierungen auf die wirksame Wärmespeicherfähigkeit für alle Deckentypen

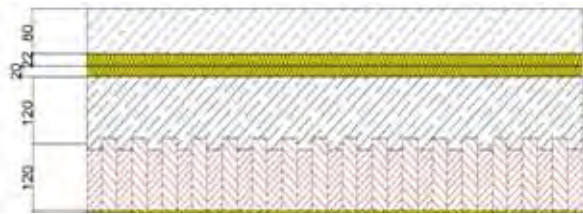
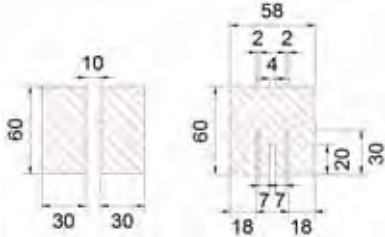
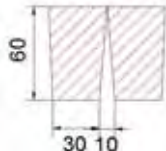
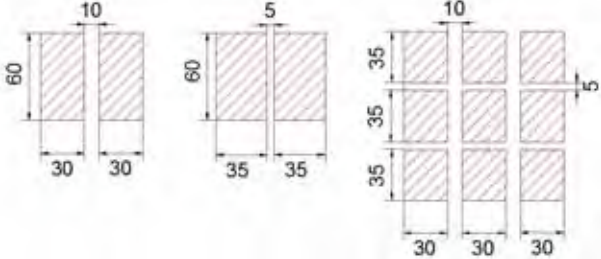
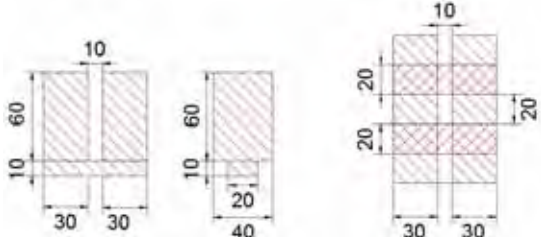
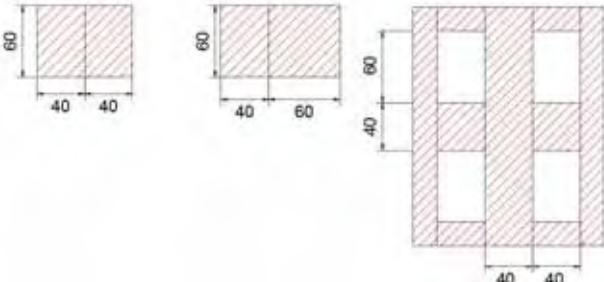
Anlage 5.1: Dreidimensionale Profilierung der Brettstapeldecke mit Fichte ohne Begrenzung der Aufbauhöhe

Ak	Bauteil	wirksame Wärmekapazität κ kJ/(m ² K)	Verbesserung (%)
BS FICHTE		Fichte: 22	-
Würfel		Fichte: 103	368
Lattenrost		Fichte: 137	522.7
Kassetendecke		Fichte: 118	436.4

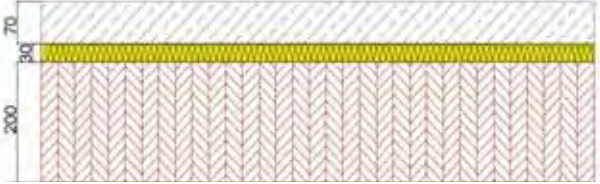
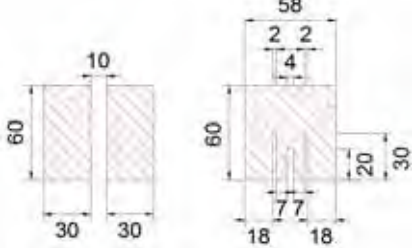
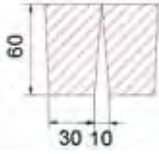
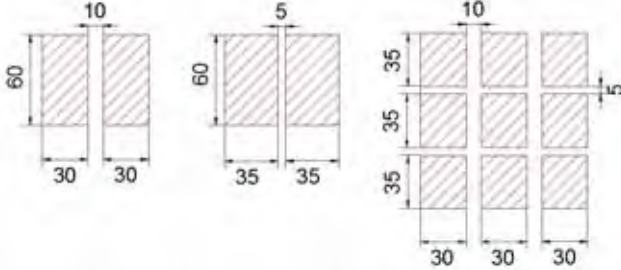
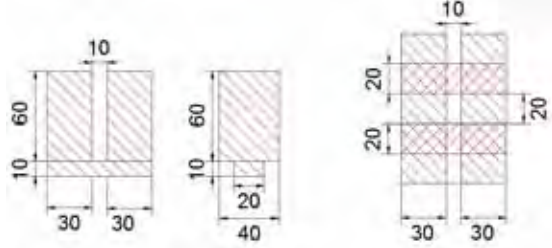
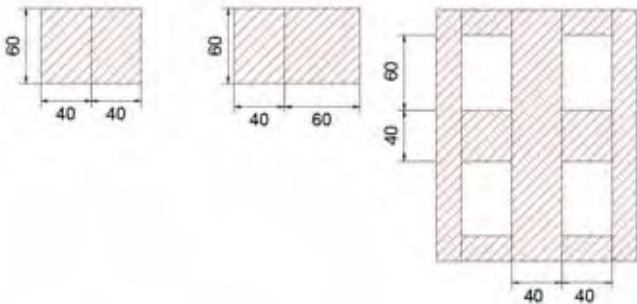
Anlage 5.2: Dreidimensionale Profilierung der Brettstapeldecke mit Buche ohne Begrenzung der Aufbauhöhe

Ak	Bauteil	wirksame Wärmekapazität κ kJ/(m ² K)	Verbesserung (%)
BS BUCHE		Buche: 33	-
Würfel		Buche: 110	233.3
Lattenrost		Buche: 131	275.8
Kassettendecke		Buche: 114	245.5

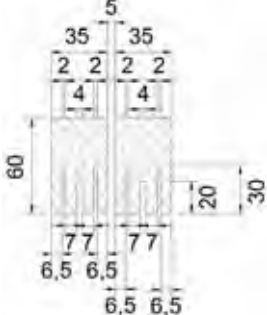
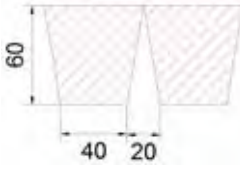
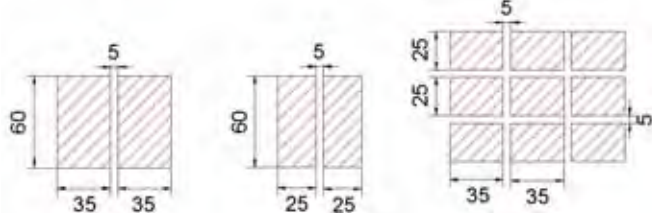
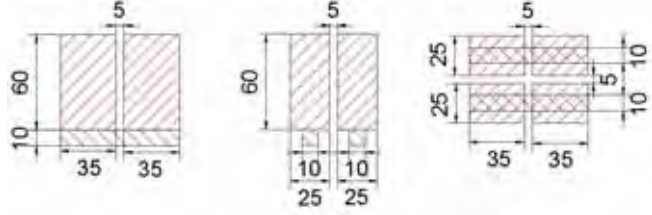
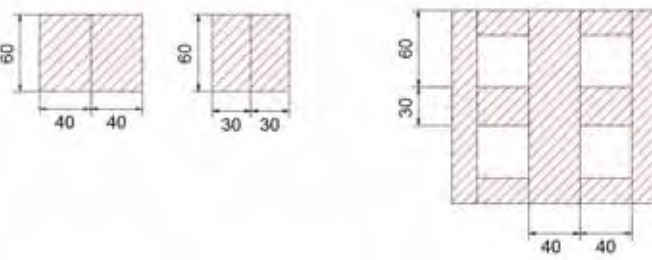
Anlage 5.3: Verbesserung der Holzbetonverbunddecke durch dreidimensionale Profilierung mit Begrenzung der Aufbauhöhe

Ak.	Bauteil	wirksame Wärmekapazität κ kJ/(m ² K)	Verbesserung (%)
HBV		Fichte: 29	-
Doppelprofil		Fichte: 44	51.7
Trapez		Fichte: 43	48.2
Würfel		Fichte: 43	48.3
Lattenrost		Fichte: 49	69
Kassetendecke		Fichte: 42	44.8
		Buche: 81	131.4

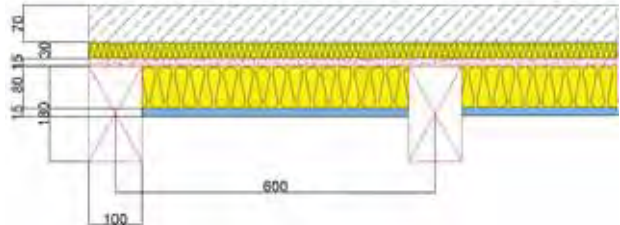
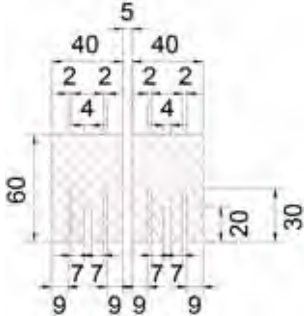
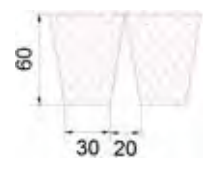
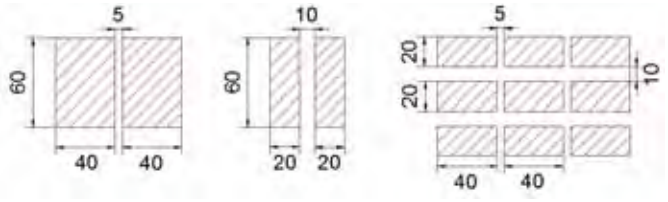
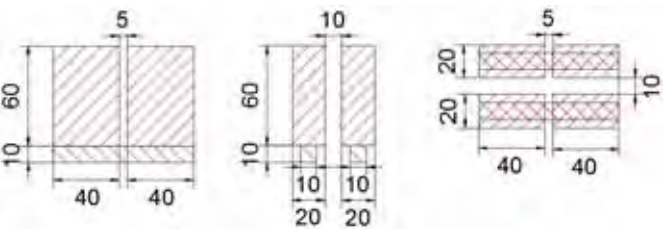
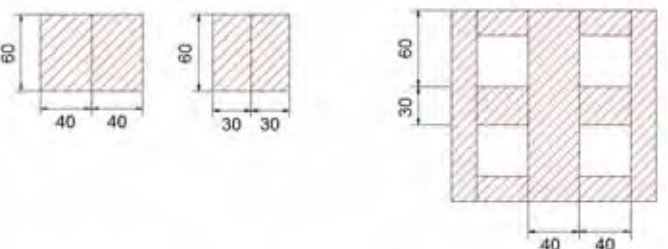
Anlage 5.4: Verbesserung der Brettstapeldecke durch dreidimensionale Profilierung mit Begrenzung der Aufbauhöhe

Ak.	Bauteil	wirksame Wärmekapazität κ kJ/(m ² K)	Verbesserung (%)
BS		Fichte: 22	-
Doppelprofil		Fichte: 44	100
Trapez		Fichte: 43	95
Würfel		Fichte: 43	95
Lattenrost		Fichte: 49	123
Kassetendecke		Fichte: 42	91
		Buche: 81	145.5

Anlage 5.5: Verbesserung der Hohlkastendecke durch dreidimensionale Profilierung mit Begrenzung der Aufbauhöhe

Ak.	Bauteil	wirksame Wärmekapazität κ kJ/(m ² K)	Verbesserung (%)
HKD		Fichte: 26	-
Doppelprofil		Fichte: 48	84.6
Trapez		Fichte: 37	42.3
Würfel		Fichte: 46	76.9
Lattenrost		Fichte: 48	84.6
Kassetendecke		Fichte: 45	73
		Buche: 85	157.6

Anlage 5.6: Verbesserung der Rippendecke durch dreidimensionale Profilierung mit Begrenzung der Aufbauhöhe

Ak.	Bauteil	wirksame Wärmekapazität κ kJ/(m ² K)	Verbesserung (%)
RD		Fichte: 36	-
Doppelprofil		Fichte: 52	44.4
Trapez		Fichte: 49	36.1
Würfel		Fichte: 45	25
Lattenrost		Fichte: 46	27.8
Kassettendecke		Fichte: 61	69.4
		Buche: 99	130



Messbericht

Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Brettstapeldecke in Anlehnung an SN EN ISO 12567-1 und SN EN ISO 8990

Adresse der
Forschungsstelle

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Kompetenzbereich Bauphysik und Energie
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel

www.ahb.bfh.ch

Sachbearbeiter/in


Prof. Dr. Christoph Geyer/Amabel Melián Hernández

Datum

31. Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Beschreibung der Anlage	3
3	Messverfahren	5
3.1	Kalibriermessungen	5
3.1.1	Gesamtwärmeübergangswiderstand	5
3.1.2	Konvektiver Anteil	6
3.1.3	Prüfraumen und Randkorrekturen	6
3.2	Messung an den Probekörpern	7
3.3	Darstellung der Ergebnisse für genormte Prüfanwendungen	8
3.4	Stabilitätskriterien für eine gültige Messung	8
4	Durchführung der Messungen	9
4.1	Termin	9
4.2	Beschreibung des Prüfkörpers	9
4.3	Einbau des Prüfkörpers	10
4.4	Messgeräte	12
5	Messergebnisse	12
5.1	Messung bei einer Mitteltemperatur von 10° C	12
5.2	Messung bei einer Mitteltemperatur von 5° C	13
5.3	Messung bei einer Mitteltemperatur von 15° C	14
6	Verzeichnisse	15
6.1	Tabellenverzeichnis	15
6.2	Abbildungsverzeichnis	15
7	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	15
Anhang A: Detaillierte Information der Prinzipskizze		16
Anhang B: Prüfprotokolle		18

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes „Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit“, gefördert von der Bundesamt für Umwelt, wird der Wärmedurchgangskoeffizient einer Brettstapeldecke bestimmt.

2 Beschreibung der Anlage

Die Installation befindet sich in den Laboreinrichtungen der Berner Fachhochschule in Biel. Die Anlage besteht aus zwei Klimakammern, die als Warm- und als Kaltseite bezeichnet werden. Die Abmessung (Breite, Höhe und Tiefe) der Warmseite ist (3600 x 3600 x 2100) mm. Im Innern der Warmseite befindet sich die sogenannte Hotbox. Diese Hotbox hat die Dimensionen (2740 x 2740 x 1050) mm. Die Dimensionen der Kaltseite ist (3600 x 3600 x 1500) mm.

zwischen beiden Klimakammern ist der Prüfraum mit der Prüfmassage installiert, in den der Probekörper installiert wird. Dieser Prüfraum ist (3600 x 3600 x 196) mm gross. Die Öffnung in der Prüfmassage misst (1230 x 1480 x 196) mm. Der Prüfraum weist einen hohen Wärmedurchlasswiderstand auf, hält den Probekörper in der richtigen Stellung und trennt die Warmseite von der Kaltseite.

Die folgende Abbildung zeigt eine Prinzipskizze der Anlage. Detaillierte Information findet man in Anhang A.

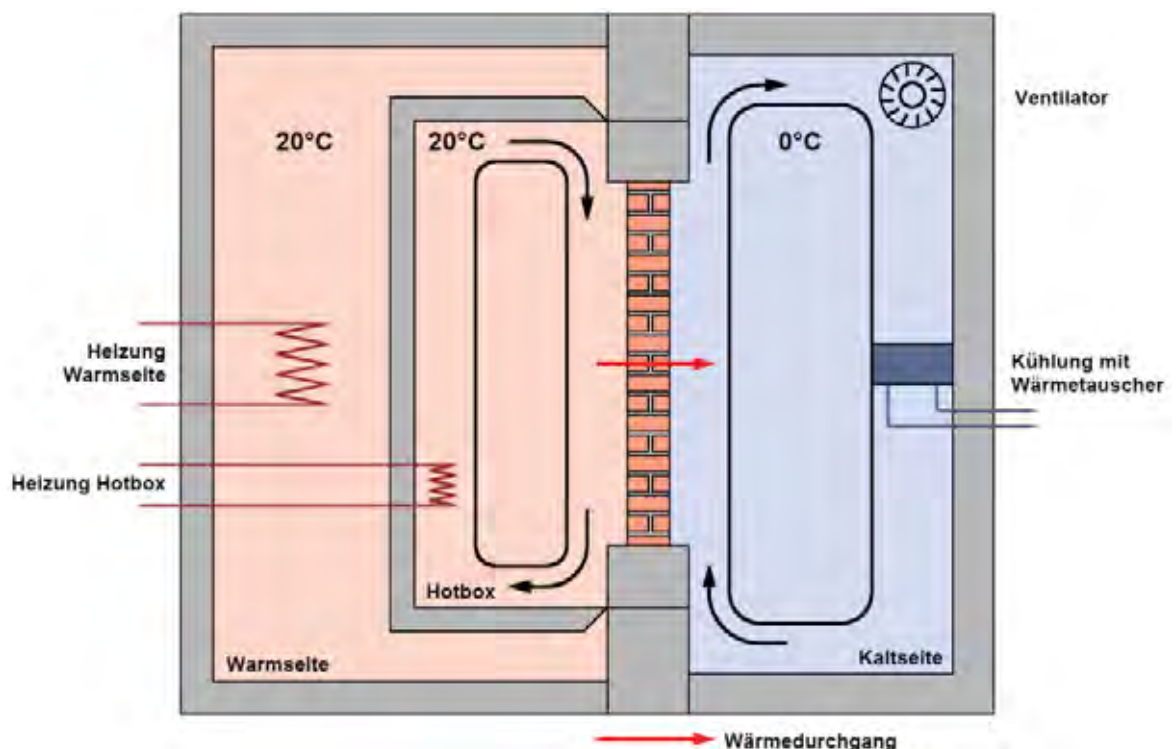


Abbildung 1: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN-ISO 12567-1 [1].

Abbildung 2 zeigt eine Prinzipskizze der Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für den Probekörper.

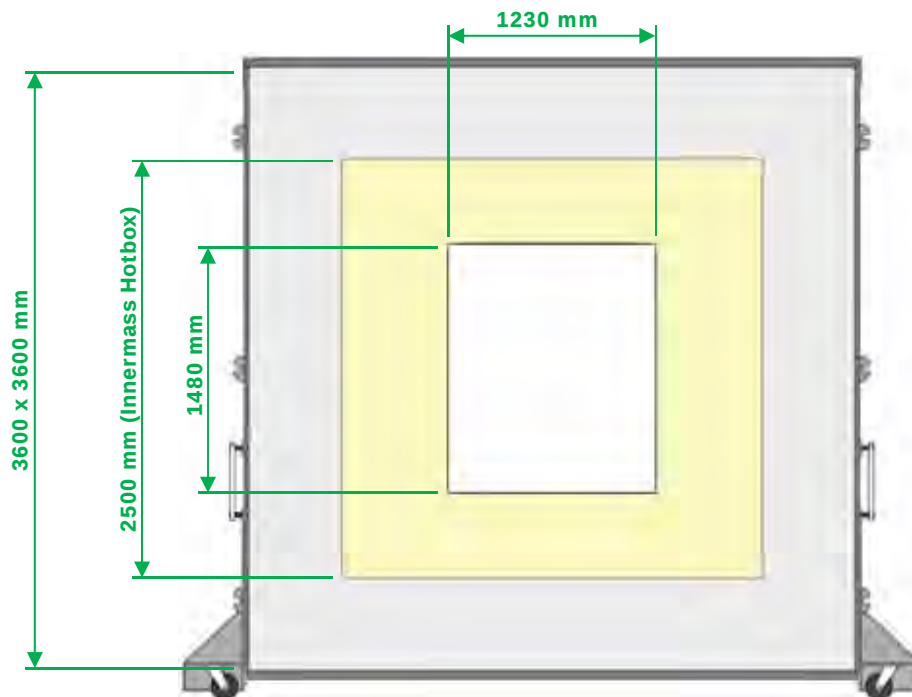


Abbildung 2: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für Probekörper

In den Klimakammern befinden sich Luftleitbleche. Die Luftleitbleche sind verfahrbar (seitliche Stellschrauben) um eine definierte Anströmung des Probekörpers zu erreichen. Die Strömungsrichtung ist am Probekörper kaltseitig von unten nach oben und warmseitig von oben nach unten. Die Konvektion ist beidseitig erzwungen.

Die Thermostate der Kalt- und der Warmseite sind wandseitig an den Kammerhälften montiert und verfahren mit den Kammerhälften. Elektrotabelleau (mit Hauptschalter), Pneumatik und Medienanschlüsse befinden sich an der Wand hinter dem geregelten Heizkasten, wie auch die Rückkühlung der beiden Thermostate.

Grundsätzlich ist die Steuerung und Regelung des Heizkastens dezentral und vom Rechner unabhängig, der nur Sollwerte übermittelt und Kontrollwerte aufzeichnet. Die Thermostate haben eigene PID Kontrolle Parameter (Proportional, integral and derivated terms), die sind entscheidend für ein optimales Einregeln der Hotbox. Diese Parameter können angepasst werden um den Regler zu optimieren. Diese können am Gerät eingestellt werden. Die PID Regelung des Messkastens und die Feuchterege lung erfolgt über den Hauptrechner und die installierte Software („Hotbox 2014“).

3 Messverfahren

3.1 Kalibriermessungen

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die zusätzlich notwendigen Kalibrierprüfungen nach SN EN ISO 12567-1:2010 [1].

Für die Kalibriermessungen werden Platten mit bekanntem Wärmedurchgang in die Prüfmaste eingebaut. Die Kalibriermessungen müssen bei mindestens sechs Wärmestromdichten durchgeführt werden, welche den erwarteten Bereich der Wärmestromdichten der zu prüfenden Probekörper abdecken.

Es wird empfohlen, die Kalibriermessungen bei mindestens drei verschiedenen mittleren Lufttemperaturen $\theta_{c,me}$ (Gleichung 1) in Schritten von ± 5 K durchzuführen, wobei die Lufttemperatur auf der Kaltseite verändert wird und konstante Bedingungen der Luftbewegung auf der Kaltseite und konstante Lufttemperatur auf der Warmseite aufrechterhalten werden sollten. Mit diesem Verfahren können Oberflächenwiderstände und Wärmeübergangskoeffizienten als Funktion der Gesamtwärmestromdichte durch die Kalibrierplatte bestimmt werden.

$$\theta_{c,me} = \frac{\theta_{c,i} + \theta_{c,e}}{2} \text{ °C} \quad (1)$$

Hier bezeichnet:

- $\theta_{c,me}$ den Mittelwert der Lufttemperatur in °C
- $\theta_{c,i}$ die Lufttemperatur der Warmseite in °C
- $\theta_{c,e}$ die Lufttemperatur der Kaltseite in °C

3.1.1 Gesamtwärmeübergangswiderstand

Die erste Kalibrierprüfung ist zwingend die Messung mit dem 20 mm dicken Kalibriernormal bei einer Mitteltemperatur von 10°C. Diese Messung dient zur Einstellung der Luftgeschwindigkeit parallel zum Kalibriernormal und damit zur Einstellung des Wärmeübergangswiderstandes ($\rightarrow$ konvektiver Anteil) auf den Norm-Gesamtwärmeübergangswiderstand von $(0.17 \pm 0.01) \text{ (m}^2\text{K)/W}$. Die dabei eingestellten Strömungsgeschwindigkeiten (Luft, Warm- und Kaltseite) werden für alle folgenden Kalibriermessungen und den auf diesen Kalibriermessungen beruhenden Prüfungen beibehalten.

Die Berechnungen und die Darstellung der Ergebnisse folgen dem im Anhang D der SN EN ISO 12567-1 [1] dargestellten Verfahren.

Der Gesamtwärmeübergangswiderstand der Warm- und der Kaltseite $R_{s,t}$ ist nach Gleichung 2 zu berechnen:

$$R_{s,t} = \frac{\Delta\theta_{n,cal} - \Delta\theta_{s,cal}}{q_{cal}} \cdot \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (2)$$

Dabei ist

- $\Delta\theta_{n,cal}$ die Differenz aus den Umgebungstemperaturen auf jeder Seite der Kalibrierplatte, in Kelvin, berechnet nach SN EN ISO 12567-1:2010, Anhang A.

- $\Delta\theta_{s,cal}$ die Oberflächentemperaturdifferenz der Kalibrierplatte in Kelvin
- q_{cal} die Wärmestromdichte der Kalibrierplatte, bestimmt aus dem bekannten Wärmedurchlasswiderstand R_{cal} der Kalibrierplatte (bei der Mitteltemperatur θ_{cal}) und der Oberflächentemperaturdifferenz $\Delta\theta_{s,cal}$, berechnet nach Gleichung 3.

$$q_{cal} = \frac{\Delta\theta_{s,cal}}{R_{cal}} \frac{W}{m^2} \quad (3)$$

Dabei ist

- R_{cal} der Wärmedurchlasswiderstand der Kalibrierplatte bei der mittleren Temperatur der Platte, berechnet nach Gleichung 4.

$$R_{cal} = \sum \frac{d_j}{\lambda_j} \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (4)$$

Dabei ist

- d_j die Dicke der Schicht j in m
- λ_j die Wärmeleitfähigkeit der Schicht j in W/(m·K)

Der Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{s,t}$ ist als Funktion der Wärmestromdichte q_{cal} der Kalibrierplatte graphisch darzustellen. Diese Kenngrößen werden für die Bestimmung der Gesamtwärmeübergangswiderstand alle folgenden Messungen der Probekörper verwendet.

3.1.2 Konvektiver Anteil

Der Strahlungs- und der konvektive Teil der Wärmeübergangskoeffizienten wird aus den Kalibrierdaten für die Warm- und Kaltseite nach dem in Anhang A der Norm SN EN ISO 12567-1 angegebenen Verfahren bewertet und der konvektive Anteil F_c nach Gleichung 5 bestimmt:

$$F_c = \sum \frac{h_c}{h_c \cdot h_r} \quad (5)$$

Dabei ist

- h_c der konvektive Wärmeübergangskoeffizient, in W/m²K
- h_r der strahlungsbezogene Wärmeübergangskoeffizient, in W/m²K

3.1.3 Prüfraumen und Randkorrekturen

Aus dem Datensatz der dickeren Kalibrierplatte wird der Wärmedurchlasswiderstand R_{sur} des Prüfraumens berechnet und als Funktion der mittleren Temperatur des Prüfraumens dargestellt. Der Wärmedurchlasswiderstand wird von den Gleichungen 6, 7 und 8 abgeleitet.

$$R_{sur} = \frac{A_{sur} \cdot \Delta\theta_{s,sur}}{\phi_{in} - \phi_{cal} - \phi_{edge}} \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (6)$$

Dabei ist

- A_{sur} die Projektionsfläche des Prüfraumens, in m²
- $\Delta\theta_{s,sur}$ die Differenz aus den mittleren Oberflächentemperaturen des Prüfraumens, in K

- ϕ_{in} die Wärmezufuhr zum Messkasten, geeignet berichtigt mit dem Wärmestrom durch die Messkastenwände und Flankenverluste in W
- ϕ_{cal} der Wärmestrom durch die Kalibrierplatte in W nach Gleichung 7

$$\phi_{cal} = A_{cal} \cdot q_{cal} \quad W \quad (7)$$

- ϕ_{edge} der Wärmestrom durch die Randzone zwischen Kalibrierplatte und Prüfraumen in W nach Gleichung 8

$$\phi_{edge} = L_{edge} \cdot \psi_{edge} \cdot \Delta\theta_c \quad W \quad (8)$$

Dabei ist

- L_{edge} die Umfangslänge zwischen Prüfraumen und Probekörper, in m.
- ψ_{edge} der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient der Randzone zwischen Prüfraumen und Probekörper in W/(m·K)
- $\Delta\theta_c$ die Differenz aus den Lufttemperaturen der Warm- und Kaltseite in K

3.2 Messung an den Probekörpern

Die Messung der Probekörper muss unter den gleichen Bedingungen wie bei der Messung des Gesamtwärmeübergangswiderstands beschriebenen Kalibrierungen bei einer mittleren Lufttemperatur von etwa 10° C und einer Lufttemperaturdifferenz von $\Delta\theta_c \approx (20 \pm 2)$ K erfolgen. Flächen mit Tauwasser- oder Eisbildung auf dem Probekörper können den gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten beeinflussen. Daher muss die relative Luftfeuchte in der Messkammer niedrig genug gehalten werden, um derartige Einflüsse zu vermeiden.

Die Wärmestromdichte q_{sp} in W/m² durch den Probekörper bei der Messung ist mit Gleichung 9 zu berechnen.

$$q_{sp} = \frac{\phi_{in} - \phi_{sur} - \phi_{edge}}{A_{sp}} \quad \frac{W}{m^2} \quad (9)$$

Dabei ist

- A_{sp} die Projektionsfläche des Probekörpers, in m²
- ϕ_{in} die Wärmezufuhr zum Messkasten, geeignet berichtigt mit dem Wärmestrom durch die Messkastenwände und die Flankenverluste in W
- ϕ_{edge} der Wärmestrom durch der Randzone nach Gleichung 8 in W
- ϕ_{sur} der Wärmestrom durch den Prüfraumen in W, der sich nach Gleichung 10 ergibt

$$\phi_{sur} = \frac{A_{sur} \cdot \Delta\theta_{s,sur}}{R_{sur}} \quad W \quad (10)$$

Dabei ist

- A_{sur} die Projektionsfläche des Prüfraumens, in m²
- $\Delta\theta_{s,sur}$ die Differenz aus den mittleren Oberflächentemperaturen des Prüfraumens, in K
- R_{sur} der Wärmedurchlasswiderstand des Prüfraumens, in m²·K/W, bestimmt durch Kalibrierung

Der gemessene Gesamtwärmedurchgangskoeffizient U_m in $W/(m^2 \cdot K)$ des Probekörpers ist nach Gleichung 11 zu berechnen.

$$U_m = \frac{q_{sp}}{\Delta\theta_n} \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (11)$$

Dabei ist

$-\Delta\theta_n$ die Differenz der Umgebungstemperaturen auf jeder Seite des zu prüfenden Systems in K.

3.3 Darstellung der Ergebnisse für genormte Prüfanwendungen

Der dem gemessenen Wärmedurchgangskoeffizienten U_m zugeordnete Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{s,t}$ in m^2K/W , ist aus den Kalibrierdaten als Funktion der Wärmestromdichte q durch Interpolation oder durch analytisches Iterationsverfahren abgeleitet, zu beurteilen.

Der gemessene Wärmedurchgangskoeffizient des Probekörpers U_m muss mit dem Gesamtwärmeübergangswiderstand $R_{s,t}$ berichtigt werden, um den Norm-Wärmedurchgangskoeffizienten U_{st} in $W/(m^2 \cdot K)$ nach Gleichung 12 zu bestimmen.

$$U_{st} = [U_m^{-1} - R_{s,t} + R_{(s,t),st}]^{-1} \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (12)$$

In diesen Messungen ist $R_{(s,t),st} = 0.17 (m^2 \cdot K)/W$.

3.4 Stabilitätskriterien für eine gültige Messung

Grundsätzlich kann die Messung beendet werden, wenn das Resultat keine signifikanten Veränderungen und keinen Trend in eine Richtung aufweist.

Die SN EN ISO 8990:1996 [2] bietet den Ansatz, dass die Werte von R , U , ϕ_{IN} , und T (Mitteltemperatur in K) über zwei aufeinanderfolgenden Messzeiten von 3h innerhalb einer Bandbreite von 1 % stabil sein müssen. Gleichzeitig sollen diese Werte keinen Trend in eine Richtung haben. Für die Kalibriermessung werden die Werte R_{sur} , R_{st} , ϕ_{IN} , $\Delta\theta_c$ sowie die Regelgrösse K zur Beurteilung der Stabilität herangezogen.

Um die Stabilität während der Messung zu überprüfen, kann die Zwischenergebnisliste herangezogen werden. Es wird empfohlen, die Zwischenergebniszeit auf 1 Stunde einzustellen und nachher eine dreistündige Auswertung anzustreben.

Es darf von der dreistündigen Messzeit abgewichen und diese entsprechend verlängert werden, falls einzelne Stabilitätskriterien nicht erreicht werden. Dies kann vor allem an der thermischen Masse des Prüfkörpers liegen. Schwankungen in der Hallentemperatur, die auf die Messung durchschlagen, müssen vermieden werden.

Tabelle 1: Stabilitätskriterien für die Kalibriermessung

Grösse	Dimension	Bandbreite (Grundwert)	Trend ausgeschlossen
Bandbreite R_{sur}	$(m^2K)/W$	$0.01 * (R_{sur})$	X
$R_{s,t}$	$(m^2K)/W$	± 0.01 (Basis: 0.17)	X
Bandbreite φ_{IN}	W	$0.01 * (\varphi_{IN})$	X
$\Delta\Theta_c$	K	± 2 ($\Delta\Theta_c$ Soll)	
Bandbreite Θ_c horizontal	K	$0.02 * \Delta(\Theta_c)$	
Bandbreite Θ_c vertikal	K/m	2	
Bandbreite Θ_c zeitlich	K	$0.01 * \Delta(\Theta_c)$	X

4 Durchführung der Messungen

4.1 Termin

Die Messungen des Wärmedurchgangskoeffizienten wurden vom 01.06.2017 bis zum 05.06.2017 durchgeführt.

4.2 Beschreibung des Prüfkörpers

Der Prüfkörper besteht aus einer Brettstapeldecke aus Fichte und einer OSB-Platte. Die Dimensionen des Prüfkörpers sind (1222 x 1476 x 159) mm. Der Brettstapel hat eine Dicke von 152 mm und jedes Brett ist 51 mm breit. Die OSB-Platte ist 7 mm dick.

Im Oberteil der Brettstapeldecke gibt es zwei Bohrungen für Rohre zum Einfädeln, welche zum Einbau benötigt werden. Für die Messungen werden diese Bohrungen mit zwei Holzdübeln aus Fichte geschlossen.

Der Prüfkörper wird so eingebaut, dass die OSB-Platte zur Warmseite zeigt.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Prüfkörper.



Abbildung 3: Ansicht der Seite des Probekörpers mit OSB-Platte.

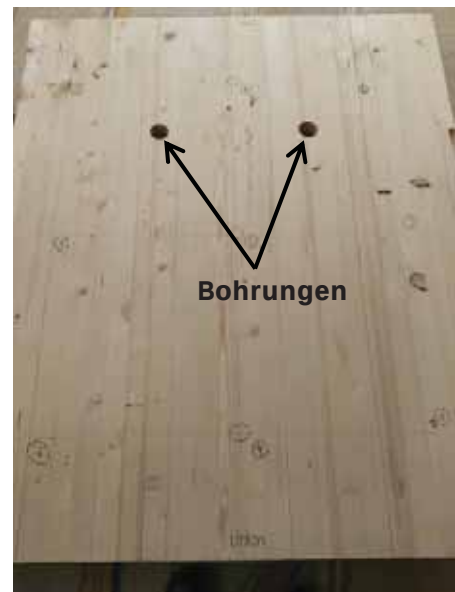


Abbildung 4: Ansicht der Seite des Probekörpers mit der Brettstapeldecke.



Abbildung 5: Schichtenaufbau des Probekörpers.



Abbildung 6: Holzdübel aus Fichte zum Verschliessen der Bohrungen.

4.3 Einbau des Prüfkörpers

Die Installation des Prüfkörpers in der Prüfmaste erfolgt mit einem Kran. Um den Prüfkörper im Prüfraum zusammenpressen wird eine Holzkeilsteine in zwischen dem Prüfkörper und dem Prüfraum aufgestellt.

Der Spalt zwischen dem Prüfkörper und der Prüfmaste wird mit einem Isolierpolster (Zöpfe aus sekundärer Baumwolle und Acrylfasern eingeschlossen in durchkreuzten Polyester Faden) gefüllt. Zum Abschluss wird die Fuge zwischen Prüfkörper und Prüfraum mit Polyisobutyl abgedichtet.

Die folgenden Bilder zeigen die Einbausituation des Prüfkörpers.



Abbildung 7: Ansicht der Holzkeile.



Abbildung 8: Ansicht des Isolierstreifens

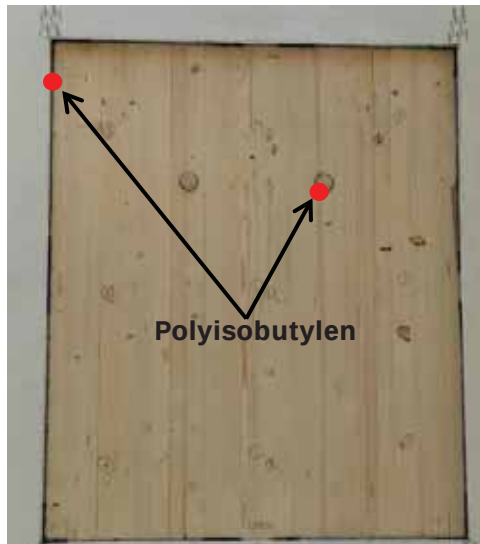


Abbildung 9: Ansicht der abgedichteten Fugen von der Kaltseite.

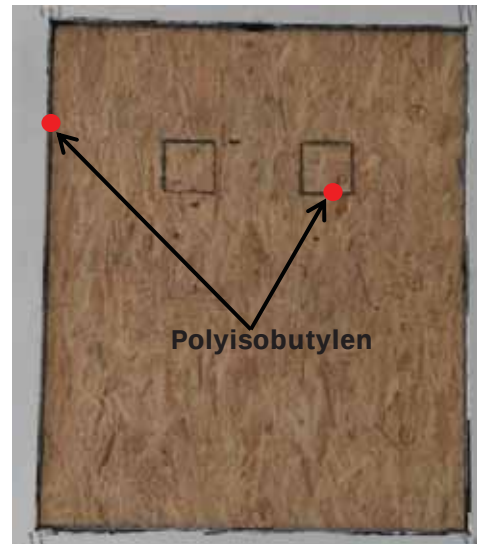


Abbildung 10: Ansicht der abgedichteten Fugen von der Warmseite.

Am Prüfkörper werden Thermoelemente zur Messung der Oberflächentemperaturen befestigt.

Dazu werden 9 Punkte auf jeder Seite des Prüfkörpers definiert. Die folgenden Abbildungen zeigen die 9 Punkte für die Kalt- und die Warmseite.

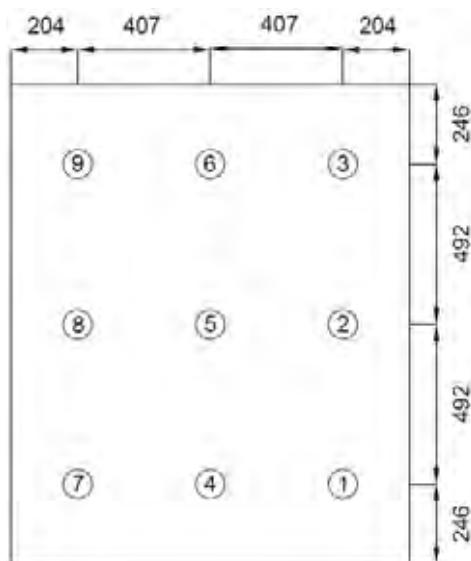


Abbildung 11: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite.

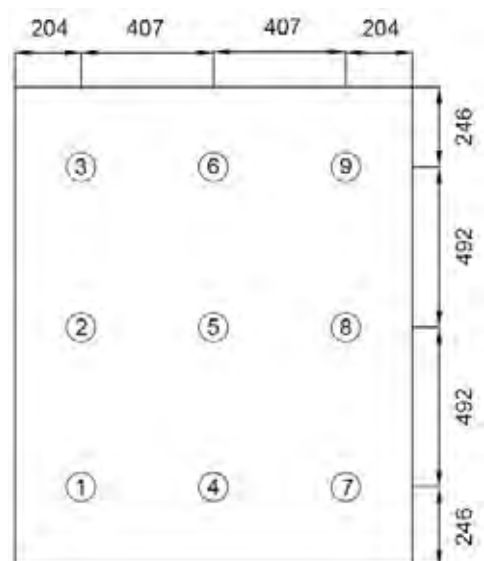


Abbildung 12: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite.

Die Thermoelemente werden zuerst mit selbstklebender Kupferfolie bis über die Messspitze hinaus überklebt. Das ganze wird dann auf einer Mindestlänge von 150 mm mit Gewebeklebeband überklebt.



Abbildung 13: Befestigung eines Thermoelements.

Die Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten des Prüfkörpers wird bei drei verschiedenen Mitteltemperaturen durchgeführt. Die folgende Tabelle zeigt die Temperaturrandbedingungen dieser Messungen.

Tabelle 2: Varianten der Messungen durch die Änderung der Temperatur.

Variante	Mitteltemperatur (K)	Temp. Kaltseite (°C)	Temp. Warmseite (°C)
1	10	0	20
2	5	-10	20
3	15	10	20

4.4 Messgeräte

Die Messungen werden mit den Messgeräten aus Tabelle 3 durchgeführt:

Tabelle 3: Zusammenstellung der verwandten Messgeräte

Gerät	Hersteller	Typ	Serial Nummer
Geregelter Heizkasten	Taurus	TDW 4242	201112-25.3600.2-05
Kryostat warm	Julabo	FDW 2500T	10201855
Kryostat kalt	Julabo	LH 50	10200138
Rückkühlung	Ciat	Aqualis 2	-
Kreiselpumpe	Lowara	-	13257R00H
Trockner	Parker	K-MT2	38309156

5 Messergebnisse

Der Wärmedurchgangskoeffizient des Prüfkörpers wird bei drei Mitteltemperaturen 5° C, 10° C und 15° C gemessen.

5.1 Messung bei einer Mitteltemperatur von 10° C

Die Stabilitätskriterien nach SN EN ISO 8990 sind für diese Variante in der folgenden Abbildung dargestellt. Die roten Punkte stellen die maximale und minimale Werte des Wärmedurchgangskoeffizienten dar, welche zwischen zwei Messungen innerhalb von 3 Stunden nicht über- oder unterschritten werden dürfen (1% Stabilitätskriterium). Die Messwerte sind als verbundene rote Kreise dargestellt..

Gleiches gilt für die Heizleistung (Y-Achse links), die Messwerte sind mit blauen Rauten dargestellt. Die Linien entsprechen den gemessenen Werten der Messung 35 bis 40 (X-Achse). Abbildung 14 zeigt, dass die Messwerte das Stabilitätskriterium erfüllen.

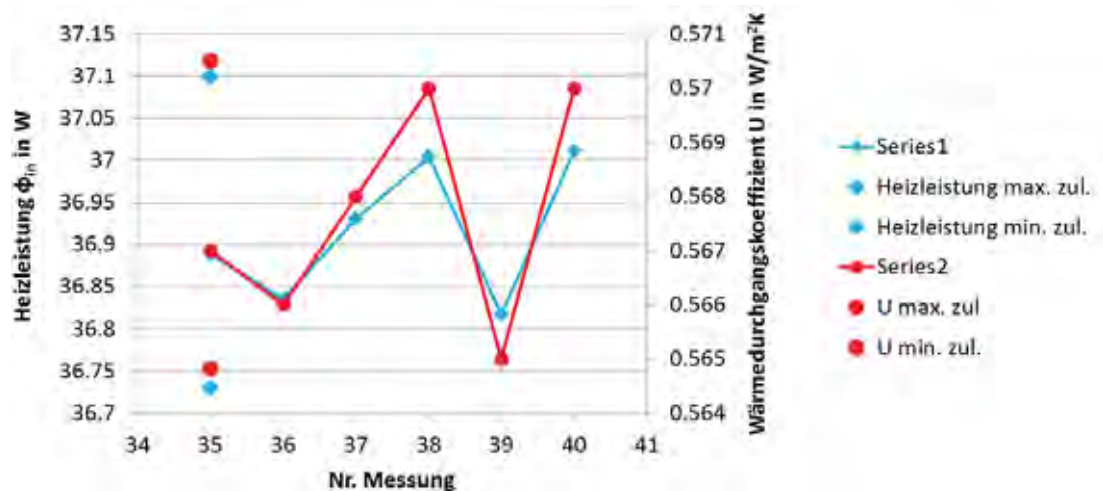


Abbildung 14: Mess- und Grenzwerte für die Heizleistung (linke Y-Achse) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (rechte Y-Achse) zum Überprüfen des Stabilitätskriteriums nach SN EN ISO 8990 für die Messung mit Mitteltemperatur 10° C.

Damit ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient des Prüfkörpers von

$$U_{st} = (0.57 \pm 0.017) \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Im Anhang B.1 befindet sich das Prüfprotokoll dieser Messung.

5.2 Messung bei einer Mitteltemperatur von 5° C

Für diese Messung finden sich die Mess- und Grenzwerte in Abbildung 15. Die Methode ist die Gleiche wie bei der vorherigen Messung. Die Messwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten und die Heizleistung befinden sich alle zwischen den Grenzwerten.

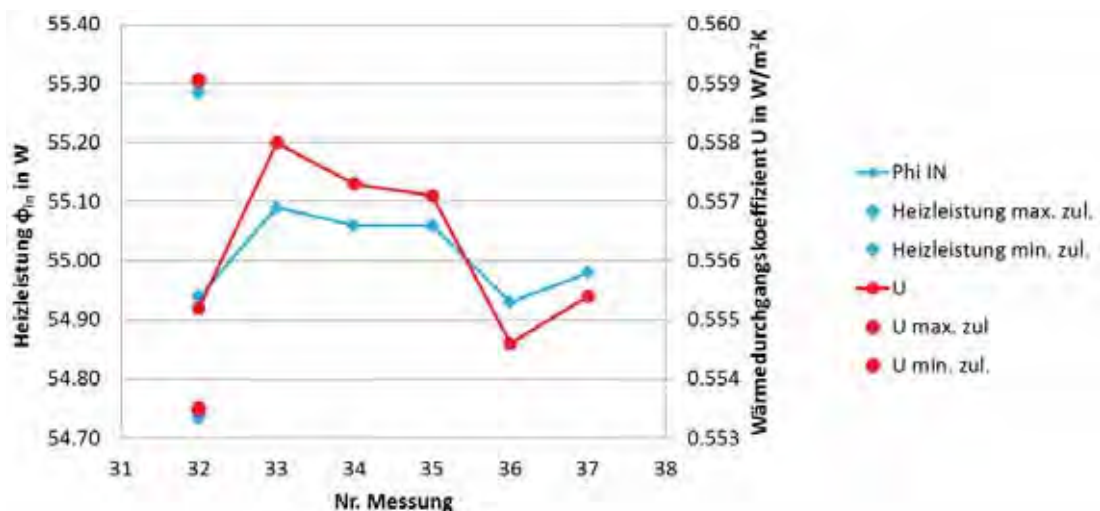


Abbildung 15: Mess- und Grenzwerte für die Heizleistung (linke Y-Achse) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (rechte Y-Achse) zum Überprüfen des Stabilitätskriteriums nach SN EN ISO 8990 für die Messung mit der Mitteltemperatur 5° C.

Damit ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient des Prüfkörpers von

$$U_{st} = (0.56 \pm 0.017) \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Im Anhang B.2 ist das Prüfprotokoll dieser Messung beigefügt.

5.3 Messung bei einer Mitteltemperatur von 15° C

In Abbildung 16 sind die Werte für die Variante mit einer Temperatur auf der Warmseite von 20°C und auf der Kaltseite von 10°C aufgetragen. Hier kann das Stabilitätskriterium nicht eingehalten werden, da die Temperaturdifferenz zwischen der Kaltseite und der Warmseite zu klein ist.

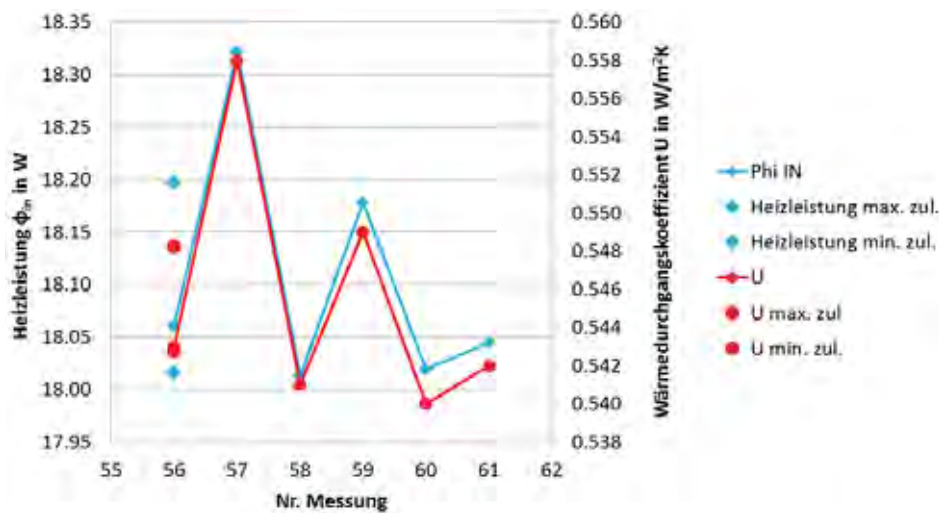


Abbildung 16: Mess- und Grenzwerte für die Heizleistung (linke Y-Achse) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (rechte Y-Achse) zum Überprüfen des Stabilitätskriteriums nach SN EN ISO 8990 für die Messung mit der Mitteltemperatur 15°C.

Damit ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient des Prüfkörpers von

$$U_{st} = (0.55 \pm 0.016) \text{ W/(m}^2\text{K)}.$$

Im Anhang B.3 findet sich das Prüfprotokoll dieser Messung

6 Verzeichnisse

6.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Stabilitätskriterien für die Kalibriermessung.....	9
Tabelle 2: Varianten der Messungen durch die Änderung der Temperatur.....	12
Tabelle 3: Zusammenstellung der verwandten Messgeräte	12

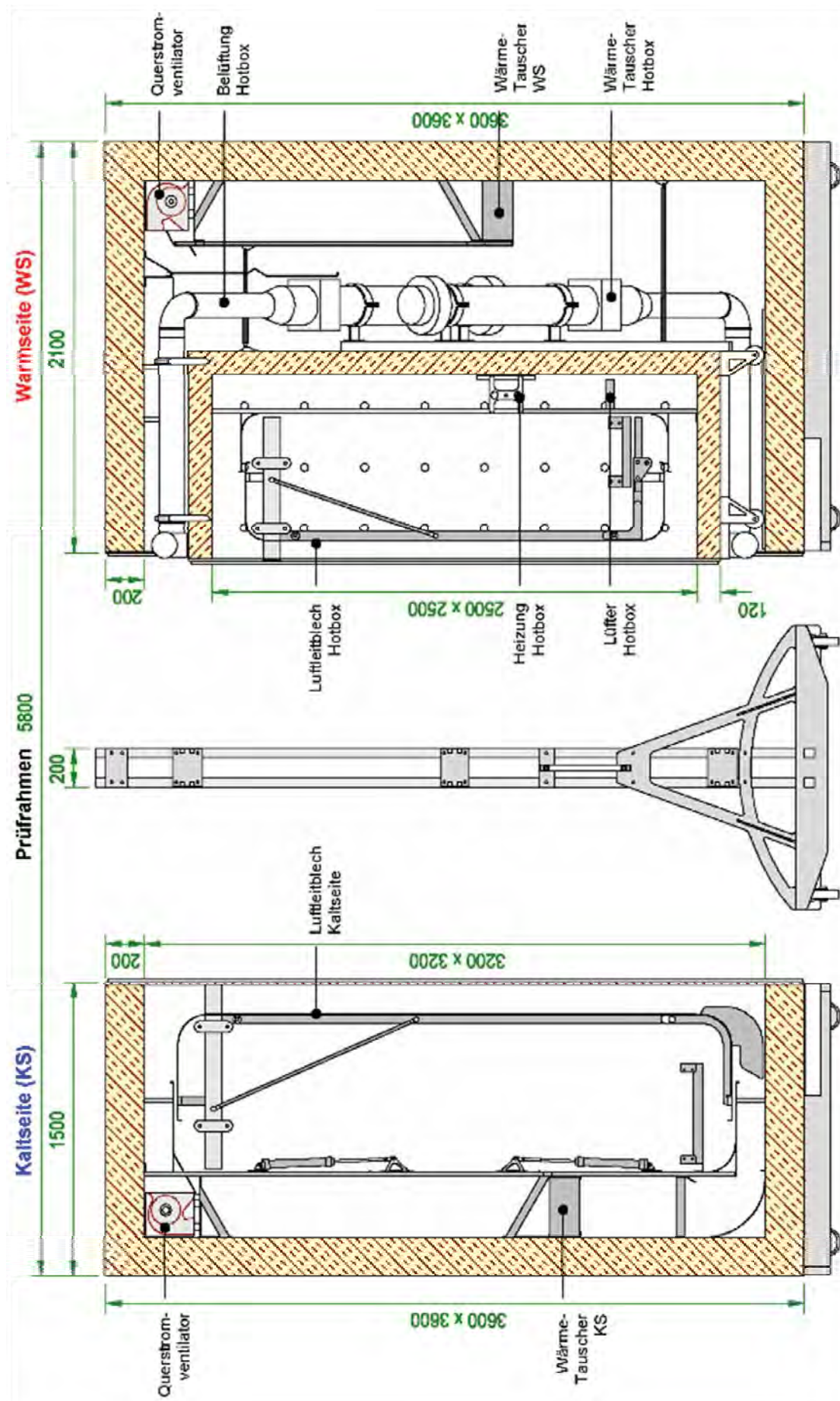
6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN-ISO 12567-1 [1].	3
Abbildung 2: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für Probekörper	4
Abbildung 3: Ansicht der Seite des Probekörpers mit OSB Platte.	9
Abbildung 4: Ansicht der Seite des Probekörpers mit der Brettstapeldecke	9
Abbildung 5: Schichtenaufbau des Probekörpers.	10
Abbildung 6: Holzdübel aus Fichte zum Verschliessen der Bohrungen.	10
Abbildung 7: Ansicht der Holzkeile.....	10
Abbildung 8: Ansicht des Isolierstreifens.....	10
Abbildung 9: Ansicht der abgedichteten Fugen von der Kaltseite.	11
Abbildung 10: Ansicht der abgedichteten Fugen von der Warmseite.....	11
Abbildung 11: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite.....	11
Abbildung 12: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite.	11
Abbildung 13: Befestigung eines Thermoelements.....	12
Abbildung 14: Mess- und Grenzwerte für die Heizleistung (linke Y-Achse) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (rechte Y-Achse) zum Überprüfen des Stabilitätskriteriums nach SN EN ISO 8990 für die Messung mit Mitteltemperatur 10° C.....	13
Abbildung 15: Mess- und Grenzwerte für die Heizleistung (linke Y-Achse) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (rechte Y-Achse) zum Überprüfen des Stabilitätskriteriums nach SN EN ISO 8990 für die Messung mit der Mitteltemperatur 5° C.	13
Abbildung 16: Mess- und Grenzwerte für die Heizleistung (linke Y-Achse) und den Wärmedurchgangskoeffizienten (rechte Y-Achse) zum Überprüfen des Stabilitätskriteriums nach SN EN ISO 8990 für die Messung mit der Mitteltemperatur 15°C.	14

7 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt.

Anhang A: Detaillierte Prinzipskizze



Anhang B: Prüfprotokolle

Anhang B: Prüfprotokolle B.1

Berner Fachhochschule	
Architektur, Holz und Bau Solothurnstr. 102 CH-2504 Biel www.ahb.bfh.ch	
Hotbox Messung U-Wert Fenster/Türen gemäß SN EN ISO 12567-1	
DWK 1 - Juni 2017	
Typ der Messung	statische Messung U-Wert
Temperaturen	+20°C / 0°C
Luftleitbleche	Warmseite 150mm, Kaltseite 100mm
Zwischenergebniszeit	1 Stunde
Probekörper	7 mm OSB / 152 mm Brettstapel Fichte
Dateiname	DWK 1 Juni 2017
Messung	
Beginn der Messung	06.06.2017 / 09:02 Uhr
Ende der Messung	08.06.2017 / 08:38 Uhr / 47 h
Probe	
Fensterfläche	1.8204 m²
Kalibrierwerte	
R_{sur}	$= 5.8936 - 0.0064 \cdot T_{me,sur}$ m²·K/W
R_{st}	$= 0.1662 \cdot Q_{sp} \exp(0.0148)$ m²·K/W
F_{ci}	$= 0.3932 + 0.0011 \cdot Q_{sp}$
F_{ce}	$= 0.8471 + -0.0003 \cdot Q_{sp}$
Berechnete Werte	
Temperatur Luft Kaltseite	$(T_{ae}) = -0.00$ °C
Temp. Luftleitbl. Kaltseite	$(T_{be}) = 0.09$ °C
Temperatur Leibung Kaltseite	$(T_{se}) = 0.68$ °C
Temp.Prüfrahm Kaltseite	$(T_{sure}) = 0.18$ °C
Temperatur Luft Warmseite	$(T_{ai}) = 20.00$ °C
Temp. Luftleitbl. Warmseite	$(T_{bi}) = 19.44$ °C
Temperatur Leibung Warmseite	$(T_{si}) = 18.22$ °C
Temp. Prüfrahm Warmseite	$(T_{suri}) = 19.34$ °C
Eingangsleistung Heizkasten	$(P_{in}) = 36.91$ W
Luftgeschwindigkeit Warmseite	$(V_{li}) = 0.26$ m/s
Luftgeschwindigkeit Kaltseite	$(V_{le}) = 3.35$ m/s
Mittl. Temperatur Prüfrahm	$(T_{mesur}) = 9.76$ °C
Wärmedurchlasswid. Prüfrahm	$(R_{sur}) = 5.831$ m²·K/W
Wärmeleitfähigkeit Prüfrahm	$(L_{sur}) = 0.04$ W/(m·K)
Längenbez. Wärmedurchg.koeff.	$(W_{edge}) = 0.001$ W/(m²·K)
Temperaturdiff. Prüfrahm	$(dT_{sur}) = 19.16$ K
Lufttemperaturdifferenz	$(dT_c) = 20.00$ K
Prüfrahmwärmestrom	$(P_{sur}) = 16.574$ W
Randzonenwärmestrom	$(P_{edge}) = 0.054$ W
Wärmestromdichte Probekörper	$(Q_{sp}) = 11.14$ W/m²
Konvektiver Anteil Warmseite	$(F_{ci}) = 0.41$
Konvektiver Anteil Kaltseite	$(F_{ce}) = 0.84$
Gesamtwärmeübergangswiderst.	$(R_{s,t}) = 0.172$ m²·K/W
Umgebungstemperatur Warmseite	$(T_{ni}) = 19.67$ °C
Umgebungstemperatur Kaltseite	$(T_{ne}) = 0.01$ °C
Umgebungstemperaturdifferenz	$(dT_n) = 19.65$ K
Wärmedurchgangskoeff. (gem.)	$(U_m) = 0.567$ W/(m²·K)
Normwärmeübergangswiderstand	$(R_{(s,t),st}) = 0.170$ m²·K/W
Wärmedurchg.koeff. (genormt)	$(U_{st}) = 0.568$ W/(m²·K)
Wärmedurchg.koeff. (gerundet)	$(U_{st}) = 0.57$ W/(m²·K)
Erweiterte Messungssicherheit (nach GUM)	$= 0.017$ W/m²·K

Anhang B: Prüfprotokolle B.2

Berner Fachhochschule	
Architektur, Holz und Bau Solithurnstr. 102 CH-2504 Biel www.ahb.bfh.ch	
Hotbox Messung U-Wert Fenster/Türen gemäß SN EN ISO 12567-1	
DWK 2 - Juni 2017	
Typ der Messung	statische Messung U-Wert
Temperaturen	+20°C / -10°C
Luftleitbleche	Warmseite 150mm, Kaltseite 100mm
Zwischenergebniszeit	1 Stunde
Probekörper	7 mm OSB / 152 mm Brettstapel Fichte
Dateiname	DWK 2 Juni 2017
Messung	
Beginn der Messung	08.06.2017 / 10:32 Uhr
Ende der Messung	73 h
Probe	
Fensterfläche	1.8204 m ²
Kalibrierwerte	
R_{sur}	$5.8936 - 0.0064 \cdot T_{me,sur}$ m ² ·K/W
R_{st}	$0.1662 \cdot Q_{sp} \exp(0.0148)$ m ² ·K/W
F_{ci}	$0.3932 + 0.0011 \cdot Q_{sp}$
F_{ce}	$0.8471 + -0.0003 \cdot Q_{sp}$
Berechnete Werte	
Temperatur Luft Kaltseite	(T _{ae}) = -10.24 °C
Temp. Luftleitbl. Kaltseite	(T _{be}) = -10.12 °C
Temperatur Leibung Kaltseite	(T _{se}) = -9.20 °C
Temp. Prüfraumen Kaltseite	(T _{sure}) = -9.96 °C
Temperatur Luft Warmseite	(T _{ai}) = 19.97 °C
Temp. Luftleitbl. Warmseite	(T _{bi}) = 19.15 °C
Temperatur Leibung Warmseite	(T _{si}) = 17.36 °C
Temp. Prüfraumen Warmseite	(T _{suri}) = 18.99 °C
Eingangsleistung Heizkasten	(P _{in}) = 55.01 W
Luftgeschwindigkeit Warmseite	(V _{li}) = 0.26 m/s
Luftgeschwindigkeit Kaltseite	(V _{le}) = 3.29 m/s
Mittl. Temperatur Prüfraumen	(T _{mesur}) = 4.51 °C
Wärmedurchlasswid. Prüfraumen	(R _{sur}) = 5.865 m ² ·K/W
Wärmeleitfähigkeit Prüfraumen	(L _{sur}) = 0.04 W/(m·K)
Längenbez. Wärmedurchg.koeff.	(W _{edge}) = 0.001 W/(m·K)
Temperaturdiff. Prüfraumen	(dT _{sur}) = 28.95 K
Lufttemperaturdifferenz	(dT _c) = 30.21 K
Prüfraumenwärmestrom	(P _{sur}) = 24.899 W
Randzonenwärmestrom	(P _{edge}) = 0.082 W
Wärmestromdichte Probekörper	(Q _{sp}) = 16.50 W/m ²
Konvektiver Anteil Warmseite	(F _{ci}) = 0.41
Konvektiver Anteil Kaltseite	(F _{ce}) = 0.84
Gesamtwärmeübergangswiderst.	(R _{s,t}) = 0.173 m ² ·K/W
Umgebungstemperatur Warmseite	(T _{ni}) = 19.49 °C
Umgebungstemperatur Kaltseite	(T _{ne}) = -10.22 °C
Umgebungstemperaturdifferenz	(dT _n) = 29.71 K
Wärmedurchgangskoeff. (gem.)	(U _m) = 0.555 W/(m ² ·K)
Normwärmeübergangswiderstand	(R _{(s,t),st}) = 0.170 m ² ·K/W
Wärmedurchg.koeff. (genormt)	(U _{st}) = 0.556 W/(m ² ·K)
Wärmedurchg.koeff. (gerundet)	(U_{st}) = 0.56 W/(m²·K)
Erweiterte Messungssicherheit (nach GUM)	= 0.017 W/m ² ·K

Anhang B: Prüfprotokolle B.3

Berner Fachhochschule		
Architektur, Holz und Bau Solithurnstr. 102 CH-2504 Biel www.ahb.bfh.ch		
Hotbox Messung U-Wert Fenster/Türen gemäß SN EN ISO 12567-1		
DWK 3 - Juni 2017		
Typ der Messung	statische Messung U-Wert	
Temperaturen	+20°C / 10°C	
Luftleitbleche	Warmseite 150mm, Kaltseite 100mm	
Zwischenergebniszeit	1 Stunde	
Probekörper	7 mm OSB / 152 mm Brettstapel Fichte	
Dateiname	DWK 3 Juni 2017	
Messung		
Beginn der Messung	12.06.2017 / 09:37 Uhr	
Ende der Messung	72 h	
Probe		
Fensterfläche	1.8204 m²	
Kalibrierwerte		
	$R_{sur} = 5.8936 - 0.0064 \cdot T_{me,sur}$	m²·K/W
	$R_{st} = 0.1662 \cdot Q_{sp} \exp(0.0148)$	m²·K/W
	$F_{ci} = 0.3932 + 0.0011 \cdot Q_{sp}$	
	$F_{ce} = 0.8471 + -0.0003 \cdot Q_{sp}$	
Berechnete Werte		
Temperatur Luft Kaltseite	(T _{ae}) = 10.01	°C
Temp. Luftleitbl. Kaltseite	(T _{be}) = 10.08	°C
Temperatur Leibung Kaltseite	(T _{se}) = 10.40	°C
Temp.Prüfrahen Kaltseite	(T _{sure}) = 10.11	°C
Temperatur Luft Warmseite	(T _{ai}) = 20.01	°C
Temp. Luftleitbl. Warmseite	(T _{bi}) = 19.73	°C
Temperatur Leibung Warmseite	(T _{si}) = 19.15	°C
Temp. Prüfrahen Warmseite	(T _{suri}) = 19.68	°C
Eingangsleistung Heizkasten	(P _{in}) = 18.11	W
Luftgeschwindigkeit Warmseite	(V _{ii}) = 0.26	m/s
Luftgeschwindigkeit Kaltseite	(V _{ie}) = 3.30	m/s
Mittl. Temperatur Prüfrahen	(T _{mesur}) = 14.89	°C
Wärmedurchlasswid. Prüfrahen	(R _{sur}) = 5.798	m²·K/W
Wärmeleitfähigkeit Prüfrahen	(L _{sur}) = 0.04	W/(m·K)
Längenbez. Wärmedurchg.koeff.	(W _{edge}) = 0.001	W/(m·K)
Temperaturdiff. Prüfrahen	(dT _{sur}) = 9.57	K
Lufttemperaturdifferenz	(dT _c) = 10.00	K
Prüfrahenwärmestrom	(P _{sur}) = 8.325	W
Randzonenwärmestrom	(P _{edge}) = 0.027	W
Wärmestromdichte Probekörper	(Q _{sp}) = 5.36	W/m²
Konvektiver Anteil Warmseite	(F _{ci}) = 0.40	
Konvektiver Anteil Kaltseite	(F _{ce}) = 0.85	
Gesamtwärmeübergangswiderst.	(R _{s,i}) = 0.170	m²·K/W
Umgebungstemperatur Warmseite	(T _{ni}) = 19.84	°C
Umgebungstemperatur Kaltseite	(T _{ne}) = 10.02	°C
Umgebungstemperaturdifferenz	(dT _n) = 9.82	K
Wärmedurchgangskoeff. (gem.)	(U _m) = 0.546	W/(m²·K)
Normwärmeübergangswiderstand	(R _{(s,i),st}) = 0.170	m²·K/W
Wärmedurchg.koeff. (genormt)	(U _{st}) = 0.546	W/(m²·K)
Wärmedurchg.koeff. (gerundet)	(U_{st}) = 0.55 W/(m²·K)	
Erweiterte Messungssicherheit (nach GUM)	= 0.016 W/m²·K	



Messbericht

Messung der wirksamen Wärmekapazität einer Brettstapeldecke

Adresse der
Forschungsstelle

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Kompetenzbereich Bauphysik und Energie
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel

www.ahb.bfh.ch

Sachbearbeiter/in

 
Prof. Dr. Christoph Geyer/Amabel Melián Hernández

Datum

31. Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Beschreibung der Anlage	3
3	Messverfahren	5
3.1	Grundlagen der Wärmeflussmessung	5
3.2	Konstante Temperaturrendbedingungen	5
3.3	Variable Temperaturrendbedingungen	5
3.4	Definition der wirksamen Wärmekapazität	5
3.5	Berechnung nach EN ISO 13786	5
3.6	Messung mit der „Hot Box“	7
1.1.1	Messprinzip Wärmeflussplatten (Hilfswand bei U-Wert-Messung)	7
4	Durchführung der Messungen	9
4.1	Beschreibung des Prüfkörpers	9
4.2	Einbau des Prüfkörpers	10
4.3	Messgeräte	14
5	Messergebnisse	14
6	Plausibilitätsbetrachtung des Messergebnisses	16
7	Verzeichnisse	18
7.1	Tabellenverzeichnis	18
7.2	Abbildungsverzeichnis	18
7.3	Literatur	19
8	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	19
Anhang A: Detaillierte Information der Prinzipskizze		20

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes „Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit“, gefördert von der Bundesamt für Umwelt, wird die zeitabhängige Wärmestromdichte und damit die dynamische Wärmekapazität einer Brettstapeldecke bestimmt.

2 Beschreibung der Anlage

Die Messung wird in einem Prüfstand zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1:2010 *Wärmetechnisches Verhalten von Fenster und Türen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens - Teil 1: Komplette Fenster und Türen* [1] durchgeführt. Der Prüfstand befindet sich in den Laboren der Berner Fachhochschule in Biel.

Die Anlage besteht aus zwei Klimakammern, die als Warm- und als Kaltseite bezeichnet werden. Die Abmessung (Breite, Höhe und Tiefe) der Warmseite ist (3600 x 3600 x 2100) mm. Im Innern der Warmseite befindet sich die sogenannte Hotbox. Diese Hotbox hat die Dimensionen (2740 x 2740 x 1050) mm. Die Dimensionen der Kaltseite ist (3600 x 3600 x 1500) mm. Zwischen den beiden Klimakammern ist der Prüfraum mit der Prüfmaske installiert, in den der Probekörper eingebaut wird. Dieser Prüfraum ist (3600 x 3600 x 196) mm gross. Die Öffnung in der Prüfmaske misst (1230 x 1480 x 196) mm. Der Prüfraum weist einen hohen Wärmedurchlasswiderstand auf, hält den Probekörper in der richtigen Stellung und trennt die Warmseite von der Kaltseite.

Die folgende Abbildung zeigt eine Prinzipskizze der Anlage. Detaillierte Information findet man in Anhang A.

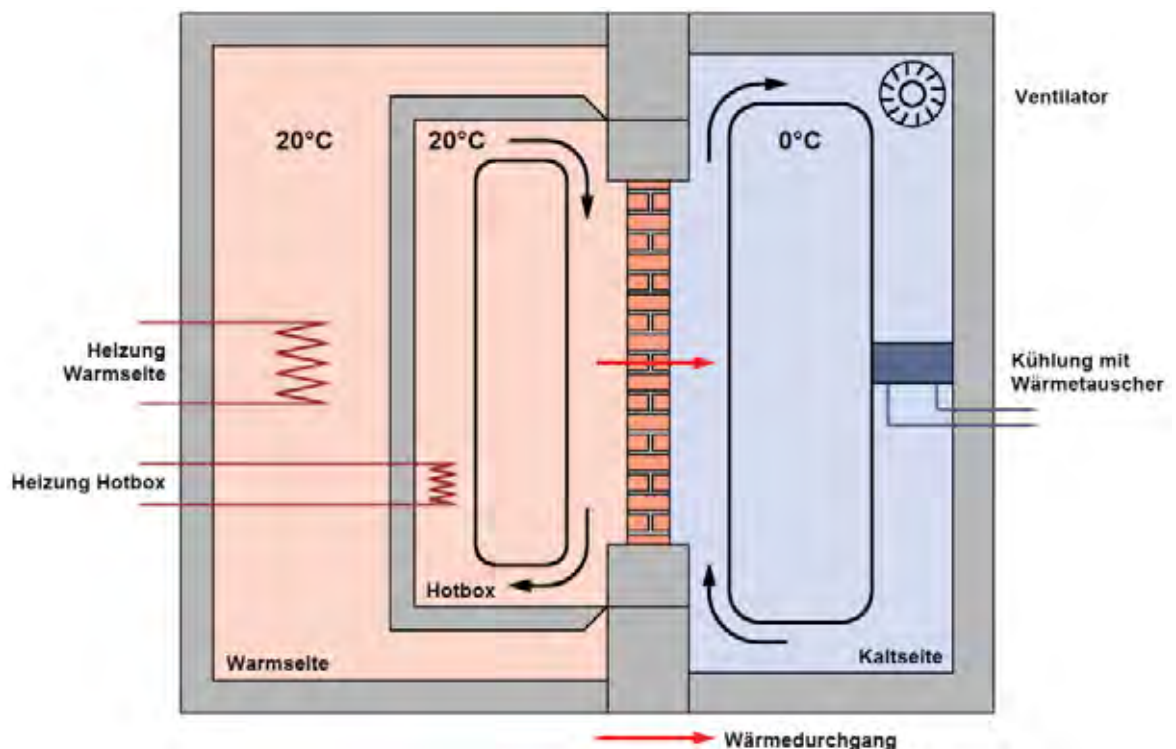


Abbildung 1: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1 [1].

Abbildung 2 zeigt eine Prinzipskizze der Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für den Probekörper.

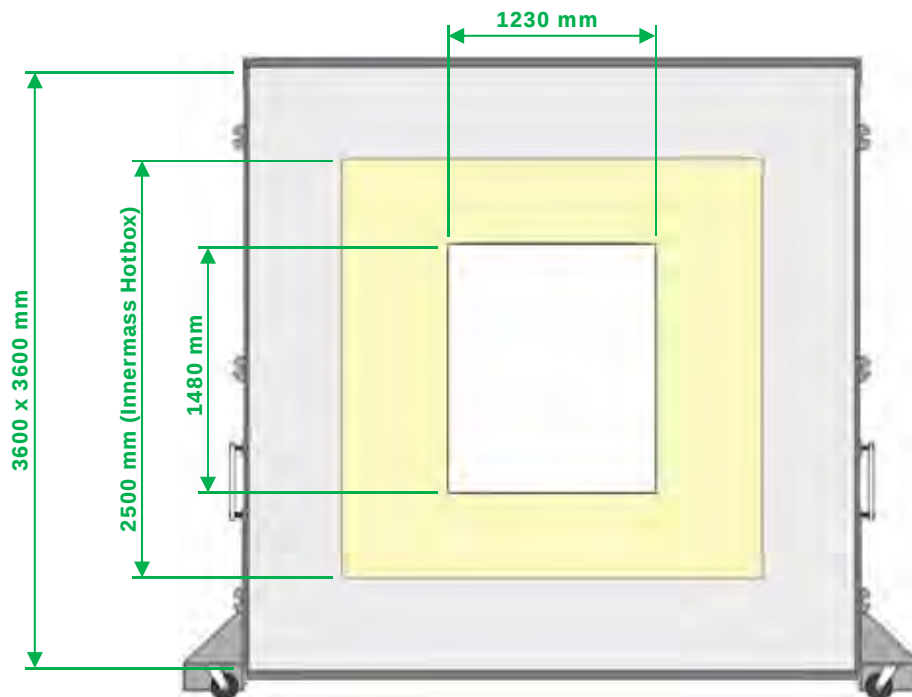


Abbildung 2: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für Probekörper

In den Klimakammern befinden sich Luftleitbleche. Die Luftleitbleche sind verfahrbar (seitliche Stellschrauben) um eine definierte Anströmung des Probekörpers zu erreichen. Die Strömungsrichtung ist am Probekörper kaltseitig von unten nach oben und warmseitig von oben nach unten. Die Konvektion an den Oberflächen ist damit beidseitig erzwungen.

Grundsätzlich ist die Steuerung und Regelung des Heizkastens dezentral und vom Rechner unabhängig, der nur Sollwerte übermittelt und Kontrollwerte aufzeichnet. Die Thermostate haben eigene PID Kontrollparameter (Proportional, integral and derivated terms), die entscheidend für ein optimales Einregeln der Hotbox sind. Die PID Regelung des Messkastens und die Feuchterege lung erfolgt über den Hauptrechner und die installierte Software („Hot-box 2014“).

3 Messverfahren

3.1 Grundlagen der Wärmeflussmessung

Der Wärmestrom durch ein Bauteil hängt u.a. von den Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien, seinen Schichtdicken, von der Bauteilgeometrie sowie von den Übergangsbedingungen an den Bauteiloberflächen ab.

3.2 Konstante Temperaturreandbedingungen

Zur Messung des stationären Wärmedurchgangskoeffizienten wird die „Hot Box“ mit konstanten Temperaturreandbedingungen auf beiden Seiten des Prüfkörpers betrieben. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) beschreibt die Wärmemenge durch eine ein- oder mehrlagige Materialschicht, welche in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m^2 fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen um 1 K unterscheiden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes (R_T), welcher sich aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände (R) der einzelnen hintereinander liegenden Bauteilschichten sowie der Wärmeübergangswiderstände (R_{si} ; R_{se}) der Luftschichten an beiden Oberflächen zusammensetzt:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \text{ in } \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 1}$$

3.3 Variable Temperaturreandbedingungen

Zur Messung der dynamischen Wärmekapazität wird die Temperaturreandbedingung an der Oberfläche des Prüfkörpers, deren dynamische Wärmekapazität gemessen werden soll, geändert: hier wird eine zeitabhängige, sinusförmige Temperaturreandbedingung aufgeprägt, welche um einen konstanten Mittelwert oszilliert.

Diese sinusförmige Temperaturreandbedingung erzeugt einen sinusförmigen Wärmestrom durch die Oberfläche des Prüfkörpers.

Die Berechnung dieses dynamischen Wärmestroms und der dynamischen Wärmekapazität erfolgt nach EN ISO 13786 *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Teil 6: Berechnungsverfahren*, Ausgabe 2015 [2].

3.4 Definition der wirksamen Wärmekapazität

Die dynamische oder wirksame Wärmekapazität oder Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils beschreibt, wieviel Wärmeenergie dieses über eine Oberfläche bei einer sinusförmigen Lufttemperaturschwankung aufnehmen bzw. abgeben kann.

3.5 Berechnung nach EN ISO 13786

Die Norm EN ISO 13786 [2] stellt ein analytisches Verfahren zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität zur Verfügung. Die Berechnung der dynamischen Wärmekapazität nach EN ISO 13786 [2] ist allerdings auf homogene, ebene Bauteile beschränkt. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft wird eine Sinus-Funktion, welche um einen Mittelwert schwingt, angenommen.

Die Temperatur- bzw. Wärmestromschwankung werden als komplexe Grössen in Zeiger-schreibweise geschrieben: Θ bzw. q .

Diese Temperaturschwankung durchdringt das Bauteil. Die Fortpflanzung dieser Schwingungen im Bauteil hängt von den wärmeschutztechnischen Grössen der einzelnen Bauteilschichten, also von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität, ab.

Die dynamischen d. h. zeitabhängigen wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden dann in einer komplexen Matrix, Z_{ij} zusammengefasst. Diese Matrix bestimmt das Durchlaufen der Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung des Bauteils. Die Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils wird schliesslich mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\begin{pmatrix} \Theta_e \\ q_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_i \\ q_i \end{pmatrix} \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_{e \text{ oder } i}$ die Temperatur an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.
- $q_{e \text{ oder } i}$ die Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.

Aus dieser Gleichung kann mit geeigneten Randbedingungen die dynamische oder wirksame Wärmekapazität berechnet werden.

Für Aussenbauteile, an denen raumseitig eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität κ auf der Raumseite

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 3}$$

Hierbei bezeichnet

- $\hat{\Theta}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite, Index i, oder der Rückseite des Bauteils, Index e.
- $\hat{q}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Wärmestromdichte an der Vorderseite, Index i, oder der Rückseite des Bauteils, Index e
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer der Temperaturschwingung

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

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 4}$$

$$\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_e}{\hat{\Theta}_e} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 5}$$

3.6 Messung mit der „Hot Box“

Aus dem ersten Teil von Formel 3 bis Formel 5 folgt, dass die wirksame Wärmekapazität eines Bauteils als der Quotient der Amplitude der Wärmestromdichte 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 also umso grösser, je grösser die Amplitude der Wärmestromdichte bei einer bestimmten Amplitude der Temperaturschwankung ist.

Dieser Zusammenhang wird nun genutzt, um die wirksame Wärmekapazität mit der „Hot-box“ zu messen.

Als Randbedingung wird eine sinusförmige Temperaturschwankung der angrenzenden Luft auf der Kaltseite gemäss folgender Gleichung hergestellt:

$$\Theta(t) = \Theta_m + \hat{\Theta} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \quad \text{Formel 6}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_m = 20^\circ \text{ C}$ den Mittelwert der Temperatur in $^\circ \text{C}$
- $\hat{\Theta} = 5 \text{ K}$ die Amplitude der Temperaturschwankung in K
- t die Zeit in h
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer in h

Mit Hilfe von Wärmestrommessplatten wird nun die zur Temperaturschwankung gehörende Schwankung der Wärmestromdichte durch die Oberfläche gemessen.

Sodann wird für die entsprechende Oberfläche die wirksame Wärmekapazität κ als Quotient der Amplitude der Schwingung der Wärmestromdichte und der Amplitude der Schwingung der Temperatur wie folgt berechnet.

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}}{\hat{\Theta}} \quad \text{Formel 7}$$

1.1.1 Messprinzip Wärmeflussplatten (Hilfswand bei U-Wert-Messung)

Der sinusförmige Wärmestrom durch die Oberfläche des Prüfkörpers wird mit Wärmeflussplatten gemessen.

Das Messprinzip zur quantitativen Erfassung des Wärmedurchgangs durch Bauteile basiert auf der sogenannten Hilfswandmethode, bei welcher ein Messfühler (Wärmestrommessplatte) am Bauteil angebracht wird. Anhand der bekannten thermischen Eigenschaften des Fühlers und der thermoelektrisch gemessenen Temperaturdifferenz wird die Wärmestromdichte (q) durch die Oberfläche des Bauteils bestimmt.

Wärmeflussplatten bestehen aus einem Mäander hintereinander geschalteter Thermoelemente, die in einem Trägermaterial eingebettet sind.

Die Platten verfügen über einen aktiven Teil in der Mitte der Messplatte und eine Randzone (Schutzring), die ein seitliches Umlaufen des Wärmeflusses verringern soll. Die Wärmeflüsse

beziehen sich stets auf die vom Mäander abgedeckte Oberfläche und bilden deren Mittelwert.

Die gesuchte Wärmestromdichte (q) ergibt sich durch Multiplikation der gemessenen Spannung (U_{th}) mit einer individuell bestimmten Kalibrierkonstanten (C) des Sensors.

$$q = C \cdot U_{th} \quad \frac{W}{m^2}$$

Formel 8

Dabei ist

- q die Wärmestromdichte in W/m^2
- C die Kalibrierkonstante in $W/(m^2 \text{ mV})$
- U_{th} die Messspannung in mV

Die Temperaturschwankung der Luftschicht wird mit Hilfe von neun Thermoelementen gemessen (Abbildung 3). Um zu verhindern, dass diese Thermoelemente der Luftströmung ausgesetzt werden, werden sie innen in einem Stahlzylinder platziert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Lufttemperatur ergibt sich als Mittelwert der neun Messstellen auf der Warm- und auf der Kaltseite.

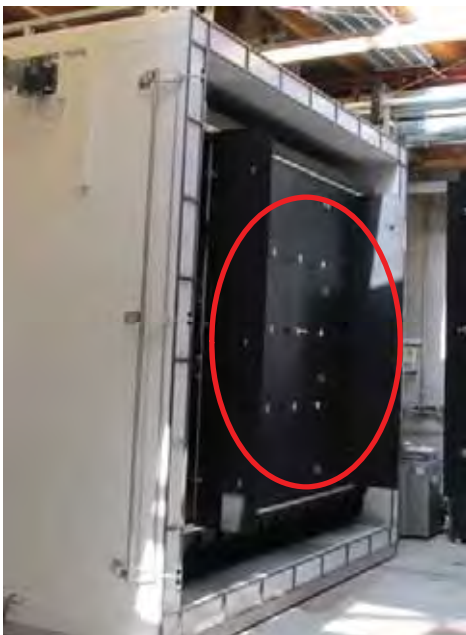


Abbildung 3: Positionen (roter Kreis) der neun Thermoelemente zur Messung der Lufttemperatur.



Abbildung 4: Detail des Thermoelementes innerhalb des Stahlzylinders.

Aus der Amplitude der sinusförmigen Temperaturschwankung und der Amplitude der Wärmestromdichte kann mit Hilfe der Formel 7 die dynamische Wärmekapazität der Oberfläche des Prüfkörpers bestimmt werden.

4 Durchführung der Messungen

Die Messungen der Wärmestromdichte wurden vom 19.06.2017 bis zum 21.06.2017 durchgeführt.

4.1 Beschreibung des Prüfkörpers

Der Prüfkörper besteht aus einer Brettstapeldecke aus Fichte und einer OSB-Platte. Die Dimensionen des Prüfkörpers sind (1222 x 1476 x 159) mm. Der Brettstapel hat eine Dicke von 152 mm und jedes Brett ist 51 mm breit. Die OSB-Platte auf der Rückseite ist 7 mm dick. Im oberen Teil der Brettstapeldecke gibt es zwei Bohrungen für Rohre zum Einfädeln, welche zum Einbau benötigt werden. Für die Messungen werden diese Bohrungen mit zwei Holzdübeln aus Fichte geschlossen.

Der Prüfkörper wird so eingebaut, dass die OSB-Platte zur Warmseite zeigt.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Prüfkörper.

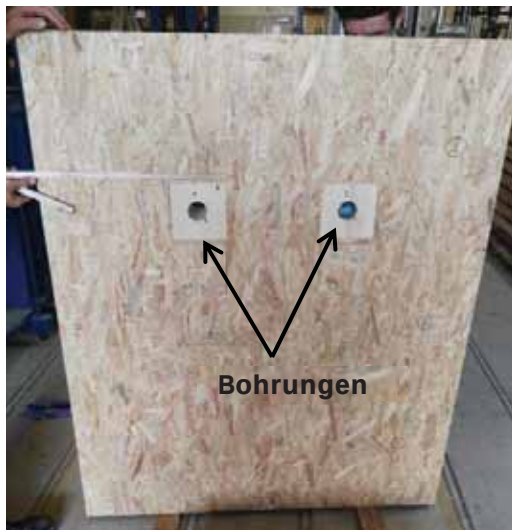


Abbildung 5: Ansicht der Seite des Prüfkörpers mit OSB-Platte.



Abbildung 6: Ansicht des Prüfkörpers auf der Seite mit der Brettstapeldecke.



Abbildung 7: Schichtenaufbau des Prüfkörpers.



Abbildung 8: Holzdübel aus Fichte zum Verschluss der Bohrungen.

4.2 Einbau des Prüfkörpers

Die Installation des Prüfkörpers in der Prüfmaske erfolgt mit einem Kran. Um den Prüfkörper im Prüfraum einzupassen, werden Holzkeile zwischen dem Prüfkörper und dem Prüfraum eingebracht.

Der Spalt zwischen dem Prüfkörper und der Prüfmaske wird mit Dichtschnüren (Zöpfe aus Baumwolle und Acrylfasern,) gefüllt. Zum Abschluss wird die Fuge zwischen Prüfkörper und Prüfraum mit Polyisobutylen abgedichtet.

Die folgenden Bilder zeigen die Einbausituation des Prüfkörpers.



Abbildung 9: Ansicht der Holzkeile.

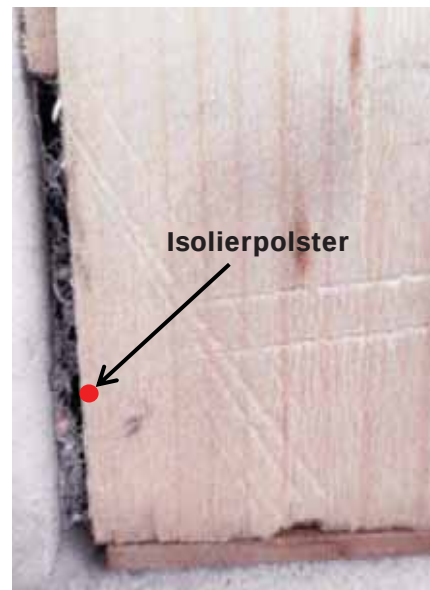


Abbildung 10: Ansicht der Dichtschnüre

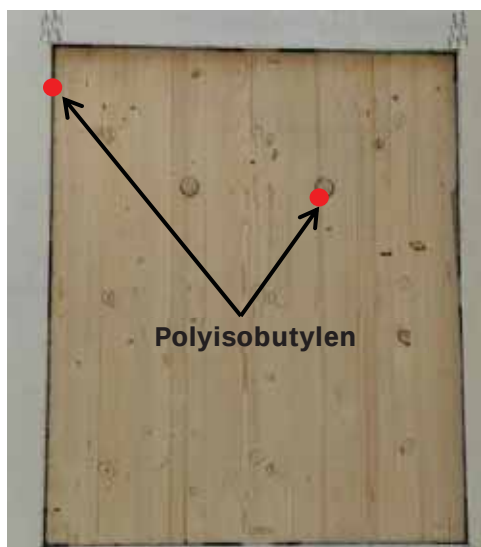


Abbildung 11: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Kaltseite.

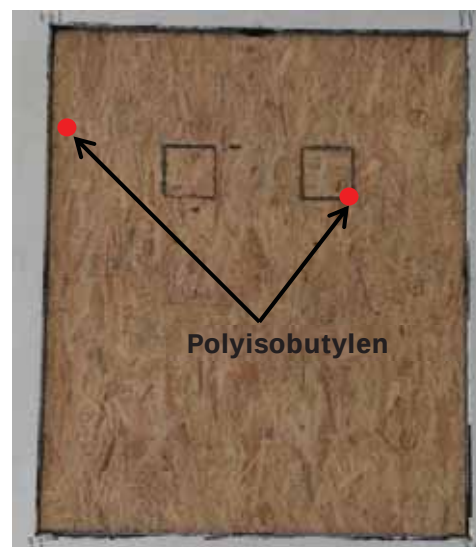


Abbildung 12: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Warmseite.

Am Prüfkörper werden Thermoelemente zur Messung der Oberflächentemperaturen befestigt.

Dazu werden 9 Punkte auf jeder Seite des Prüfkörpers definiert. Die folgenden Abbildungen zeigen die Positionen der 9 Punkte auf der Kalt- und auf der Warmseite.

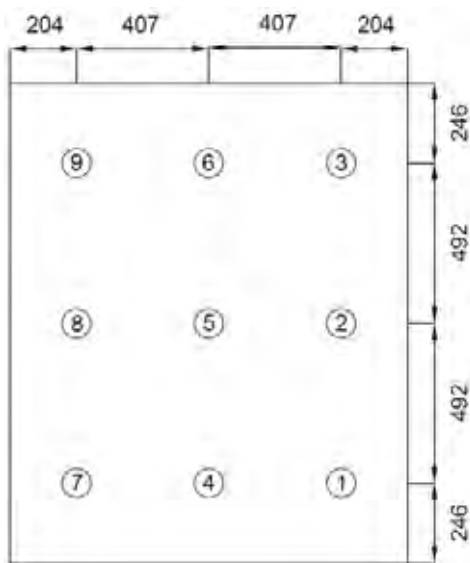


Abbildung 13: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite zur Messung der Oberflächentemperatur.

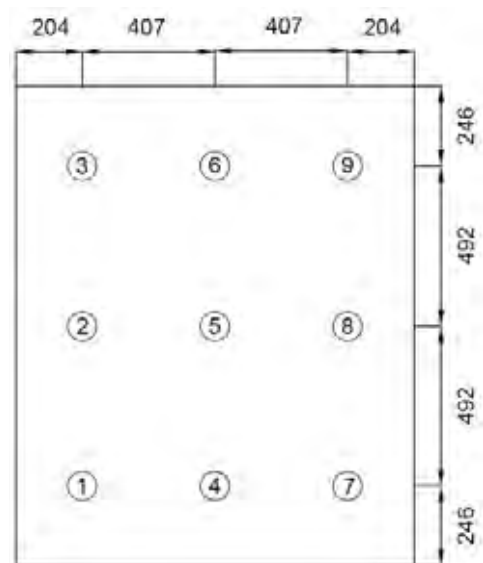


Abbildung 14: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite zur Messung der Oberflächentemperatur.

Die Thermoelemente werden zuerst mit selbstklebender Kupferfolie bis über die Messspitze hinaus überklebt. Das ganze wird dann auf einer Mindestlänge von 150 mm mit Gewebefolie überklebt, wie Bild 15 zeigt.



Abbildung 15: Befestigung eines Thermoelements.

Zur Messung der Wärmestromdichte werden zwei Wärmestromplatten angebracht. Die Positionen dieser Platten sind in Bild 16 gezeigt.

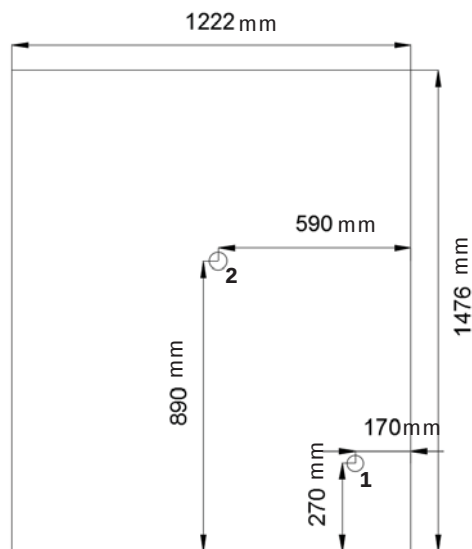


Abbildung 16: Positionen 1 und 2 der Wärmestromplatten.



Abbildung 17: Wärmestromplatten auf dem Testelement.

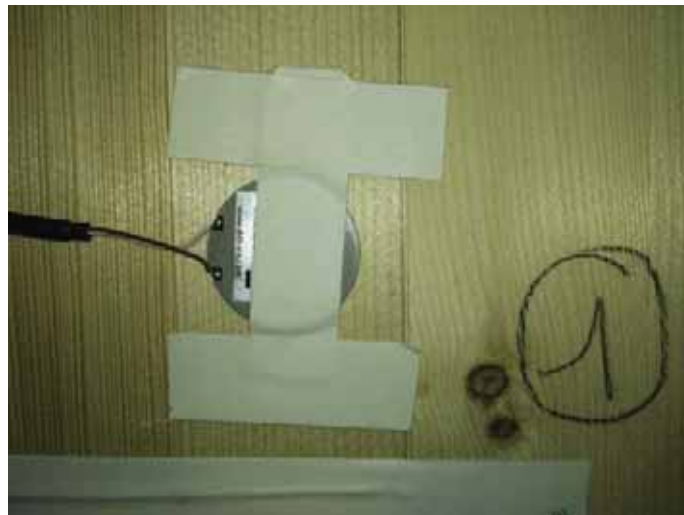


Abbildung 18: Wärmestromplatte auf dem Testelement.

Die Temperaturrandbedingungen für diese Messungen lauten:

- an der OSB Oberfläche (Warmseite): $\theta = 20^\circ \text{ C}$
- an der Oberfläche der Holzstapeldecke (Kaltseite):

$$\theta(t) = 5^\circ \text{ C} + (5 \text{ K}) \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{24\text{h}}\right)$$

Das Bild 19 zeigt die Lufttemperatur auf der Kaltseite.

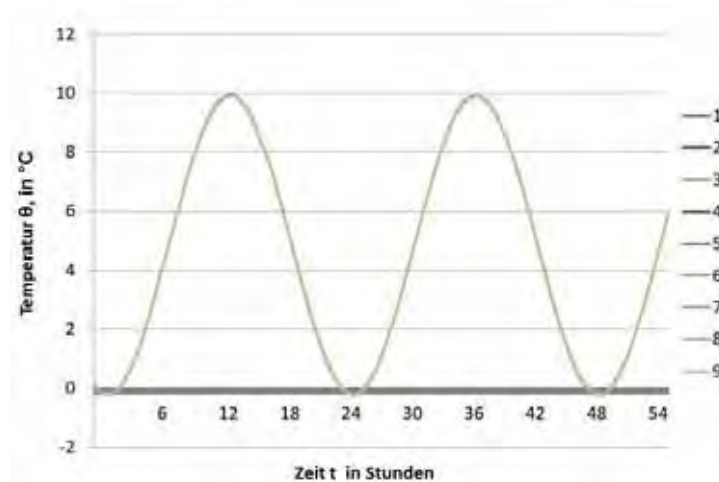


Abbildung 19: Lufttemperatur auf der Kaltseite der Hotbox während der Messung für die 9 Positionen der Thermoelemente.

Eine erste Kontrolle zur Sicherstellung der Qualität der Messung ist die der Differenz zwischen den beiden Maximalwerten und der Differenz zwischen den Minimalwerten für jede Position der Temperaturmessung. Diese Differenz der Temperaturamplitude sollte kleiner als 0.1 K sein. Tabelle 1 enthält die Amplituden der Temperatur für die neun Positionen und für aufeinander folgende Schwingungen sowie ihre Differenz. Es ist festzustellen, dass die maximale Differenz der Amplituden für die Maxima an Position 8 0.02 K, ist. Für die Minima ist die maximale Differenz 0.04 K. Damit ist dieses Stabilitätskriterium erfüllt.

Tabelle 1: Differenz der Amplituden der Schwingungstemperatur für die neun Thermoelemente auf der Kaltseite.

	Max θ ($^\circ\text{C}$)			Min θ ($^\circ\text{C}$)		
	12 h	36 h	Diff	24 h	48 h	Diff
Pos 1	9.9	9.91	0.01	-0.23	-0.21	0.02
Pos 2	9.89	9.9	0.01	-0.24	-0.21	0.03
Pos 3	9.89	9.89	0	-0.23	-0.20	0.03
Pos 4	9.89	9.89	0	-0.25	-0.22	0.03
Pos 5	9.89	9.9	0.01	-0.24	-0.22	0.02
Pos 6	9.88	9.88	0	-0.22	-0.19	0.03
Pos 7	9.88	9.88	0	-0.27	-0.24	0.03
Pos 8	9.87	9.89	0.02	-0.27	-0.23	0.04
Pos 9	9.87	9.88	0.01	-0.25	-0.22	0.03

4.3 Messgeräte

Die Messungen werden mit folgenden Messgeräten durchgeführt:

Tabelle 2: Zusammenstellung der verwandten Messgeräte

Gerät	Hersteller	Typ	Serial Nummer
Geregelter Heizkasten	Taurus	TDW 4242	201112-25.3600.2-05
Kryostat warm	Julabo	FDW 2500T	10201855
Kryostat kalt	Julabo	LH 50	10200138
Rückkühlung	Ciat	Aqualis 2	-
Kreiselpumpe	Lowara	-	13257R00H
Trockner	Parker	K-MT2	38309156
Befeuchtung	Airfog	-	-
Datenlogger	Ahlborn	Almemo 2890-9	H12090261

5 Messergebnisse

Für die Messgenauigkeit der Wärmestromdichten wird das folgende Kriterium festgelegt: die Differenz der Amplituden zweier aufeinander folgender Schwingungen soll kleiner als 0.1 W/m^2 sein. Tabelle 3 enthält die Amplituden der Wärmestromdichten für zwei aufeinander folgende Schwingungen und ihre Differenz. Es ist festzustellen, dass für beiden Positionen, die maximale Differenz der Wärmestromdichten 0.05 W/m^2 ist. Damit ist das Kriterium für die Messgenauigkeit dieses Parameters erfüllt.

Tabelle 3: Differenz der Amplituden zweier aufeinander folgender Schwingungen für das Stabilitätskriterium

	Pos 1					Pos 2				
	1T	Amp.	2T	Amp.	Diff	1T	Amp.	2T	Amp.	Diff
Max $q \text{ (W/m}^2\text{)}$	15.1	8.25	15.2	8.3	0.05	17.7	10.0	17.9	10.05	0.05
Min $q \text{ (W/m}^2\text{)}$	-1.4		-1.4			-2.3		-2.3		

Tabelle 3 zeigt aber auch, dass die Differenz der Amplituden zwischen beiden Wärmeflussplattenpositionen mit ca. 2 W/m^2 sehr gross ist

Diese Differenz wird wahrscheinlich durch Randeffekte an der Position der ersten Wärmestrommessplatte verursacht, so dass diese Messposition bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt wird.

Das Bild 20 zeigt die Wärmestromdichte, aufgetragen über der Zeit (t) in Stunden für die Position 2 der Wärmeflussplatte.

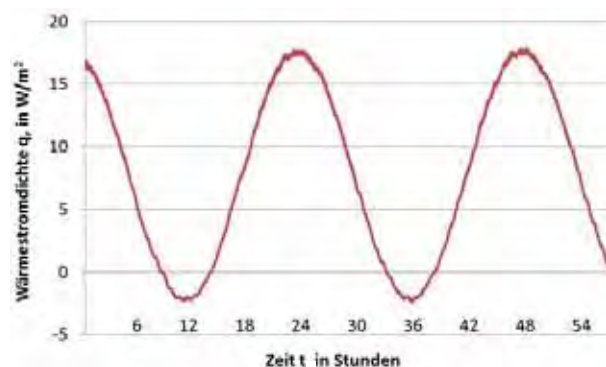


Abbildung 20: Wärmestromdichte des Testelementes in W/m^2 durch die Zeit (t) in Stunden für die Position 2 der Wärmeflussplatten.

Aus der gemessenen Wärmestromdichte q des Testelements während ca. 60 Stunden, wird die Amplitude der Wärmestromdichte nach der folgenden Formel berechnet.

$$\hat{q} = \frac{q_{max} - q_{min}}{2} \frac{W}{m^2} \quad \text{Formel 9}$$

$$q_{max} = \frac{\hat{q}_{1,max} + \hat{q}_{2,max}}{2} \pm \frac{\hat{q}_{1,max} - \hat{q}_{2,max}}{2} \frac{W}{m^2} \quad \text{Formel 10}$$

$$q_{min} = \frac{\hat{q}_{1,min} + \hat{q}_{2,min}}{2} \pm \frac{\hat{q}_{1,min} - \hat{q}_{2,min}}{2} \frac{W}{m^2} \quad \text{Formel 11}$$

Da nur zwei Messwerte für die Wärmestromflussamplitude vorliegen, wird der Fehler (1 Sigma) wie folgt abgeschätzt

$$d\hat{q} = \frac{\hat{q}_1 - \hat{q}_2}{2} \text{ in } \frac{W}{m^2} \quad \text{Formel 12}$$

Die gemessene Amplitude der Wärmestromdichte dieses Testelementes ist dann **$\hat{q} = (8.3 \pm 0.05) \text{ W/m}^2$** .

In gleicher Weise wird die Amplitude der Lufttemperatur berechnet.

$$\hat{\theta} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{2} \text{ K} \quad \text{Formel 13}$$

$$\theta_{max} = \frac{\hat{\theta}_{1,max} + \hat{\theta}_{2,max}}{2} \pm \frac{\hat{\theta}_{1,max} - \hat{\theta}_{2,max}}{2} \text{ in K} \quad \text{Formel 14}$$

$$\theta_{min} = \frac{\hat{\theta}_{1,min} + \hat{\theta}_{2,min}}{2} \pm \frac{\hat{\theta}_{1,min} - \hat{\theta}_{2,min}}{2} \text{ in K} \quad \text{Formel 15}$$

Auch hier wird der Messfehler aus den beiden Temperaturamplituden wie folgt abgeschätzt

$$d\hat{\theta} = \frac{\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_2}{2} \text{ K} \quad \text{Formel 16}$$

Damit ergibt sich die Amplitude der Lufttemperatur zu **$\hat{\theta} = (5.07 \pm 0.01) \text{ K}$** .

Aus den Amplituden der Wärmestromdichte und der Lufttemperatur wird nun die wirksame Wärmekapazität κ nach Formel 17 berechnet.

$$\kappa = \frac{24 \cdot 3600 \text{ s}}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q} \text{ in } \frac{W}{m^2}}{\hat{\theta} \text{ in K}} \text{ in } \frac{kJ}{m^2 K} \quad \text{Formel 17}$$

Der Fehler der wirksamen Wärmekapazität wird mit dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz bestimmt

$$d\kappa = \sqrt{\left(d\hat{q} \cdot \frac{\partial \kappa}{\partial \hat{q}}\right)^2 + \left(d\hat{\theta} \cdot \frac{\partial \kappa}{\partial \hat{\theta}}\right)^2} \frac{kJ}{m^2 K} \quad \text{Formel 18}$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial \hat{\theta}} = - \frac{24 \cdot 3600 s \cdot \hat{q} \text{ in } \frac{W}{m^2}}{2\pi \cdot \hat{\theta}^2 \text{ in } K^2}$$

Formel 19

$$\frac{\partial \kappa}{\partial \hat{q}} = \frac{24 \cdot 3600 s}{2\pi \cdot \hat{\theta} \text{ in } K}$$

Formel 20

Hierbei bezeichnet

- κ die wirksame Wärmekapazität in kJ/m²K
- $\hat{q}$ die gemessene Amplitude der Wärmestromdichte in W/m²
- $\hat{\theta}$ die gemessene Amplitude der Temperatur in K

Die wirksame Wärmekapazität ergibt sich schließlich zu

$$\kappa = (22.5 \pm 0.48(3\sigma)) \text{ kJ/m}^2\text{K}$$

6 Plausibilitätsbetrachtung des Messergebnisses

Zum Überprüfen der Plausibilität des Messergebnisses wird die dynamische Wärmekapazität des Messaufbaus mit dem Berechnungsprogramm ANSYS berechnet.

Die angesetzten Materialeigenschaften sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Materialeigenschaften für die Berechnung mit ANSYS. R steht für die radiale Richtung des Holzes, T für die transversale Richtung des Holzes und L für die longitudinale Richtung des Holzes.

	Fichte	OSB Platte
Dichte ρ in kg/m ³	420	615
Wärmeleitfähigkeit λ in W/(mK)	R = 0.086	0.13
	T = 0.071	
	L = 0.223	
Wärmekapazität C_p in MJ/(m ³ K)	0.634	0.923

Die Temperaturrandbedingungen für die Berechnung sind:

- Oberfläche OSB Platte:
 - Konstante Lufttemperatur $\theta = 20^\circ \text{C}$
 - Wärmeübergangswiderstand $R = 0.16 \text{ (m}^2\text{K/W)}$
- Oberfläche Brettstapeldecke Fichte:
 - Sinusförmige Temperatur

$$\theta(t) = \left(5 + 5 \cdot \sin \left(2\pi \cdot \frac{t}{24 h} \right) \right) ^\circ \text{C}$$

- Wärmeübergangswiderstand $R = 0.08 \text{ (m}^2\text{K/W)}$

Mit diesen Annahmen ergibt die Berechnung eine Amplitude der Wärmestromdichte von **$\hat{q} = 8.24 \text{ W/m}^2$** .

Die hieraus berechnete dynamische Wärmekapazität ist **$\kappa = 22.7 \text{ kJ/m}^2\text{K}$** .

Damit stimmt die berechnete dynamische Wärmekapazität mit der gemessenen innerhalb der Fehlergrenzen überein.

7 Verzeichnisse

7.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Differenz der Amplituden der Schwingungstemperatur für die neun Thermoelemente auf der Kaltseite.	13
Tabelle 2: Zusammenstellung der verwandten Messgeräte	14
Tabelle 3: Differenz der Amplituden zweier aufeinander folgender Schwingungen für das Stabilitätskriterium	14
Tabelle 4: Materialeigenschaften für die Berechnung mit ANSYS. R steht für die radiale Richtung des Holzes, T für die transversale Richtung des Holzes und L für die longitudinale Richtung des Holzes.	16

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1 [1].	3
Abbildung 2: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für Probekörper	4
Abbildung 3: Positionen (roter Kreis) der neun Thermoelemente zur die Messung der Lufttemperatur.	8
Abbildung 4: Detail des Thermoelementes innerhalb des Stahlzylinders.....	8
Abbildung 5: Ansicht der Seite des Prüfkörpers mit OSB Platte.	9
Abbildung 6: Ansicht des Prüfkörpers auf der Seite mit der Brettstapeldecke.	9
Abbildung 7: Schichtenaufbau des Prüfkörpers.	9
Abbildung 8: Holzdübel aus Fichte zum Verschliessen der Bohrungen.	9
Abbildung 9: Ansicht der Holzkeile.....	10
Abbildung 10: Ansicht der Dichtschnüre.....	10
Abbildung 11: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Kaltseite.	10
Abbildung 12: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Warmseite.	10
Abbildung 13: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite zur Messung der Oberflächentemperatur.	11
Abbildung 14: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite zur Messung der Oberflächentemperatur.	11
Abbildung 15: Befestigung eines Thermoelements.....	11
Abbildung 16: Positionen 1 und 2 der Wärmestromplatten.....	12
Abbildung 17: Wärmestromplatten auf dem Testelement.	12
Abbildung 18: Wärmestromplatte auf dem Testelement.	12
Abbildung 19: Lufttemperatur auf der Kaltseite der Hotbox während der Messung für die 9 Positionen der Thermoelemente.	13
Abbildung 20: Wärmestromdichte des Testelementes in W/m^2 durch die Zeit (t) in Stunden für die Position 2 der Wärmeflussplatten.....	14

7.3 Literatur

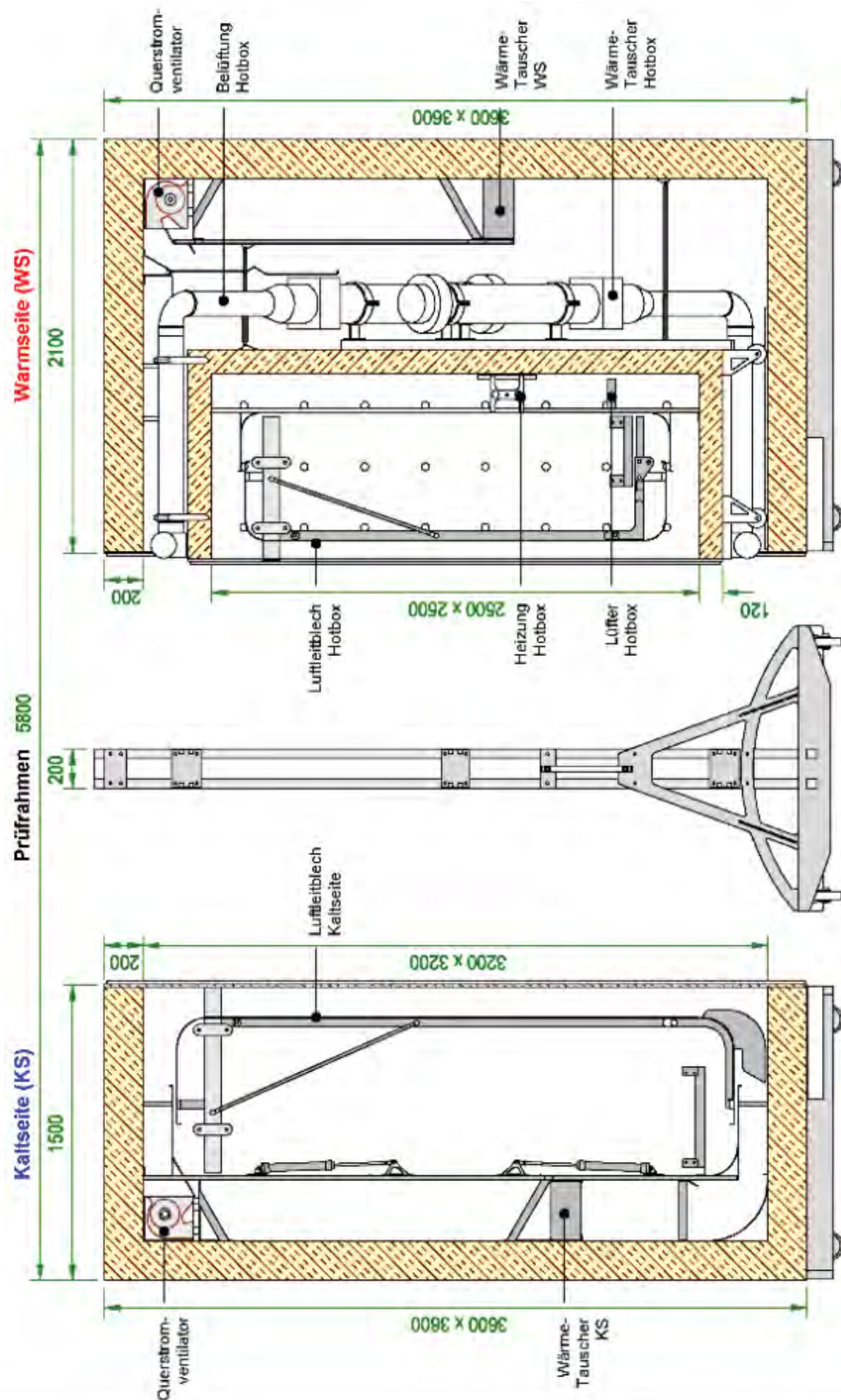
- [1] SN EN ISO 12567-1:2010 Wärmetechnisches Verhalten von Fenster und Türen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens - Teil 1: Komplette Fenster und Türen.
- [2] EN ISO 13786 - 6: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamischthermische Kenngrössen - Berechnungsverfahren, 2015.

8 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt.

Anhang A

Detaillierte Information der Prinzipskizze





Messbericht

Messung der wirksamen Wärmekapazität einer profilierten Brettstapeldecke

**Adresse der
Forschungsstelle**

Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
Kompetenzbereich Bauphysik und Energie
Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel

www.ahb.bfh.ch

Sachbearbeiter/in

Prof. Dr. Christoph Geyer/Amabel Melián Hernández

Datum

31. Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Beschreibung der Anlage	3
3	Messverfahren	5
3.1	Grundlagen der Wärmeflussmessung	5
3.2	Konstante Temperaturrendbedingungen	5
3.3	Variable Temperaturrendbedingungen	5
3.4	Definition der wirksamen Wärmekapazität	5
3.5	Berechnung nach EN ISO 13786	5
3.6	Messung mit der „Hot Box“	7
4	Durchführung der Messungen	8
4.1	Beschreibung des Prüfkörpers	8
4.2	Einbau des Prüfkörpers	9
4.3	Messgeräte	14
5	Messergebnisse	14
6	Berechnung der dynamischen Wärmekapazität	17
7	Verzeichnisse	19
7.1	Tabellenverzeichnis	19
7.2	Abbildungsverzeichnis	19
7.3	Literatur	20
8	Bestimmungen zum vorliegenden Bericht	20
Anhang A: Detaillierte Information der Prinzipskizze		21

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes „Holzkonstruktionen mit optimierter Wärmespeicherfähigkeit“, gefördert vom Bundesamt für Umwelt, wird die zeitabhängige Wärmestromdichte und damit die dynamische Wärmekapazität einer profilierten Brettstapeldecke bestimmt.

2 Beschreibung der Anlage

Die Messung wird in einem Prüfstand zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des kalibrierten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1:2010 *Wärmetechnisches Verhalten von Fenster und Türen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heizkastenverfahrens - Teil 1: Komplette Fenster und Türen* [1] durchgeführt. Der Prüfstand befindet sich in den Laboren der Berner Fachhochschule in Biel.

Die Anlage besteht aus zwei Klimakammern, die als Warm- und als Kaltseite bezeichnet werden. Die Abmessung (Breite, Höhe und Tiefe) der Warmseite ist (3600 x 3600 x 2100) mm. Im Innern der Warmseite befindet sich die sogenannte Hotbox. Diese Hotbox hat die Dimensionen (2740 x 2740 x 1050) mm. Die Dimensionen der Kaltseite ist (3600 x 3600 x 1500) mm. Zwischen den beiden Klimakammern ist der Prüfraum mit der Prüfmassage installiert, in den der Probekörper eingebaut wird. Dieser Prüfraum ist (3600 x 3600 x 196) mm gross. Die Öffnung in der Prüfmassage misst (1230 x 1480 x 196) mm. Der Prüfraum weist einen hohen Wärmedurchlasswiderstand auf, hält den Probekörper in der richtigen Stellung und trennt die Warmseite von der Kaltseite.

Die folgende Abbildung zeigt eine Prinzipskizze der Anlage. Detaillierte Informationen findet man in Anhang A.

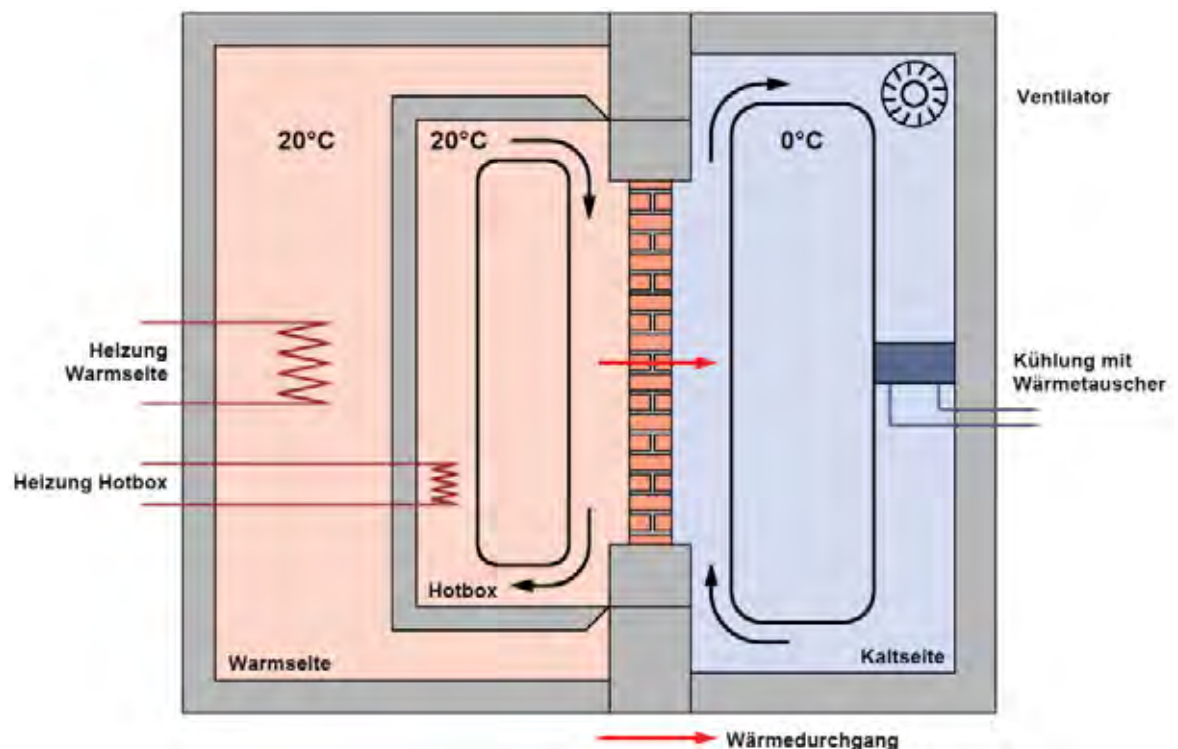


Abbildung 1: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des geschützten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1.

Abbildung 2 zeigt eine Prinzipskizze der Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für den Probekörper.

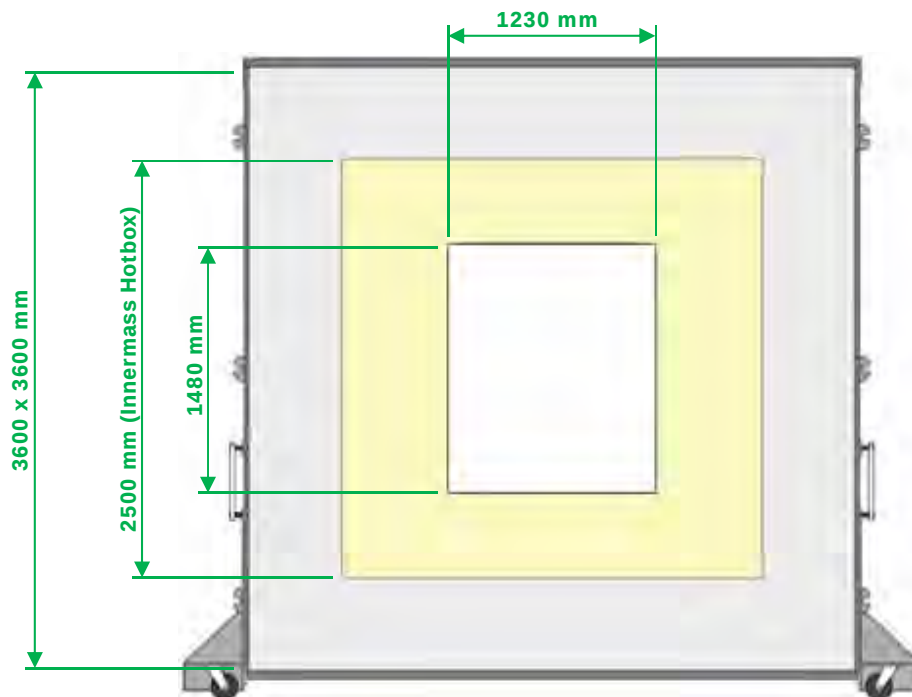


Abbildung 2: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für Probekörper

In den Klimakammern befinden sich Luftleitbleche. Die Luftleitbleche sind verfahrbar (seitliche Stellschrauben) um eine definierte Anströmung des Probekörpers zu erreichen. Die Strömungsrichtung ist am Probekörper kaltseitig von unten nach oben und warmseitig von oben nach unten. Die Konvektion an den Oberflächen ist damit beidseitig erzwungen.

Grundsätzlich ist die Steuerung und Regelung des Heizkastens dezentral und vom Rechner unabhängig, der nur Sollwerte übermittelt und Kontrollwerte aufzeichnet. Die Thermostate haben eigene PID Kontrolle Parameter (Proportional, integral and derivated terms), die entscheidend für ein optimales Einregeln der Hotbox sind. Die PID Regelung des Messkastens und die Feuchteregeung erfolgt über den Hauptrechner und die installierte Software („Hot-box 2014“).

3 Messverfahren

3.1 Grundlagen der Wärmeflussmessung

Der Wärmestrom durch ein Bauteil hängt u.a. von den Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien, seinen Schichtdicken, von der Bauteilgeometrie sowie von den Übergangsbedingungen an den Bauteiloberflächen ab.

3.2 Konstante Temperaturreandbedingungen

Zur Messung des stationären Wärmedurchgangskoeffizienten wird die „Hot Box“ mit konstanten Temperaturreandbedingungen auf beiden Seiten des Prüfkörpers betrieben. Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) beschreibt die Wärmemenge durch eine ein- oder mehrlagige Materialschicht, welche in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m^2 fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen um 1 K unterscheiden.

Der Wärmedurchgangskoeffizient ist der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes (R_T), welcher sich aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände (R) der einzelnen hintereinander liegenden Bauteilschichten sowie der Wärmeübergangswiderstände (R_{si} ; R_{se}) der Luftschichten an beiden Oberflächen zusammensetzt:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} \text{ in } \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad \text{Formel 1}$$

3.3 Variable Temperaturreandbedingungen

Zur Messung der dynamischen Wärmekapazität wird die Temperaturreandbedingung an der Oberfläche des Prüfkörpers, deren dynamische Wärmekapazität gemessen werden soll, geändert: hier wird eine zeitabhängige, sinusförmige Temperaturreandbedingung aufgeprägt, welche um einen konstanten Mittelwert oszilliert.

Diese sinusförmige Temperaturreandbedingung erzeugt einen sinusförmigen Wärmestrom durch die Oberfläche des Prüfkörpers.

Die Berechnung dieses dynamischen Wärmestroms und der dynamischen Wärmekapazität erfolgt nach EN ISO 13786 *Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Teil 6: Berechnungsverfahren*, Ausgabe 2015 [2].

3.4 Definition der wirksamen Wärmekapazität

Die dynamische oder wirksame Wärmekapazität oder Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils beschreibt, wieviel Wärmeenergie dieses über eine Oberfläche bei einer sinusförmigen Lufttemperaturschwankung aufnehmen bzw. abgeben kann.

3.5 Berechnung nach EN ISO 13786

Die Norm EN ISO 13786 [2] stellt ein analytisches Verfahren zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität zur Verfügung. Die Berechnung der dynamischen Wärmekapazität nach EN ISO 13786 [2] ist allerdings auf homogene, ebene Bauteile beschränkt. Für die zeitliche Temperaturschwankung der Luft wird eine Sinus-Funktion, welche um einen Mittelwert schwingt, angenommen.

Die Temperatur- bzw. Wärmestromschwankung werden als komplexe Grössen in Zeiger-schreibweise geschrieben: Θ bzw. q .

Diese Temperaturschwankung durchdringt das Bauteil. Die Fortpflanzung dieser Schwingungen im Bauteil hängt von den wärmeschutztechnischen Grössen der einzelnen Bauteilschichten, also von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität, ab.

Die dynamischen d. h. zeitabhängigen wärmeschutztechnischen Grössen des Bauteils werden dann in einer komplexen Matrix, Z_{ij} zusammengefasst. Diese Matrix bestimmt das Durchdringen der Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung des Bauteils. Die Temperatur- und Wärmestromdichteschwankung auf der gegenüberliegenden Seite des Bauteils wird schliesslich mit folgendem Ansatz berechnet:

$$\begin{pmatrix} \Theta_e \\ q_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Theta_i \\ q_i \end{pmatrix} \quad \text{Formel 2}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_{e \text{ oder } i}$ die Temperatur an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.
- $q_{e \text{ oder } i}$ die Wärmestromdichte an der Vorderseite, i, oder der Rückseite des Bauteils, e.

Aus dieser Gleichung kann mit geeigneten Randbedingungen die dynamische oder wirksame Wärmekapazität berechnet werden.

Für Aussenbauteile, an denen raumseitig eine Temperaturschwankung der Raumluft anliegt, ist die wirksame Wärmekapazität κ auf der Raumseite

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 3}$$

Hierbei bezeichnet

- $\hat{\Theta}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Temperatur an der Vorderseite, Index i, oder der Rückseite des Bauteils, Index e.
- $\hat{q}_{e \text{ oder } i}$ die Amplitude der Wärmestromdichte an der Vorderseite, Index i, oder der Rückseite des Bauteils, Index e
- $T = 24 \text{ h}$ die Periodendauer der Temperaturschwingung

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

$$\kappa_1 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 4}$$

$$\kappa_2 = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}_e}{\hat{\Theta}_e} = \frac{T}{2\pi} \cdot \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \quad \text{Formel 5}$$

3.6 Messung mit der „Hot Box“

Aus dem ersten Teil von Formel 3 bis Formel 5 folgt, dass die wirksame Wärmekapazität eines Bauteils als der Quotient der Amplitude der Wärmestromdichte, 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 also umso grösser, je grösser die Amplitude der Wärmestromdichte bei einer bestimmten Amplitude der Temperaturschwankung ist.

Dieser Zusammenhang wird nun genutzt, um die wirksame Wärmekapazität mit der „Hot-box“ zu messen.

Als Randbedingung wird eine sinusförmige Temperaturschwankung der angrenzenden Luft auf der Kaltseite gemäss folgender Gleichung hergestellt:

$$\Theta(t) = \Theta_m + \hat{\Theta} \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \quad \text{Formel 6}$$

Hierbei bezeichnet

- $\Theta_m = 20^\circ\text{C}$ den Mittelwert der Temperatur in $^\circ\text{C}$
- $\hat{\Theta} = 5\text{ K}$ die Amplitude der Temperaturschwankung in K
- t die Zeit in h
- $T = 24\text{ h}$ die Periodendauer in h

Mit Hilfe von Wärmestrommessplatten wird nun die zur Temperaturschwankung gehörende Schwankung der Wärmestromdichte durch die Oberfläche gemessen.

Sodann wird für die entsprechende Oberfläche die wirksame Wärmekapazität κ als Quotient der Amplitude der Schwingung der Wärmestromdichte und der Amplitude der Schwingung der Temperatur wie folgt berechnet.

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{\hat{q}}{\hat{\Theta}} \quad \text{Formel 7}$$

1.1.1 Messprinzip Wärmestromplatten (Hilfswand bei U-Wert-Messung)

Der sinusförmige Wärmestrom durch die Oberfläche des Prüfkörpers wird mit Wärmestromplatten gemessen.

Das Messprinzip zur quantitativen Erfassung des Wärmedurchgangs durch Bauteile basiert auf der sogenannten Hilfswandmethode, bei welcher ein Messfühler (Wärmestromplatte) am Bauteil angebracht wird. Anhand der bekannten thermischen Eigenschaften des Fühlers und der thermoelektrisch gemessenen Temperaturdifferenz wird die Wärmestromdichte (q) durch die Oberfläche des Bauteils bestimmt.

Wärmestromplatten bestehen aus einem Mäander hintereinander geschalteter Thermo-elemente, die in einem Trägermaterial eingebettet sind.

Die Platten verfügen über einen aktiven Teil in der Mitte der Messplatte und eine Randzone (Schutzring), die ein seitliches Umlaufen des Wärmeflusses verringern soll. Die Wärmeflüsse beziehen sich stets auf die vom Mäander abgedeckte Oberfläche und bilden deren Mittelwert.

Die gesuchte Wärmestromdichte (q) ergibt sich durch Multiplikation der gemessenen Spannung (U_{th}) mit einer individuell bestimmten Kalibrierkonstanten (C) des Sensors.

$$q = C \cdot U_{th} \quad \frac{W}{m^2}$$

Formel 8

Dabei ist

- q die Wärmestromdichte in W/m^2
- C die Kalibrierkonstante in $W/(m^2 \text{ mV})$
- U_{th} die Messspannung in mV

Die Temperaturschwankung der Luftschicht wird mit Hilfe von neun Thermoelementen gemessen (Abbildung 3). Um zu verhindern, dass diese Thermoelemente der Luftströmung ausgesetzt werden, werden sie innen in einem Stahlzylinder platziert, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Lufttemperatur ergibt sich als Mittelwert der neun Messstellen auf der Warm- und auf der Kaltseite.

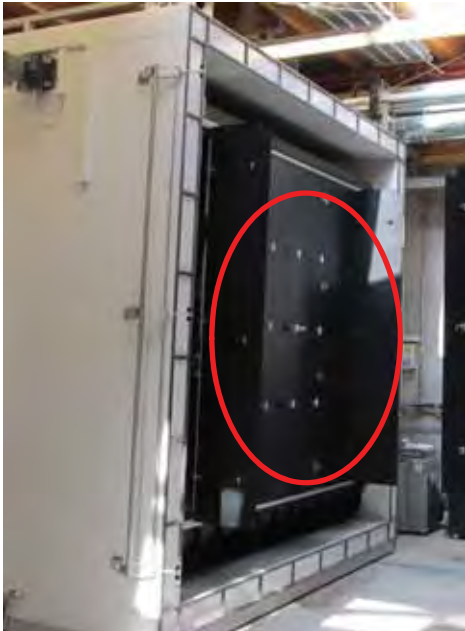


Abbildung 3: Positionen der neun Thermoelemente zur Messung der Lufttemperatur.



Abbildung 4: Detail des Thermoelementes innerhalb des Stahlzylinders.

Aus der Amplitude der sinusförmigen Temperaturschwankung und der Amplitude der Wärmestromdichte kann mit Hilfe der Formel 7 die dynamische Wärmekapazität der Oberfläche des Prüfkörpers bestimmt werden.

4 Durchführung der Messungen

Die Messungen der Wärmestromdichte wurden vom 19.06.2017 bis zum 21.06.2017 durchgeführt.

4.1 Beschreibung des Prüfkörpers

Der Prüfkörper besteht aus einer profilierten Brettstapeldecke aus Fichte und einer OSB-Platte. Die Dimensionen des Prüfkörpers sind (1222 x 1474 x 202) mm. Der Brettstapel hat eine Dicke von 152 mm und jedes Brett ist 50 mm breit. Die Profilierung wird mit überste-

henden Brettern des Brettstapels (40 mm hoch) gebildet. Der Abstand zwischen den Brettern ist 50 mm. Die OSB-Platte auf der Rückseite der Brettstapeldecke ist 10 mm dick. Im oberen Teil der Brettstapeldecke gibt es zwei Bohrungen für Rohre zum Einfädeln, welche zum Einbau benötigt werden. Für die Messungen werden diese Bohrungen mit zwei Holzdübeln aus Fichte geschlossen.

Der Prüfkörper wird so eingebaut, dass die OSB-Platte zur Warmseite zeigt.

Die folgenden Ausbildungen zeigen den Prüfkörper.



Abbildung 5: Ansicht der Seite des Probekörpers mit OSB-Platte.

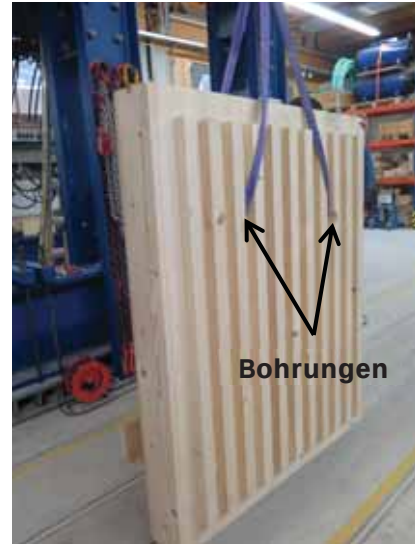


Abbildung 6: Ansicht des Probekörpers auf der Seite mit der profilierten Brettstapeldecke.



Abbildung 7: Schichtenaufbau des Probekörpers.



Abbildung 8: Holzdübel aus Fichte zum Verschluss der Bohrungen.

4.2 Einbau des Prüfkörpers

Die Installation des Prüfkörpers in der Prüfmaske erfolgt mit einem Kran. Um den Prüfkörper im Prüfraumen einzupassen, werden Holzkeile zwischen dem Prüfkörper und dem Prüfraum eingebracht.

Der Spalt zwischen dem Prüfkörper und der Prüfmaske wird mit Dichtschnüren (Zöpfe aus Baumwolle und Acrylfasern,) gefüllt. Zum Abschluss wird die Fuge zwischen Prüfkörper und Prüfraum mit Polyisobutyl abgedichtet.

Die folgenden Bilder zeigen die Einbausituation des Prüfkörpers.



Abbildung 9: Ansicht der Holzkeile.

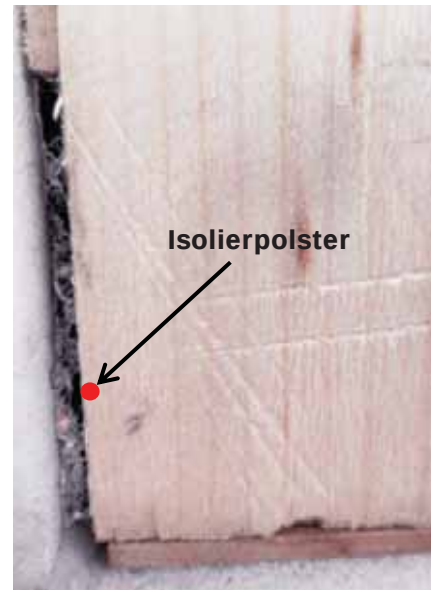


Abbildung 10: Ansicht des Dichtsnüres

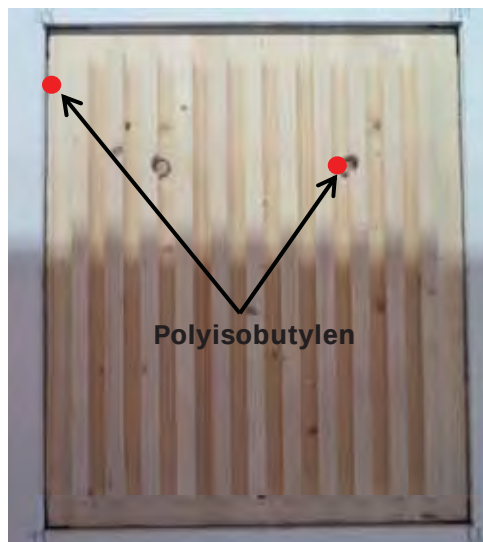


Abbildung 11: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Kaltseite.

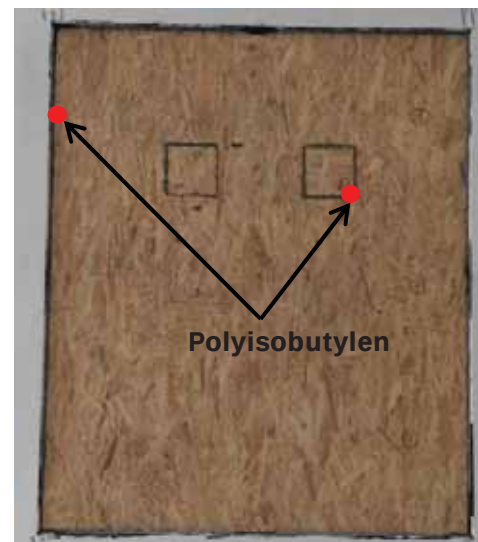


Abbildung 12: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Warmseite.

Am Prüfkörper werden Thermoelemente zur Messung der Oberflächentemperaturen befestigt.

Dazu werden 15 Punkte auf jeder Seite des Prüfkörpers definiert. Die folgenden Abbildungen zeigen die Positionen der 15 Punkte auf der Kalt- und auf der Warmseite.

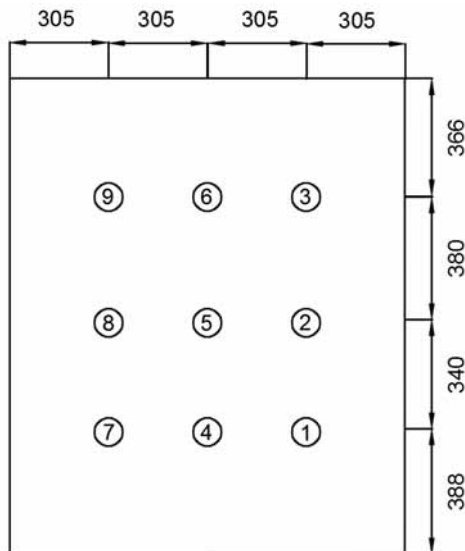


Abbildung 13: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite (an der Oberseite der herausstehenden Bretter) zur Messung der Oberflächentemperatur.

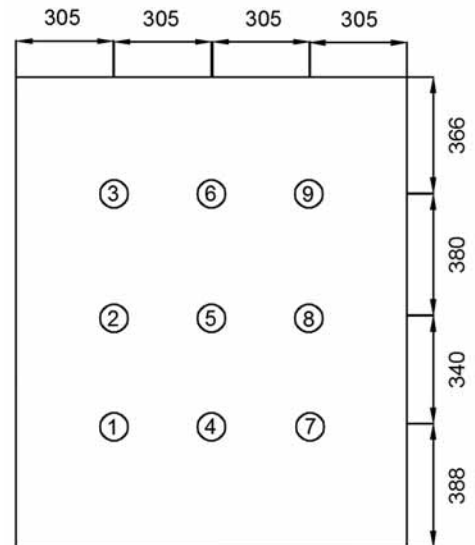


Abbildung 14: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite zur Messung der Oberflächentemperatur.

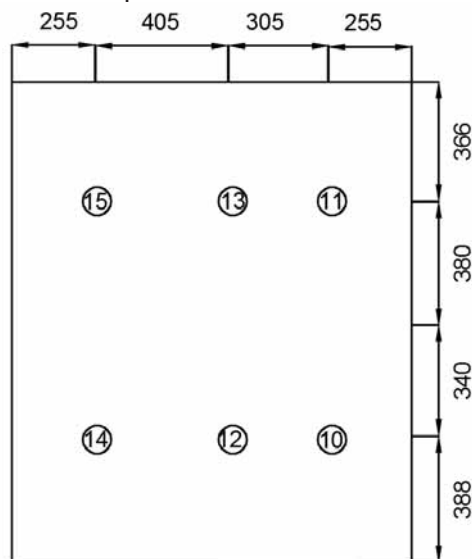


Abbildung 15: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite (zwischen den herausstehenden Brettern) zur Messung der Oberflächentemperatur.

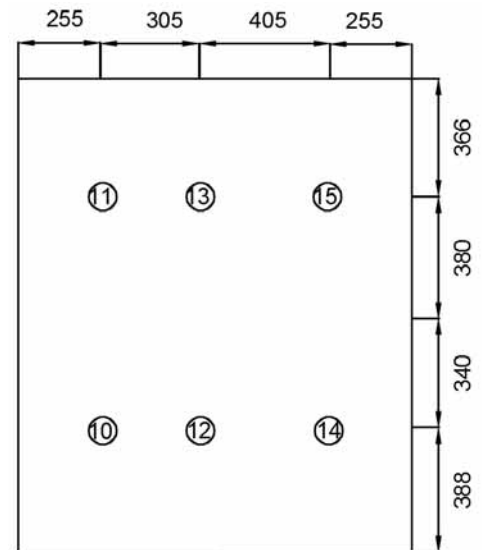


Abbildung 16: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite zur Messung der Oberflächentemperatur.

Die Thermoelemente werden zuerst mit selbstklebender Kupferfolie bis über die Messspitze hinaus überklebt. Das ganze wird dann auf einer Mindestlänge von 150 mm mit Gewebiband überklebt, wie Bild 17 zeigt.



Abbildung 17: Befestigung zweier Thermoelemente.
(links an der Oberseite des herausstehenden Brettes,
rechts zwischen den Brettern)

Zur Messung der Wärmestromdichte werden zwei Wärmestromplatten angebracht. Die Positionen dieser Platten sind im Bild 18 gezeigt.

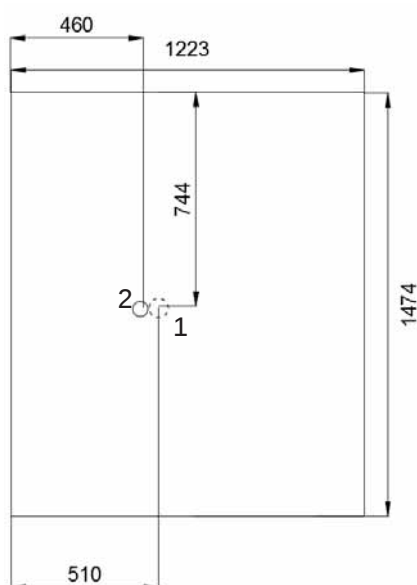


Abbildung 18: Positionen 1 und 2 der Wärmestromplatten.

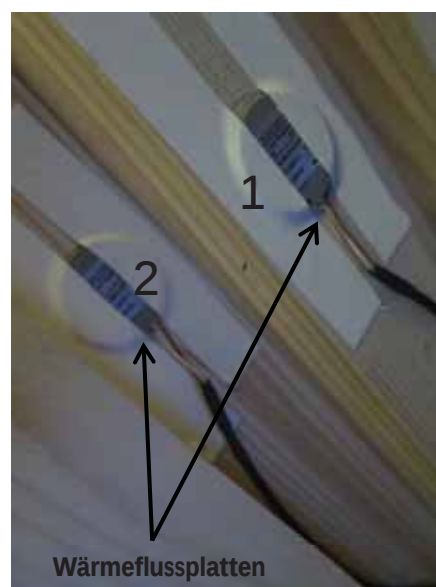


Abbildung 19: Wärmestromplatten auf dem Testelement.



Abbildung 20: Wärmestromplatte auf dem Testelement an der Seite des herausstehenden Brettes (Position 3 und 4).

Die Temperaturrandbedingungen für diese Messungen lauten:

- Lufttemperatur an der OSB Oberfläche (Warmseite): $\Theta = 20^\circ \text{C}$
- Lufttemperatur an der Oberfläche der Brettstapeldecke (Kaltseite):

$$\Theta(t) = 5^\circ \text{C} + (5 \text{ K}) \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{24h}\right)$$

Das Bild 21 zeigt die Lufttemperatur auf der Kaltseite.

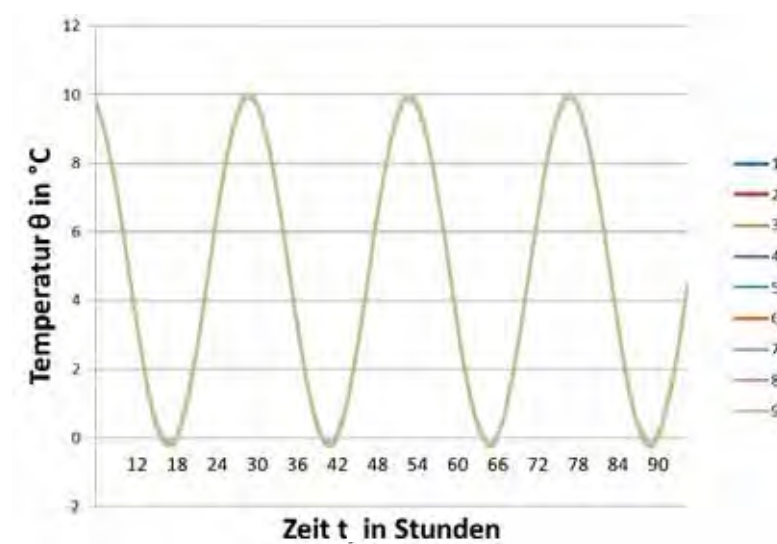


Abbildung 21: Lufttemperatur auf der Kaltseite der Hotbox während der Messung für die 9 Positionen der Thermoelemente auf den herausstehenden Brettern.

Eine erste Kontrolle zur Sicherstellung der Qualität der Messung ist die Untersuchung der Differenz zwischen den beiden Maximalwerten und die Differenz zwischen den Minimalwerten für jede Position der Temperaturmessung. Diese Differenz der Temperatur sollte kleiner als 0.1 K sein. Tabelle 1 enthält die Amplituden der Temperatur für die neun Positionen auf den herausstehenden Brettern und für aufeinander folgende Schwingungen und ihre Diffe-

renz. Es ist festzustellen, dass die maximale Differenz der Amplituden 0.04 K für alle Positionen ist. Für die Minima ist die maximale Differenz ebenfalls 0.04 K. Damit ist dieses Stabilitätskriterium erfüllt.

Tabelle 1: Differenz der Amplituden der Schwingungstemperatur für die neun Thermoelemente auf der Kaltseite.

	Max θ (°C)			Min θ (°C)		
	Max	Min	Diff	Max	Min	Diff
Pos 1	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 2	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 3	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 4	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 5	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 6	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 7	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 8	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04
Pos 9	9.96	9.92	0.04	-0.21	-0.25	0.04

4.3 Messgeräte

Die Messungen werden mit folgenden Messgeräten durchgeführt:

Tabelle 2: Zusammenstellung der verwandten Messgeräte

Gerät	Hersteller	Typ	Serial Nummer
Geregelter Heizkasten	Taurus	TDW 4242	201112-25.3600.2-05
Kryostat warm	Julabo	FDW 2500T	10201855
Kryostat kalt	Julabo	LH 50	10200138
Rückkühlung	Ciat	Aqualis 2	-
Kreiselpumpe	Lowara	-	13257R00H
Trockner	Parker	K-MT2	38309156
Befeuchtung	Airfog	-	-
Datenlogger	Ahlborn	Almemo 2890-9	H12090261

5 Messergebnisse

Für die Messgenauigkeit der Messung wird das folgende Kriterium festgelegt: die Differenz der Amplituden zweier aufeinander folgender Schwingungen soll kleiner als 0.1 W/m^2 sein. Tabelle 3 und 4 enthalten die Amplituden der Wärmestromdichten für die aufeinanderfolgenden Schwingungen und ihre Differenz. Es ist festzustellen, dass die maximale Differenz für Position 1 0.1 W/m^2 ist; für Position 2 ist die maximale Differenz 0.05 W/m^2 ; für Position 3 ist sie 0.1 W/m^2 und für Position 4 ist die maximale Differenz 0 W/m^2 . Damit ist das Kriterium für die Messgenauigkeit dieser Messung erfüllt.

Tabelle 3: Differenz der Amplituden der aufeinander folgenden Schwingungen der Position 1 und 2 für das Stabilitätskriterium

	Pos 1					Pos 2				
	1T	2T	3T	4T	Diff	1T	2T	3T	4T	Diff
Max q (W/m^2)	6	5.9	5.9	5.9	0.1	25	25	25	25	0
Min q (W/m^2)	-2.7	-2.8	-2.6	-2.7	0.2	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9	0.1
Amplitude	4.35	4.35	4.25	4.3	0.1	13.4	13.45	13.45	13.45	0.05

Tabelle 4: Differenz der Amplituden der aufeinander folgenden Schwingungen der Position 3 und 4 für die Messgenauigkeit

	Pos 3					Pos 4				
	1T	2T	3T	4T	Diff	1T	2T	3T	4T	Diff
Max q (W/m ²)	10.2	10	10	10.2	0.2	10.1	10	10.1	10.1	0.1
Min q (W/m ²)	-3.2	-3.3	-3.2	-3.2	0.1	-3.1	-3.2	-3.1	-3.1	0.1
Amplitude	6.7	6.65	6.6	6.7	0.1	6.6	6.6	6.6	6.6	0

Abbildung 22 zeigt die Wärmestromdichte (q) in W/m², aufgetragen über der Zeit (t) in Stunden für die Positionen 1 und 2 der Wärmestromplatte. Abbildung 23 zeigt die Wärmestromdichten als Funktion der Zeit für die Positionen 3 und 4.

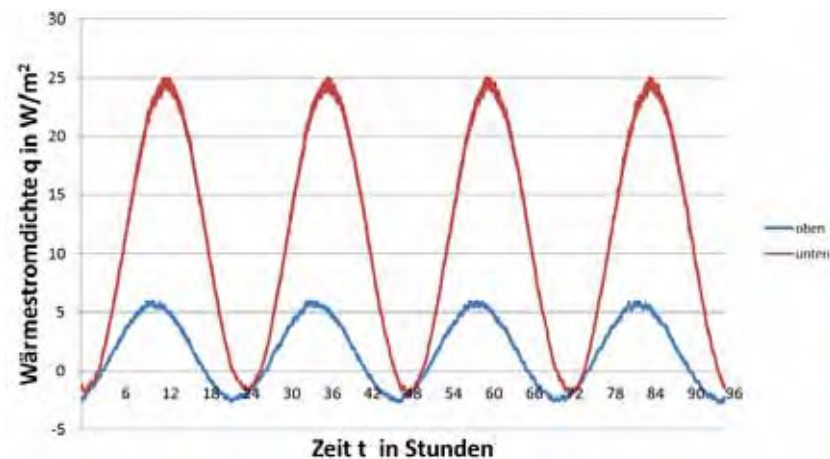


Abbildung 22: Wärmestromdichte des Testelementes aufgetragen über der Zeit in Stunden für die Positionen 1 (Oberseite herausstehendes Brett) und 2 (im Spaltboden dazwischen) der Wärmestromplatten.



Abbildung 23: Wärmestromdichte des Testelementes aufgetragen über der Zeit für die Positionen 3 und 4 (an den Seiten der Bretter) der Wärmestromplatten.

Aus der gemessenen Wärmestromdichte des Testelements über einen Zeitraum von ca. 96 Stunden, wird die Amplitude der Wärmestromdichte für vier Perioden nach der folgenden Formel berechnet

$$\hat{q}_i = \frac{q_{max,i} - q_{min,i}}{2} \text{ in } \frac{W}{m^2} \quad \text{Formel 9}$$

Dabei ist $q_{max,i}$ der Maximalwert der Wärmestromdichte während der i-ten Schwingungsperiode; $q_{min,i}$ ist der zugehörige Minimalwert der Wärmestromdichte.

Aus den vier Messwerten wird ein Mittelwert der Amplitude gebildet:

$$\hat{q} = \sum_{i=1}^4 \frac{\hat{q}_i}{4} \quad \text{Formel 10}$$

Der Fehler des Mittelwertes der Amplitude ergibt sich als Standardabweichung zu

$$d\hat{q} = \sigma_{\hat{q}} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \frac{(\hat{q}_i - \hat{q})^2}{4 - 1}} \quad \text{Formel 11}$$

Der Fehler des Mittelwertes der Amplitude berechnet sich mit Hilfe der Studentverteilung für einen Freiheitsgrad $f = 3$ und einer zweiseitigen Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5 \%$ als 95 % Vertrauensintervall

$$d\hat{q} = t_{f,1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{\hat{q}} = 3,18 \cdot \sigma_{\hat{q}} \quad \text{Formel 12}$$

Die Amplituden der gemessenen Wärmestromdichten des Testelements sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Amplituden der Wärmestromdichten gemessen an den Positionen 1, 2, 3 und 4.

Fläche	Wärmestromdichte in W/m^2
Oben (Position 1)	$\hat{q}_{oben} = (4.3 \pm 0.21)$
Unten (Position 2)	$\hat{q}_{unten} = (13.4 \pm 0.09)$
Seite (Position 3 und 4)	$\hat{q}_{seite} = (6.63 \pm 0.08)$

Die Bestimmung des Mittelwertes der Amplitude der Lufttemperatur erfolgt sinngemäss.

$$\hat{\theta}_i = \frac{\theta_{max,i} - \theta_{min,i}}{2} \text{ in } K \quad \text{Formel 13}$$

$$\hat{\theta} = \sum_{i=1}^4 \frac{\hat{\theta}_i}{4} \text{ in } K \quad \text{Formel 14}$$

Auch hier wird der Messfehler wie folgt abgeschätzt

$$d\hat{\theta} = \sigma_{\hat{\theta}} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \frac{(\hat{\theta}_i - \hat{\theta})^2}{4-1}} \text{ in K} \quad \text{Formel 15}$$

$$d\hat{\theta} = t_{f,1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{\hat{\theta}} = 3,18 \cdot \sigma_{\hat{\theta}} \quad \text{Formel 16}$$

Damit ergibt sich die Amplitude der Lufttemperatur zu $\hat{\theta} = (5.09 \pm 0.05) \text{ K}$.

Im Gegensatz zu ebenen Bauteilen ist bei profilierten Bauteilen die Wärmestromdichte nicht mehr überall an der Oberfläche konstant, so dass aus der gemessenen Amplitude der Wärmestromdichte am Ort der Wärmestromplatte nicht mehr direkt die gesamte Amplitude der Wärmestromdichte des Bauteils und somit die dynamische Wärmekapazität κ mit Formel 7 berechnet werden kann.

Da die Wärmestromdichte profilierter Bauteile ortsabhängig ist, muss man die Wärmeströme am Ort der Wärmestromplatte mit einem Wärmebrückenprogramm berechnen und vergleichen. Stimmen der Messwert und der berechnete Wärmestrom an diesen Stellen überein, so kann der Rechenwert für die dynamische Wärmekapazität aus dem Wärmebrückenprogramm übernommen werden.

6 Berechnung der dynamischen Wärmekapazität

Zur Berechnung der dynamischen Wärmekapazität werden die Amplituden der Wärmeströme an den Orten der Wärmestromplatten mit dem Berechnungsprogramm ANSYS berechnet.

Die angesetzten Materialeigenschaften sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Materialeigenschaften für die Berechnung mit ANSYS.

	Fichte	OSB Platte
$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	420	615
	R= 0.086	
$\lambda \text{ (W/(mK))}$	T= 0.071	0.13
	L= 0.223	
$C_p \text{ (MJ/(m}^3\text{K))}$	0.634	0.923

Für die Berechnung wird, wie bei der Messung der wirksamen Wärmekapazität der Brettstapeldecke, auf der Kaltseite die Lufttemperatur sinusförmig nach folgender Gleichung variiert:

$$\Theta(t) = \left(5 + 5 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{24 h}\right) \right) ^\circ \text{C} \quad \text{Formel 17}$$

Der Wärmeübergangswiderstand auf der warmen Seite beträgt $R_{si} = 0.14 \text{ m}^2\text{K/W}$ bei einer Lufttemperatur von 20°C . Der Wärmeübergangswiderstand auf der Kaltseite beträgt $R_{se} = 0.03 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Diese Berechnung ergibt eine Amplitude des Wärmestromflusses an den vier Messpositionen, welche in Tabelle 7 dargestellt sind:

Tabelle 7: Berechnete Amplitude des Wärmestromflusses in W/m^2 für die verschiedenen Flächen.

Fläche	Wärmestromdichte W/m^2
Oben (Position 1)	$\hat{q}_{oben} = 5.15$
Unten (Position 2)	$\hat{q}_{unten} = 11.36$
Seite (Position 3 und 4)	$\hat{q}_{seite} = 6.62$

Tabelle 8 zeigt die Differenz zwischen der gemessenen Wärmestromdichte und der berechneten für die vier Messpositionen.

Tabelle 8: Differenz der berechneten und der gemessenen Amplituden des Wärmestromflusses in W/m^2 für die verschiedenen Messpositionen

Wärmestromdichte in $\text{W/m}^2\text{K}$			
Position	Messung	ANSYS	Differenz
Oben (Position 1)	$\hat{q}_{oben} = (4.3 \pm 0.21)$	$\hat{q}_{oben} = 3.77$	0.54
Unten (Position 2)	$\hat{q}_{unten} = (13.4 \pm 0.09)$	$\hat{q}_{unten} = 12.0$	1.4
Seite (Position 3 und 4)	$\hat{q}_{seite} = (6.63 \pm 0.08)$	$\hat{q}_{seite} = 5.73$	0.9

Damit stimmen die berechneten und die gemessenen Amplituden der Wärmestromdichte an den verschiedenen Messstellen innerhalb der Messfehler nicht überein.

Damit sind weitere Untersuchungen und ergänzende Messungen erforderlich, um die Ursachen für diese Abweichungen zu identifizieren und so auch die Messung der wirksamen Wärmekapazität von profilierten Decken zu ermöglichen.

Verzeichnisse

6.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Differenz der Amplituden der Schwingungstemperatur für die neun Thermoelemente auf der Kaltseite.	14
Tabelle 2: Zusammenstellung der verwandten Messgeräte	14
Tabelle 3: Differenz der Amplituden der aufeinander folgenden Schwingungen der Position 1 und 2 für das Stabilitätskriterium	14
Tabelle 4: Differenz der Amplituden der aufeinander folgenden Schwingungen der Position 3 und 4 für die Messgenauigkeit.....	15
Tabelle 5: Amplituden der Wärmestromdichten gemessen an den Positionen 1, 2, 3 und 4.	16
Tabelle 6: Materialeigenschaften für die Berechnung mit ANSYS.....	17
Tabelle 7: Berechnete Amplitude des Wärmestromflusses in W/m^2 für die verschiedenen Flächen.	18
Tabelle 8: Differenz der berechneten und der gemessenen Amplituden des Wärmestromflusses in W/m^2 für die verschiedenen Messpositionen	18

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze des Messaufbaus zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im stationären Zustand mit dem Verfahren des geschützten Heizkastens (Hotbox) nach SN EN ISO 12567-1.	3
Abbildung 2: Ansicht des Prüfrahmens mit der Prüfmaske für Probekörper	4
Abbildung 3: Positionen der neun Thermoelemente zur Messung der Lufttemperatur.	8
Abbildung 4: Detail des Thermoelementes innerhalb des Stahlzylinders.....	8
Abbildung 5: Ansicht der Seite des Probekörpers mit OSB Platte.	9
Abbildung 6: Ansicht des Probekörpers auf der Seite mit der profilierten Brettstapeldecke.	9
Abbildung 7: Schichtenaufbau des Probekörpers.	9
Abbildung 8: Holzdübel aus Fichte zum Verschliessen die Bohrungen.....	9
Abbildung 9: Ansicht der Holzkeile.....	10
Abbildung 10: Ansicht des Dichtschnüre	10
Abbildung 11: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Kaltseite.	10
Abbildung 12: Ansicht der abgedichteten Fugen auf der Warmseite.	10
Abbildung 13: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite (an der Oberseite der herausstehenden Bretter) zur Messung der Oberflächentemperatur.	11
Abbildung 14: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite zur Messung der Oberflächentemperatur.	11
Abbildung 15: Positionen der Thermoelemente auf der Kaltseite (zwischen den herausstehenden Brettern) zur Messung der Oberflächentemperatur.....	11
Abbildung 16: Positionen der Thermoelemente auf der Warmseite zur Messung der Oberflächentemperatur.	11
Abbildung 17: Befestigung zweier Thermoelemente. (links an der Oberseite des herausstehenden Brettes, rechts zwischen den Brettern)	12
Abbildung 18: Positionen 1 und 2 der Wärmestromplatten.....	12
Abbildung 19: Wärmestromplatten auf dem Testelement.	12
Abbildung 20: Wärmestromplatte auf dem Testelement an der Seite des herausstehenden Brettes (Position 3 und 4).	13
Abbildung 21: Lufttemperatur auf der Kaltseite der Hotbox während der Messung für die 9 Positionen der Thermoelemente auf den herausstehenden Brettern.	13

Abbildung 22: Wärmestromdichte des Testelementes aufgetragen über der Zeit in Stunden für die Positionen 1 (Oberseite herausstehendes Brett) und 2 (im Spaltboden dazwischen) der Wärmestromplatten.	15
Abbildung 23: Wärmestromdichte des Testelementes aufgetragen über der Zeit für die Positionen 3 und 4 (an den Seiten der Bretter) der Wärmestromplatten.	15

6.3 Literatur

- [1] SN EN ISO 12567-1:2010 Wärmetechnisches Verhalten von Fenster und Türen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten mittels des Heikastenverfahrens - Teil 1: Komplette Fenster und Türen.
- [2] EN ISO 13786 - 6: Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamischthermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren, 2015.

7 Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt.

Anhang A

Detaillierte Information der Prinzipskizze

