



Schlussbericht 6. März 2011

Berechnung der Wärmekapazität von inhomogenen Konstruktionen

Erweiterung der Planungshilfen für den sommerlichen
Wärmeschutz

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Hochschule Luzern – Technik & Architektur
Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG)
Technikumsstrasse 21
CH-6048 Horw
www.hslu.ch

Autor:

Reto Gadola, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, reto.gadola@hslu.ch
Eveline Thaler, Hochschule Luzern – Technik & Architektur, eveline.thaler@hslu.ch

BFE-Bereichsleiter: Andreas Eckmanns

BFE-Programmleiter: Charles Filleux

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 154247 / 103223

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Zusammenfassung

Im Jahre 2007 erschien die Norm SIA 382/1 [1] in der unter anderem auch bauliche Anforderungen im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz definiert werden. Daraufhin hat der Verein MINERGIE® den sommerlichen Wärmeschutz in die Liste der Anforderungen aufgenommen. Neben dem Sonnenschutz ist die Wärmespeicherfähigkeit ein wichtiger Teilaspekt beim sommerlichen Wärmeschutz. Erfahrungen bei Minergie zeigen, dass bei Gebäuden mit einer freien Betondecke oder gemauerten Wänden und Unterlagsböden genügend Wärmespeicherkapazität vorhanden ist und so die Anforderungen erfüllbar sind. Es ist somit kein rechnerischer Nachweis nötig. Bei einem Holzbau ist die Beurteilung weit schwieriger und in der Regel muss auf Berechnungen zurückgegriffen werden, da Holzbauten tendenziell nahe am Grenzwert liegen. Die Wärmespeicherfähigkeit eines Raumes wird dabei aus dessen umhüllenden Flächen und deren wirksamer Wärmekapazität berechnet. Die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität ist in der Norm SIA 180.073 [3] beschrieben, jedoch nur für homogene Konstruktionen. Inhomogene Konstruktionen, wie sie im Holzbau häufig anzutreffen sind, werden nicht behandelt.

Die durchgeführten Recherchen haben zu verschiedenen Arbeiten rund um die wirksame Wärmekapazität geführt. Die meisten Quellen hielten einer genaueren Prüfung jedoch nicht stand. Entweder wurden nur homogene Modelle betrachtet oder es wurden keine dynamischen Modelle verwendet. Trotzdem konnten für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität drei Varianten ermittelt werden, welche heute eingesetzt werden:

1. Konstruktion als Zusammensetzung aus Elementen unterschiedlicher Schichtstruktur, flächenanteilig zu verrechnen.
2. Ersatz durch eine virtuelle Schicht mit Materialkonstruktionen entsprechend dem arithmetischen Mittel der verwendeten Materialteile.
3. Berücksichtigung nur der flächenmässig dominierenden gedämmten Teile unter Vernachlässigung des Einflusses der Tragstruktur.

Anhand verschiedener inhomogener Konstruktionen aus dem Bauteilkatalog für Neubauten [7] sind Berechnungen nach den drei Verfahren durchgeführt worden. Aus der Resultatanalyse können nun folgende Schlüsse gezogen werden:

- a) die Materialien der ersten Schichten beeinflussen die wirksame Wärmekapazität wesentlich,
- b) die Werte sind aufgrund der Holzbauweise relativ tief, absolut gesehen sind die Abweichungen der wirksamen Wärmekapazität zwischen den Varianten 1 bis 3 klein,
- c) Vergleiche zwischen den Varianten zeigen keine Tendenz, die Resultate streuen in alle Richtungen.

Aus Sicht behördlicher Nachweis kann immer ein konservativer Weg eingeschlagen werden. Dies ist mit der Variante 3 gegeben und wird auch schon heute angewendet. Da aber vor allem im Holzbau jede Wattstunde benötigt wird - um die Anforderung zu erfüllen - ist vor allem für solche Objekte eine genauere Berechnung wichtig. Für inhomogene Konstruktionen welche in Kombination Holz / Dämmstoff ausgeführt werden, wird für eine genauere Berechnung das Verfahren 1 vorgeschlagen. Werden aber inhomogene Konstruktionen in Kombination mit metallischen Durchdringungen betrachtet sind detaillierte Berechnungen nach der finite Element-Methode unumgänglich.

Conclusion

La norme SIA 382/1 [1] parue en 2007 définit entre autres les exigences par rapport aux protections thermiques estivales. De ce fait l'association MINERGIE® a également intégré ces critères à sa liste d'exigences. Outre les protections solaires, la capacité thermique revêt un aspect important dans le cas de la protection thermique estivale. L'expérience acquise dans le cadre de Minergie permet d'établir les constatations suivantes. Les bâtiments ayant des plafonds en béton apparent ou des murs en maçonnerie avec des dalles béton ont assez de capacité thermique et remplissent de ce fait les exigences. Un calcul visant à établir cette preuve est alors superflu. Dans le cas des constructions en bois l'appréciation s'avère être plus difficile. Ceci du fait que ce genre de bâtiment se trouve tendanciellement proche de la valeur limite. Le calcul de la capacité thermique d'un local prendra alors compte des surfaces extérieures de la pièce considérée. Le calcul de la capacité thermique surfacique est décrit dans la norme SIA 180.073 [3] mais ceci que pour les constructions homogènes. Le cas de construction inhomogènes souvent rencontré pour les bâtiments en bois n'y est pas traité.

Les recherches effectuées ont menés à l'étude de différents travaux portant sur la capacité thermique surfacique. La plus part des sources d'information n'apporte malheureusement pas de méthode probante dans ce domaine. Soit on considère que le modèle homogène ou alors on n'utilise pas de modèle dynamique. Néanmoins on peut utiliser pour le calcul de la capacité thermique surfacique trois méthodes actuellement employées :

1. la moyenne arithmétique des capacités thermiques surfaciques de chaque constituant de la construction.
2. la moyenne arithmétique issue de la liste des propriétés du corps considéré, la capacité thermique surfacique est calculée à partir d'une construction fictive.
3. seuls les constituants de la construction isolée sont analysés.

A l'aide des différentes constructions inhomogènes tirées du catalogue des éléments de construction pour nouveaux bâtiments [7], des calculs comparatifs des trois différentes méthodes ont été effectués. Les constatations suivantes ont pu être tirées de ces analyses.

1. Les éléments des premières couches ont une très grande influence sur la valeur de la capacité thermique surfacique.
2. Les valeurs sont du fait du type de construction « bois » relativement faibles. Dans l'absolu les différences constatées entre la variante 1 et 3 sont minimales.
3. Aucune tendance n'a été remarquée lors de la comparaison des différentes variantes, les résultats s'éparpillent dans toutes les directions.

Du fait des vérifications administratives, il est encore préconisé d'adopter la méthode conservatrice. Ceci en utilisant la variante 3 qui est à ce jour déjà utilisée. Néanmoins la variante 3 appliquée aux cas des constructions en bois n'est pas optimale. D'autant plus chaque watt-heure s'avère précieux afin d'atteindre les exigences. Pour les constructions inhomogènes projetées avec des combinaisons bois/isolation, la méthode 1 permet d'aboutir à un résultat plus précis. Toutefois les constructions inhomogènes en combinaisons avec des éléments métalliques pénétrant l'enveloppe, ne peuvent être calculées sans les méthodes des éléments finis.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	6
1.1.	Ausgangslage	6
1.2.	Zielsetzung	6
1.3.	Vorgehen.....	6
1.4.	Aufbau des Berichts.....	7
2.	Recherchen.....	8
2.1.	Fragestellung	8
2.2.	Internet.....	8
2.3.	Literatursuche	8
2.4.	Umfrage	9
2.5.	Zusammenfassung	9
3.	Berechnungsmethode.....	10
3.1.	Fragestellung	10
3.2.	Ermittlung Handmethode	10
3.2.1.	Arithmetischer Mittelwert der wirksamen Wärmekapazitäten	10
3.2.2.	Arithmetischer Mittelwert der einzelnen Schichtebenen.....	12
3.2.3.	Resultate.....	13
3.3.	Simulationen	17
3.4.	Zusammenfassung	19
4.	Fazit.....	20
5.	Literaturverweise.....	22
A 1.	Brief an Softwareentwickler.....	24
A 2.	Übersicht Konstruktionen	25
A 2.1.	Boden	25
A 2.2.	Aussenwand	26
A 2.3.	Dach	27
A 2.4.	Decken.....	28
A 2.5.	Massive Konstruktionen	28

1. Einleitung

1.1. Ausgangslage

Der Trend zum Kühlen ist vielerorts anzutreffen und macht nach den Bürobauten auch vor den Wohnbauten nicht Halt. Es sind weniger veränderte Komfortbedürfnisse als vielmehr veränderte Bauweisen (mehr Glas, besser gedämmte Gebäude, luftdichtere Gebäude), verändertes Nutzerverhalten (suboptimales Fensterlüften, suboptimale Bedienung des Sonnenschutzes etc.) und das tendenziell wärmere Klima welche das Bedürfnis nach Kühlung im Sommer verstärken. Neben der Behaglichkeit (in alle Gebäudekategorien) steht vor allem in den Büro- und Produktionsräumen auch die Optimierung der Leistungsfähigkeit im Vordergrund.

Der Gesetzgeber hat diese Tendenzen schon früh erkannt und Leitplanken für eine Klimatisierung im Gebäude erstellt. So müssen verschiedene bauliche Massnahmen umgesetzt werden damit eine Kühlung überhaupt in Frage kommt. Mit diesen Leitplanken wird ein schonender Umgang mit der Kühlenergie angestrebt. Eine von vielen vorgegebenen baulichen Massnahmen ist die Wärmespeicherfähigkeit welche einen festgelegten Grenzwert überschreiten muss.

Warum ist die Wärmespeicherfähigkeit in einem Gebäude so wichtig? Es gibt zwei wichtige Gründe: die Leistungsspitze für die Klimaanlage wird gebrochen und die während den Spitzen gespeicherte Wärme kommt zeitversetzt dem Gebäude wieder zu Gute. Der zweite Grund kann vor allem in Frühling und Herbst geltend gemacht werden. Aber auch im Sommer kann so in der Nacht durch freie Kühlung Energie gespart werden.

Wie wird nun die Wärmespeicherfähigkeit beurteilt? Sie wird rechnerisch aus dem Produkt der Bauteilflächen und deren wirksamer Wärmekapazität ermittelt. Liegt eine freie Betondecke vor, muss die Wärmespeicherfähigkeit nicht rechnerisch ausgewiesen werden, Erfahrungen zeigen dass die Wärmespeicherfähigkeit den Anforderungen bei weitem genügt. Bei einer Holzbauweise kann die Beurteilung jedoch nicht ohne Berechnungen vorgenommen werden.

Wo liegt das Problem bei der Berechnung? Es liegt bei der wirksamen Wärmekapazität. Dieser Wert beschreibt wie viel Energie eine Konstruktion unter periodisch schwingenden Bedingungen aufnehmen und zeitversetzt wieder an den Raum zurückgeben kann. Für die Berechnung müssen bekannt sein: der genaue Schichtaufbau einer Konstruktion und von jeder Schicht die Tiefe, die Dichte, der Wärmeleitwiderstand und die spezifische Wärmekapazität. Das genaue Verfahren kann in der Norm SIA 180.073 [3] nachgelesen werden, leider aber nur für homogene Konstruktionen. Die inhomogenen Konstruktionen, welche im Holzbau immer anzutreffen sind, werden nicht beschrieben. Doch genau dort ist eine genaue Handhabung anzustreben, bewegen sich die Holzbauten doch immer nahe am Grenzwert.

1.2. Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist, eine einfache Methode für die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität inhomogener Konstruktionen zu entwickeln. Diese soll den Programmherstellern zur Verfügung gestellt werden, damit von allen eine einheitliche Methodik verwendet wird.

Eine Anleitung für Planende ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Auch werden keine weiterführenden bauphysikalischen Betrachtungen der wirksamen Wärmekapazität angestellt.

1.3. Vorgehen

Zu Beginn der Arbeit werden Recherchen durchgeführt. Unter Umständen wird die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität in anderen Normen, Richtlinien oder Forschungsarbeiten schon beschrieben. Je nach gefundenen Unterlagen können erste

Aussagen erstellt und anhand von verschiedenen inhomogenen Konstruktionen verifiziert werden. Die gewählten Konstruktionen stammen aus dem Bauteilkatalog für Neubauten [7]. Die Recherche beschränkt sich nicht nur auf Literatur, es werden auch Fachleute die sich mit diesem Thema auseinander setzen befragt.

Aufgrund der durchgeführten Berechnungen wird eine Methode gewählt welche für die wirksame Wärmekapazität inhomogener Konstruktionen zum Tragen kommt.

1.4. Aufbau des Berichts

Der Bericht gliedert sich nach den gewählten Arbeitsschritten. In Kapitel 2 wird die Recherche behandelt, in Kapitel 3 sind die Berechnungsmethoden und die Simulationsergebnisse aufgeführt. In Kapitel 4 wird ein Fazit gezogen.

Vom Leser werden Kenntnisse der Normen SIA 180.071 [2] und 180.073 [3] vorausgesetzt. Der Bericht richtet sich vor allem an Softwarefirmen und Vereine welche Lösungsvorschläge für den sommerlichen Wärmeschutz erarbeiten (z.B. Minergie).

2. Recherchen

2.1. Fragestellung

Gibt es bereits andernorts Methoden, welche die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität von inhomogenen Konstruktionen beschreiben?

Dieser Frage wird anhand von Internet- und Literaturrecherchen nachgegangen. Zusätzlich werden gezielt Softwarehersteller und Fachleute angefragt, welche mit dieser Thematik in Berührung stehen.

2.2. Internetrecherchen

Die Suche im Internet hat eine Fülle von Arbeiten gezeigt. Die Auswertung der gefundenen Arbeiten zeigt aber eine unpräzise Handhabung der Begriffe. In vielen Arbeiten wird die wirksame Wärmekapazität mit der spezifischen Wärmespeicherfähigkeit gleich gesetzt. Zwischen diesen beiden Begriffen bestehen jedoch Unterschiede. Weiter weisen einige Links auf das vereinfachte Berechnungsverfahren hin. Dieses wird in der Norm SIA 180.073 [3] im Anhang A beschrieben. Da diese Methode für diesen Bericht nicht relevant ist, wurden auch die dazu gefundenen Arbeiten nicht weiter betrachtet.

Auf der Webseite „Verein Österreichischer Ziegelwerke“ (www.ziegel.at) ist unter der Rubrik „Literatur / Forschungsberichte“ ein Bericht von Ao. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Klaus Krec aufgeführt. In der Beschreibung des Forschungsberichts mit dem Titel „Produktdeklaration für Hochlochziegel, November 2007“ steht:

„In dieser Forschungsarbeit wird für den Spezialfall von Mauerwerk aus Hochlochziegeln die Problematik der Wärmespeicherfähigkeit von inhomogen aufgebauten Wänden eingehend behandelt und ein Weg gesucht, das thermische Verhalten (stationär, instationär) solcher Wände mittels thermisch eindimensionaler Ersatzmodelle möglichst gut zu beschreiben. Da die verwendeten Methoden auf der Wärmeleitungsgleichung und damit auf einer gut abgesicherten, allgemein gültigen Grundlage der bauphysikalischen Wärmelehre basieren, sind die Ergebnisse dieser Arbeit nicht nur auf Hochlochziegelmauerwerk sondern auch auf beliebige andere inhomogene Wandaufbauten anwendbar.“

Leider konnten zu dieser Arbeit keine weiteren Informationen gefunden werden. Verschiedene Versuche den Bericht zu beziehen blieben bis jetzt unbeantwortet.

2.3. Literaturrecherchen

Die Norm SIA 180.073 [3] behandelt ausschliesslich die Berechnung homogener Bauteile. Die Methode basiert auf eine periodische Schwingung und ist auch unter dem Namen Heindlmatrizen bekannt. Die Suche in der Bibliotheksdatenbank der Hochschule Luzern und der ETH Zürich ergab eine geringe Zahl an vorhandener Literatur. Nach einer Prüfung der Recherche-Ergebnisse blieben zwei Publikationen übrig:

1. Bericht aus der Bauforschung, Heft 99, Ein Verfahren zur Ermittlung des wärmetechnischen Verhaltens ganzer Gebäude unter periodisch wechselnder Wärmeeinwirkung, Fr. Haferland, W. Heindle, H. Fuchs, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Ausgabe 1975
2. element 29, Wärmeschutz und Energie im Hochbau, Ralph Sagelsdorff, Thomas Frank, Schweizerische Ziegelindustrie, 1. Auflage 1990.

Leider sind in diesen und weiteren Publikationen keine Hinweise auf inhomogene Bauteile zu finden.

2.4. Umfrage

Für die Umfrage wurden Fachleuten angeschrieben welche sich aus verschiedenen Gründen mit dem Berechnungsverfahren auseinandersetzen (Brief siehe Anhang A1). Aus den erhaltenen Rückmeldungen können drei Methoden abgeleitet werden welche heute eingesetzt werden. Es sind dies:

1. Konstruktion als Zusammensetzung aus Elementen unterschiedlicher Schichtstruktur, flächenanteilig zu verrechnen.
2. Ersatz durch eine virtuelle Schicht mit Materialkonstruktionen entsprechend dem arithmetischen Mittel der verwendeten Materialteile.
3. Berücksichtigung nur der flächenmässig dominierenden gedämmten Teile unter Vernachlässigung des Einflusses der Tragstruktur.

Die Methoden werden im Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben.

2.5. Zusammenfassung

Die dürftigen Resultate der Recherchen zeigen auf, dass die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität ein bisher wenig behandeltes, da komplexes Gebiet ist. Nur wenige Fachspezialisten setzen sich mit der Thematik vertieft auseinander. Für die Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes ist die wirksame Wärmekapazität aber ein wichtiger Bestandteil welcher in Zukunft auch von den Behörden vermehrt verlangt wird. Das Wissen zu dieser Thematik zu vergrössern und zu kommunizieren ist unbedingt anzustreben.

Dennoch konnten unterschiedliche Methoden gefunden werden. Sie sind sehr einfach aufgebaut und könnten ohne weiteres in bestehende Berechnungsprogramme integriert werden.

3. Berechnungsmethode

3.1. Fragestellung

Kann die wirksame Wärmekapazität einer inhomogenen Konstruktion auf einfache Art und Weise ermittelt werden? In diesem Abschnitt wird dieser Frage nachgegangen. Ziel ist die Ermittlung einer einfachen Berechnungsmethode basierend auf der Heindlmatrize. Als Grundlage dienen die recherchierten Ergebnisse aus dem Kapitel 2. Für den sommerlichen Wärmeschutz wird die Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit unter Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände R_{se} und R_{si} und einer Periodendauer von 24 h berechnet. In Normen wie der SIA 380/1 [4], der SIA 384.201 [6] oder der neuen SIA 382/2 [8] wird die wirksame Wärmekapazität ohne Wärmeübergangswiderstände berücksichtigt. Nachfolgend sind deshalb die Resultate mit und ohne R_{se} / R_{si} angegeben. Zuerst wird aber die wirksame Wärmekapazität beschrieben.

3.2. Ermittlung Handmethode

Wie im Kapitel 2.4 beschrieben ergab die Recherche folgende Varianten:

1. Konstruktion als Zusammensetzung aus Elementen unterschiedlicher Schichtstruktur, flächenanteilig zu verrechnen (arithmetischer Mittelwert der wirksamen Wärmekapazitäten).
2. Ersatz durch eine virtuelle Schicht mit Materialkonstruktionen entsprechend dem arithmetischen Mittel der verwendeten Materialteile (arithmetischer Mittelwert der einzelnen Schichtebenen).
3. Berücksichtigung nur der flächenmässig dominierenden gedämmten Teile unter Vernachlässigung des Einflusses der Tragstruktur.

Nachfolgend werden die Varianten 1 und 2 beschreiben und anhand von Beispielen untermauert. Aufgrund bisheriger Erfahrungen ist die wirksame Wärmekapazität des tragenden Teils (nachfolgend immer mit Teilkonstruktion A bezeichnet) grösser als die wirksame Wärmekapazität des dämmenden Teils (nachfolgend immer mit Teilkonstruktion B bezeichnet). Die Vermutung liegt nahe, dass die Resultate der Variante 1 und 2 zwischen den wirksamen Wärmekapazitäten der Teilkonstruktionen A und B liegen müssen.

Als Basis für Vergleiche der Varianten 1, 2 und 3 dient immer die Variante 3 = 100%. In den Tabellen werden nur die Abweichungen angegeben.

3.2.1. Arithmetischer Mittelwert der wirksamen Wärmekapazitäten

Bei dieser Methode wird die inhomogene Konstruktion in seine homogenen Teilkomponenten A und B zerlegt und für jede Teilkomponente wird die wirksame Wärmekapazität auf der Konstruktions-Innenseite χ_1 und Konstruktions-Aussenseite χ_2 gerechnet.

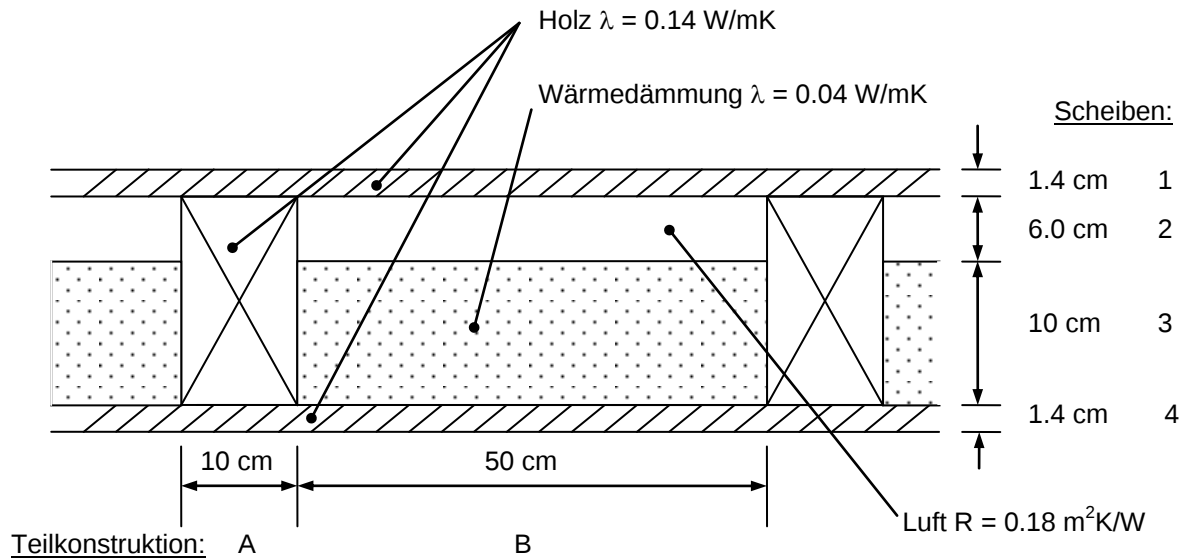
$$\chi = \frac{\sum_{n=1}^n \chi_n \cdot f_n}{\sum_{n=1}^n f_n} \quad \text{Formel 1}$$

Darin bedeutet:

χ	wirksame Wärmekapazität (mit $\chi = \chi_1$ wird die innere, mit $\chi = \chi_2$ die äussere Wärmekapazität gerechnet)	Wh/(m ² K)
F	Anteil am Bauteil; kann Fläche, Breite oder Prozent sein. In der vorliegenden Arbeit wird Breite in m eingesetzt.	m ² / m / %
n	Die n-te Teilkonstruktion. Grundsätzlich ist die Anzahl offen, im Regelfall sind es zwei Teilkonstruktionen.	

Anhand eines einfachen Beispiels wird die Berechnung erläutert. R_{se} und R_{si} sind je auf $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ gesetzt. Die Angabe der Scheiben wird bei der Variante 2 benötigt.

Abb. 1: Beispielkonstruktion um die Berechnungsmethoden numerisch zu beschreiben.



Um die wirksame Wärmekapazität zu berechnen, sind neben der Schichtdicke und der Wärmeleitfähigkeit (λ) auch die spezifische Wärmekapazität (c_p) und die Rohdichte (ρ) erforderlich. Die nachfolgende Tabelle ergänzt die fehlenden Stoffdaten. Das λ der Luft wird aus der Dicke und dem Wärmedurchgangswiderstand berechnet. Diese Angaben werden bei der Variante 2 verwendet.

Tab. 1: Stoffdaten für die Beispielkonstruktion. Quellen: SIA 380.101 [5] und Merkblatt 2001 [10]

	λ	ρ	c_p
	W/mK	kg/m ³	kJ/kgK
Nutzholz	0.130	500	1.6
Dämmung	0.036	32	1.03
Luft, 60mm horizontal	0.333	1.15	1.006

Mit Hilfe des Exceltools SIA 382 [9] wird aus diesen Angaben die wirksame Wärmekapazität gerechnet und in Tab. 2 übertragen. Aufgrund der kleinen Zahlen werden hier zwei Stellen nach dem Komma angegeben.

Tab. 2: Resultate der Teilkonstruktionen A und B. Die Werte B entsprechen der Variante 3.

Abschnitt		χ_1 Wh/m ² K	χ_2 Wh/m ² K
Teilkonstruktion A mit Holz	$R_{se} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$	9.34	9.34
Teilkonstruktion B mit Luft, Dämmung		3.52	3.52
Teilkonstruktion A mit Holz	ohne R_{se} / R_{si}	12.3	12.3
Teilkonstruktion B mit Luft, Dämmung		3.56	3.56

Die Ergebnisse zeigen eine geringe Differenz zwischen den Werten mit und ohne Wärmeübergangswiderstände. Die Ursache ist bei den tiefen Werten zu suchen. Zum Vergleich: bei einer 20 cm tiefen Betonwand liegen die wirksamen Wärmekapazitäten bei 62.2 Wh/m²K (ohne Wärmeübergangswiderstände) und 23.9 Wh/m²K (mit Wärmeübergangswiderstände). Im Weiteren wird die spezifische Wärmekapazität beim Hohlraum vernachlässigt, daher sind χ_1 und χ_2 gleich gross. Mit der Formel 1 wird nun die wirksame Wärmekapazität der Konstruktion gerechnet.

Tab. 3: Resultate der Variante 1 für die Beispielkonstruktion aus Abb. 1

	ohne R_{se} / R_{si}	$R_{se} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
wirksame Wärmekapazität innen	5.02 Wh/m ² K	4.49 Wh/m ² K
wirksame Wärmekapazität aussen	5.02 Wh/m ² K	4.49 Wh/m ² K

Die wirksame Wärmekapazität auf der Innenseite χ_1 unter Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände ergibt für die Teilkonstruktion B den Wert von 3.52 Wh/m²K. Aus Tab. 3 kann der Wert für die Variante 1 von 4.49 Wh/m²K abgelesen werden, somit liegt dieser 28 % höher als der Wert der Teilkonstruktion B.

Neben den Werten mit R_{se} / R_{si} sind in der Tab. 3 auch die Werte ohne Wärmeübergangswiderstand zu finden. Auffallend sind die kleinen Unterschiede welche bei leichten Konstruktionen generell beobachtet werden können.

3.2.2. Arithmetischer Mittelwert der einzelnen Schichtebenen

Bei dieser Methode wird das arithmetische Mittel der Stoffdaten berechnet. Daraus ergibt sich eine neue, fiktive Konstruktion nach dem Prinzip des unteren Wärmedurchgangswiderstands nach SIA 180.071 [2], Kapitel 6.2.4. Problematisch bei dieser Betrachtung ist die Luftschicht. Bei der Berechnung der wirksamen Wärmekapazität wird die Wärmespeicherefähigkeit ebener Hohlräume vernachlässigt. Damit der arithmetische Mittelwert trotzdem gebildet werden kann, wird die Luftschicht mit den Stoffwerten nach Tab. 1 berücksichtigt.

Das Zahlenbeispiel in den Formeln 2 bis 4 zeigt das arithmetische Mittel zwischen Balken und Dämmung wie in Fig. 1 dargestellt. Die Stoffwerte sind in Tab. 1 aufgelistet.

$$\lambda_j = \frac{\sum_{n=1}^{n-1} \lambda_n \cdot f_n}{\sum_n f_n} = \frac{0.13 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 0.1\text{m} + 0.036 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot 0.5\text{m}}{0.1\text{m} + 0.5\text{m}} = 0.052 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad \text{Formel 2}$$

$$\rho_j = \frac{\sum_{n=1}^{n-1} \rho_n \cdot f_n}{\sum_n f_n} = \frac{500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.1\text{m} + 32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0.5\text{m}}{0.1\text{m} + 0.5\text{m}} = 110 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Formel 3}$$

$$C_{p,j} = \frac{\sum_{n=1}^{n-1} c_{p,n} \cdot f_n}{\sum_n f_n} = \frac{1.6 \frac{kJ}{kgK} \cdot 0.1m + 1.03 \frac{kJ}{kgK} \cdot 0.5m}{0.1m + 0.5m} = 1.125 \frac{kJ}{kgK}$$

Formel 4

Darin bedeuten:

λ	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit	W/(mK)
ρ	Rohdichte	kg/m ³
c_p	Spezifische Wärmekapazität	kJ/kgK
F	Anteil am Bauteil; kann Fläche, Länge oder Prozent sein.	m ² / m / %
N	fortlaufende Nummer der Scheiben	

Die gemittelten Werte der fiktiven Konstruktion sind in Tab. 4 aufgelistet. Sie bilden die Grundlage für die Resultate der Tab. 5

Tab. 4: Werte der fiktiven Konstruktion für die Variante 2

Scheiben (siehe Abb.)	λ	ρ	c_p
	W/mK	kg/m ³	Wh/kgK
1 (nur Holz)	0.130	500	0.444
2 (Holz / Luft)	0.299	84.3	0.307
3 (Holz / Dämmung)	0.0517	110	0.313
4 (nur Holz)	0.130	500	0.444

Die wirksamen Wärmekapazitäten für die Variante 2 sind in Tab. 5 zu finden.

Tab. 5: Resultate der Variante 2 für die Beispielkonstruktion aus Abb. 1

	ohne R_{se} / R_{si}	$R_{se} = 0.13m^2K/W$ $R_{si} = 0.13m^2K/W$
wirksame Wärmekapazität innen	5.93 Wh/m ² K	5.62 Wh/m ² K
wirksame Wärmekapazität aussen	4.98 Wh/m ² K	4.82 Wh/m ² K

Wie schon bei der Variante 1 sind auch hier nur geringe Unterschiede zwischen der Berechnung mit und ohne R_{se} / R_{si} auszumachen. Die wirksame Wärmekapazität auf der Innenseite der Teilkonstruktion B (mit R_{si}) beträgt 3.52 Wh/m²K. Das Resultat der Variante 2 (5.62 Wh/m²K) weicht um 60 % von diesem ab.

3.2.3. Resultate

Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Resultate aus den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 analysiert. Die wirksamen Wärmekapazitäten sind in Tab. 6 zusammengestellt, dabei entspricht die Variante 3 der Teilkonstruktion B. Angegeben werden hier nur die Werte welche unter Berücksichtigung des Wärmeübergangswiderstands auf der Innenseite auftreten. Im zweiten Teil sind weitere Resultate aufgeführt.

Tab. 6: Die wirksame Wärmekapazität auf der Innenseite für das Beispiel aus Abb. 1.

Teilkonstruktion		Variante		Abweichung	
A	B	1	2	1/B	2/B
Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	%	%
9.34	3.52	4.49	5.62	28	60

Die Abweichungen bei der wirksamen Wärmekapazität liegen, ausgehend von Variante 3 mit 3.52 Wh/m²K = 100%, bei der Variante 1 bei 28 % und für die Variante 2 bei 60 %. In diesem Beispiel liegt die Variante 2 somit 32% über der Variante 1. Zweifel, ob die Resultate überhaupt vergleichbar sind, sind berechtigt: In der Variante 2 wurde die Luftschicht in Abweichung zur Norm 180.073 [3] berücksichtigt. Um die Zweifel auszuräumen wird deshalb die Variante 1 ebenfalls unter Berücksichtigung der Luftschicht berechnet. Diese Überprüfung zeigt, dass die Abweichungen aber vernachlässigbar klein sind. Somit ist – für leichte Konstruktionen – der Vergleich durchaus statthaft.

Die Ergebnisse weiterer Konstruktionen sind in Tab. 7 aufgelistet. Die Konstruktionen sind im Anhang 2 aufgeführt, bis auf M 1 und M 2 stammen alle aus dem Bauteilkatalog für Neubauten [7] und stellen Konstruktionen für den Holzbau dar. Die Breitenverhältnisse liegen im Bereich der Beispielkonstruktion.

Tab. 7: Resultatzusammenstellung verschiedener Konstruktionen. Aufgelistet sind die Resultate mit Wärmeübergangswiderstand für die Innenseite.

Konstruktion	Teilkonstruktion		Variante		Abweichung	
	A	B	1	2	1/B	2/B
	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	%	%
Bi 2	9.67	6.86	7.40	7.92	8	15
Bi 3	6.38	7.02	6.90	7.03	-2	-0
Bi 4	6.39	7.05	6.90	6.95	-2	-1
Bi 5	9.11	7.02	7.42	7.78	6	11
Bi 6	9.07	7.05	7.44	7.73	6	10
Wi 1	8.73	3.75	4.43	5.12	18	37
Wi 2	7.50	3.92	4.42	4.40	13	12
Wi 3	7.42	4.02	4.47	4.32	11	7
Di 1	8.70	3.72	4.40	5.11	18	37
Di 2	7.37	3.85	4.34	4.61	13	20
Di 3	7.34	3.95	4.42	4.3	12	9
Di 4	9.37	3.79	4.56	4.69	20	25
Di 8	8.48	3.92	4.55	5.22	16	33
Di 9	8.26	3.99	4.58	5.15	15	29
Di10	8.23	4.03	4.61	5.06	14	26
M 1	21.06	14.04	15.21	15.43	8	10
M 2	23.01	16.01	17.17	18.32	7	14

Die Konstruktionen Bi sind Bodenaufbauten, Wi entsprechen einer Aussenwand, Di ist die Abkürzung für Dachkonstruktionen. Es sind alles inhomogene Holzkonstruktionen. Die wirksame Wärmekapazität des Bodens liegt zwischen 7.34 Wh/m²K und 7.44 Wh/m²K (Variante 1), die restlichen Holzkonstruktionen liegen zwischen 4.34 Wh/m²K und 4.61 Wh/m²K. Die kleinen Differenzen sind auf die gewählten Oberflächenmaterialien zurückzuführen. Der begehbare Boden ist mit einer schweren Spanplatte ausgebildet, bei den restlichen Konstruktionen kommt Naturholz (Täfer usw.) zum Einsatz.

Bei M 1 und M 2 handelt es sich um massive Konstruktionen mit Beton, Innenputz und Mauerwerk. Mit 15.21 Wh/m²K respektive 17.17 Wh/m²K liegt die wirksame Wärmekapazität deutlich höher als bei den leichten Holzkonstruktionen.

Betrachtet man die Abweichungen in der Tab. 7 kann keine klare Aussage gemacht werden. Tendenziell liegen die Werte der Variante 2 über den Werten der Variante 1. Auffallend sind die Werte der Konstruktionen Bi 3 und Bi 4. Hier liegt die wirksame Wärmekapazität der dämmenden Teilkonstruktion B über der Teilkonstruktion A. Dieser Sachverhalt kann auf den speziellen Aufbau zurück geführt werden. Die ersten 8.4 cm sind homogen aufgebaut daher liegen die Resultate der Teilkonstruktionen A und B nahe zusammen.

Wie eingangs erwähnt dienen die wirksamen Wärmekapazitäten mit Berücksichtigung des Wärmeübergangswiderstands für die Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes. Für andere Berechnungen wird aber die wirksame Wärmekapazität ohne Wärmeübergangswiderstand verwendet. Die Werte sind in Tab. 8 aufgeführt.

Tab. 8: Resultatzusammenstellung verschiedener Konstruktionen. Aufgelistet sind die Resultate ohne Wärmeübergangswiderstand für die Innenseite.

Konstr.	Teilkonstruktion		Variante		Abweichung	
	A	B	1	2	1/B	2/B
	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	%	%
Bi 2	12.85	7.33	8.4	8.87	15	21
Bi 3	7.12	7.53	7.45	7.75	-1	3
Bi 4	7.04	7.58	7.48	7.62	-1	1
Bi 5	11.87	7.53	8.37	8.83	11	17
Bi 6	11.82	7.58	8.40	8.78	11	16
Wi 1	11.37	3.82	4.86	5.43	27	42
Wi 2	8.51	4.02	4.64	4.58	15	14
Wi 3	8.25	4.14	4.71	4.54	14	10
Di 1	11.34	3.85	4.88	5.46	27	42
Di 2	8.60	3.99	4.62	4.89	16	23
Di 3	8.37	4.09	4.68	4.55	14	11
Di 4	11.88	3.88	4.98	4.88	28	26
Di 8	11.03	3.96	4.94	5.58	25	41
Di 9	10.6	4.07	4.97	5.55	22	36
Di10	10.53	4.14	5.03	5.47	21	32
M 1	36.18	17.48	20.59	19.86	18	14
M 2	62.19	25.87	31.93	32.45	23	25

Die Aussagen zu Tab. 7 können auch für die Tab. 8 angewendet werden. Speziell auch hier die Konstruktionen Bi 3 und Bi 4. Die Berechnung nach Variante 2 liefert Werte die höher liegen als die Werte der Teilkonstruktionen A und B. Die Abweichungen sind aber sehr gering und können auf das Berechnungsmodell zurückgeführt werden. Bei den verschiedenen Zwischenresultaten liegen Rundungsabweichungen vor.

In einer weiteren Untersuchung werden die Breiten-Verhältnisse der Teilkonstruktionen A und B variiert. Dabei werden folgende Werte eingesetzt:

1. A = 6 cm, B = 40 cm (A = 13 %, B = 87 %)
2. A = 10 cm, B = 40 cm (A = 20 %, B = 80 %)
3. A = 14 cm, B = 40 cm (A = 26 %, B = 74 %)
4. A = 6 cm, B = 50 cm (A = 11 %, B = 89 %)
5. A = 10 cm, B = 50 cm (A = 17 %, B = 83 %)
6. A = 14 cm, B = 50 cm (A = 22 %, B = 78 %)
7. A = 6 cm, B = 60 cm (A = 9 %, B = 91 %)
8. A = 10 cm, B = 60 cm (A = 14 %, B = 86 %)
9. A = 14 cm, B = 60 cm (A = 19 %, B = 81 %)

Für die Berechnungen werden die Konstruktionen Bi 5, Wi 3 und Di 8 verwendet. Die Wärmeübergangswiderstände werden mit $0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ berücksichtigt.

Tab. 9: Variation der Breitenverhältnisse. Dargestellt sind die wirksamen Wärmekapazitäten mit Wärmeübergangswiderstand der Innenseite.

Konstr.	Teilkonstruktion		Variante		Abweichung	
	A	B	1	2	1/B	2/B
	cm	cm	Wh/m ² K	Wh/m ² K	%	%
Bi 5	6	40	7.29	7.62	4	9
	10	40	7.44	7.79	6	11
	14	40	7.56	7.91	8	13
	6	50	7.24	7.55	3	8
	10	50	7.37	7.72	5	10
	14	50	7.48	7.83	7	12
	6	60	7.21	7.49	3	7
	10	60	7.32	7.66	4	9
	14	60	7.42	7.77	6	11
Wi 3	6	40	4.44	4.3	10	7
	10	40	4.67	4.46	16	11
	14	40	4.87	4.61	21	15
	6	50	4.37	4.25	9	6
	10	50	4.56	4.38	13	9
	14	50	4.74	4.5	18	12
	6	60	4.31	4.22	7	5
	10	60	4.48	4.33	11	8
	14	60	4.64	4.43	15	10

Konstr.	Teilkonstruktion		Variante		Abweichung	
	A	B	1	2	1/B	2/B
	cm	cm	Wh/m ² K	Wh/m ² K	%	%
Di 8	6	40	4.51	5.16	15	32
	10	40	4.81	5.67	23	45
	14	40	5.1	6.04	30	54
	6	50	4.41	4.97	13	27
	10	50	4.68	5.44	19	39
	14	50	4.92	5.8	26	48
	6	60	4.33	4.83	10	23
	10	60	4.57	5.26	17	34
	14	60	4.78	5.6	22	43

Die Breitenverhältnisse wirken sich direkt auf das arithmetische Mittel aus. Vermutet wird, dass die Änderung sehr gleichmässig erfolgt. Die Resultate der Tab. 9 bestätigen diese Vermutung. So steigt der Wert bei Wi 3, Variante 2 und B = 50 cm um jeweils 3% an (von A = 6 cm mit 9 % auf 12 % und 15%).

3.3. Simulationen

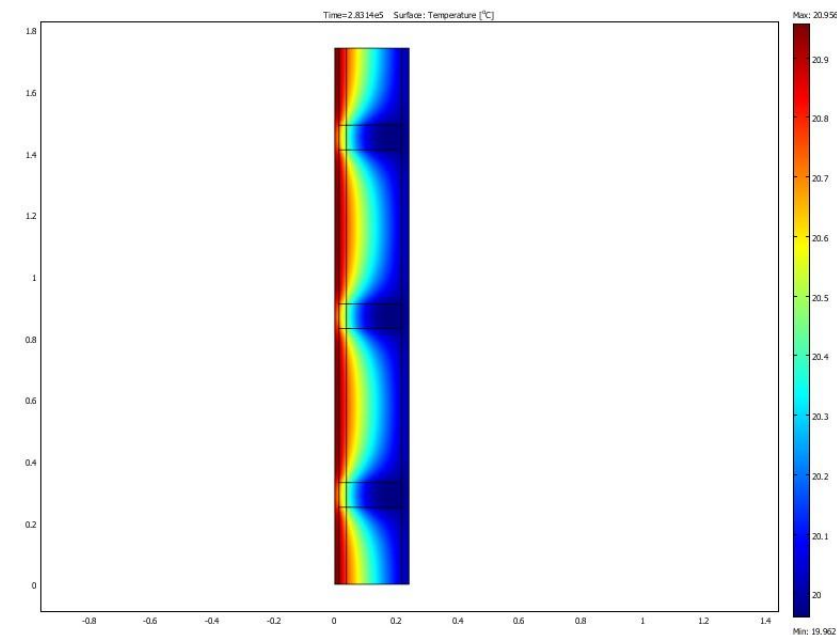
Die wirksame Wärmekapazität kann nicht direkt aus der Simulation gelesen werden. Es ist ein Umweg über den Wärmestrom und die Oberflächentemperaturen notwendig und erfolgt gemäss

$$\chi_m = \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \left| \frac{\hat{q}_m}{\hat{\Theta}_m} \right|$$

Formel 5

Darin ist T die betrachtete Zeit, Θ die komplexwertige Amplitude der Temperatur und q der Wärmestrom. Die nachfolgenden Berechnungen wurden mit dem Simulationsprogramm COMSOL durchgeführt. Für die Berechnung wurden die Rahmenbedingungen aus der SIA 180.073 [3] übernommen.

Abb. 2: Temperaturverteilung in der Konstruktion Bi5 bei max. Temperatur an der Wandoberfläche



In der nachfolgenden Tabelle sind die Resultate der Konstruktionen Bi5, Wi3 und Di8 aufgeführt. Ebenfalls wurde das Beispiel A aus der SIA 180.073 [3] nachgerechnet. Hierbei handelt es sich um eine 20 cm dicke, homogene Konstruktion.

Tab. 10: Wirksame Wärmekapazität auf der Innenseite unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs.

Bauteil	Simulation	Heindlmatrizen		
		Variante 1	Variante 2	Variante 3
	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K	Wh/m ² K
Betonwand	20.4	22.9	22.9	22.9
Bi5	13.6	7.42	7.78	7.02
Wi3	7.5	4.47	4.32	4.02
Di8	7.52	4.55	5.22	3.92

Die Resultate der Simulation weichen sehr stark von den berechneten Werten der Varianten 1, 2 und 3 ab. Welche Resultate sind nun richtig? Aus den Recherchen können keine Hinweise abgeleitet werden und auch in der Norm SIA 180.073 [3] sind keine klaren Aussagen zu finden. Leider ist es im Rahmen dieser Studie nicht möglich, die Heindlmatrize anhand einer Simulation zu verifizieren. Daher wird die Simulation nicht weiter verfolgt.

3.4. Zusammenfassung

Aus den Recherchen konnten drei Varianten abgeleitet werden. Erfreulicherweise wird die wirksame Wärmekapazität bei allen Varianten nach der Norm SIA 180.073 [3] gerechnet.

Bei den Varianten 1 und 2 kommt ein arithmetisches Mittel zur Anwendung. Auf den ersten Blick liegt die Vermutung nahe, dass die Varianten das gleiche Resultat liefern. Die Berechnungen zeigen aber ein differenzierteres Bild. Die Abweichungen gehen in alle Richtungen, in einigen Fällen liegt das Resultat der Variante 2 höher, in anderen Fällen überwiegt die Variante 1 und eine Übereinstimmung der Resultate kommt vor. Diese breite Streuung kann einerseits auf die Berechnungsmethode aus der Norm 180.073 [3] zurückgeführt werden. Die Heindlmatrize stellt eine rechenintensive Methode dar mit vielen Berechnungsschritten. Die Rundungsfehler sind dadurch gross. Andererseits steht die tiefe wirksame Wärmekapazitäten der Holzkonstruktion bei welcher eine genauere Berechnung angebracht ist. Bei einer homogenen, 20 cm dicken Betonwand ($R_{si} = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$) mit $\chi_1 = 64.1 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ liegt diese im Vergleich mit der wirksamen Wärmekapazität der inhomogenen Aussenwand Wi 2 mit $\chi_1 = 4.6 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ um den Faktor 13.5 höher! Wird der Wärmeübergangswiderstand mit $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$ berücksichtigt, sinkt bei der Betonwand die wirksame Wärmekapazität markant auf $\chi_1 = 24.6 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ ab. Bei Wi 2 ist der Unterschied weit geringer, der Wert sinkt lediglich auf $\chi_1 = 4.4 \text{ Wh/m}^2\text{K}$. Trotz allem liegt auch hier χ_1 der Betonwand um den Faktor 6 höher. In der Norm werden zudem die Resultate auf ganze Zahlen gerundet. Bei den Holzkonstruktionen ist damit der Rundungsfehler weit grösser als die Differenzen der Varianten 1 und 2.

Die Variante 3 besticht durch ihre Schlichtheit. Für die Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils oder Raumes wird nur die wirksame Wärmekapazität der dämmenden Teilkonstruktion (B) verwendet. Das Resultat liegt so auf der konservativen Seite.

Bei der Variante 2 werden die Stoffdaten der Schichten arithmetisch gemittelt und fliessen so in die Berechnung der wirksamen Wärmekapazität ein. Gemittelt werden die spezifische Wärmekapazität, die Rohdichte und die Wärmeleitfähigkeit. Für eingeschlossene Luftschichten werden die Stoffwerte $\rho = 1.15 \text{ kg/m}^3$ und $c_p = 0.279 \text{ Wh/kgK}$ berücksichtigt. Bei der Variante 1 wird bei einer geschlossenen Luftschicht nur der Wärmedurchgangswiderstand berücksichtigt da laut Norm SIA 380.073 [3] die spezifische Wärmekapazität bei geschlossenen Luftschichten vernachlässigt wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass in beiden Fällen in etwa das gleiche Resultat resultiert. Der direkte Vergleich der Variante 2 mit den Varianten 1 und 3 ist somit statthaft.

In dieser Arbeit werden Unterzüge, wie sie bei der Konstruktion Di 4 vorkommen, nicht behandelt und wurden vernachlässigt. Diese müssten in einer weiterführenden Arbeit miteinbezogen werden. Solche Unterzüge können die Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils entscheidend beeinflussen.

4. Fazit

Die Recherche (Internet, Literatur) ergab relativ wenig konkrete Erkenntnisse. Zudem zeigte sich, dass der Begriff „Wärmekapazität“ sehr vielfältig ausgelegt wird.

Weiter kann die wirksame Wärmekapazität auch mit einem einfachen Ansatz gemäss Norm SIA 180.073 [3] Anhang A berechnet werden. Dieser Ansatz wird von den SIA Normen 380/1 [4], 382/1 [1] und 384.201 [6] jedoch nicht unterstützt. Daher wurden auch diese Quellen von der Liste gestrichen. Übrig blieb am Schluss noch eine von der Österreichischen Ziegelindustrie unterstützte Forschungsarbeit. Leider konnte bis zur Verfassung des vorliegenden Schlussberichtes trotz Unterstützung durch die Schweizerische Ziegelindustrie diese Forschungsarbeit nicht erworben werden. Somit ist die Recherche ergebnislos. Ein anderer Lösungsansatz basiert auf den Erfahrungen von Fachleuten oder auf eigenen Erfahrungen im Rahmen der Minergie-P-Zertifizierung. So konnten die folgenden drei Varianten definiert werden:

4. Konstruktion als Zusammensetzung aus Elementen unterschiedlicher Schichtstruktur, flächenanteilig zu verrechnen.
5. Ersatz durch eine virtuelle Schicht mit Materialkonstruktionen entsprechend dem arithmetischen Mittel der verwendeten Materialteile.
6. Berücksichtigung nur der flächenmässig dominierenden gedämmten Teile unter Vernachlässigung des Einflusses der Tragstruktur.

Nachfolgend sind die Vor- und Nachteile der Varianten aufgelistet. Vergleiche unter den Konstruktionen können nicht angestellt werden. Das heisst, die Resultate der Konstruktion Wi 1 sind mit den Resultaten von Wi 2 nicht vergleichbar.

- Variante 1: Die wirksamen Wärmekapazitäten der dämmenden Teilkonstruktion A und der tragenden Teilkonstruktion B werden unabhängig berechnet. Anhand der Flächenverhältnisse der beiden Teilkonstruktionen wird der arithmetische Mittelwert gebildet. Für die Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils wird der Mittelwert mit der Fläche multipliziert. Mathematisch gesehen könnte auch die wirksame Wärmekapazität der Teilkonstruktion A mit deren Fläche und die wirksame Wärmekapazität der Teilkonstruktion B mit deren Fläche multipliziert werden. Die Summe ergibt so das gleiche Resultat. In der Praxis liegen in den seltensten Fällen die Flächen der Teilkonstruktionen vor. Der Mittelwert der wirksamen Wärmekapazität ist der einfachere Weg. Der Vorteil dieser Variante liegt in der einfachen Handhabung, wobei der Ansatz nicht auf zwei Teilkonstruktionen beschränkt ist. Wird der physikalische Hintergrund dieser Variante durchleuchtet werden schnell auch ihre Einsatzgrenzen ersichtlich. Mit dem Verfahren werden allfällige Quereinflüsse vernachlässigt was bei Holzkonstruktionen in Kombination mit einem Dämmmaterial statthaft ist. Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien ist gering. Werden aber metallische Durchdringungen wie Anker, Bleche etc. eingesetzt, können die Quereinflüsse nicht vernachlässigt werden. Eine genauere Berechnung anhand finiter Methoden ist unausweichlich.
- Variante 2: Auf den ersten Blick erscheint diese Variante eine gangbare Lösung dar zu stellen. Wird aber auch hier der physikalische Hintergrund diskutiert so ist diese Variante falsch – sie kann keine sinnvollen Resultate liefern. Laut Prof. emer. Dr. Bruno Keller ist der Grund im Berechnungsverfahren der SIA 180.073[3] zu finden. Die dynamische Wärmeausbreitung in den Materialien folgt nicht linearen Zusammenhängen. Daraus folgt, dass die Ersatzkonstruktion gebildet aus den arithmetischen Mittelwerten der Konstruktionen A und B keinen Sinn macht.
- Variante 3: Für die Berechnung der Wärmespeicherfähigkeit wird die tragende Teilkonstruktion vernachlässigt. Mit diesem Vorgehen ist man, unabhängig vom Flächenverhältnis, auf der konservativen Seite. Positiv an der Variante ist die Schlichtheit. Bei einem Nachweis bewegen sich Holzbauten meist sehr knapp

über oder unter den Anforderungen. Bei diesen Konstruktionen können schnell einmal einige wenige Wattstunden ausschlaggebend sein. Aus der Variante 1 resultiert eine höhere wirksame Wärmekapazität als mit der Variante 3. In wenigen Fällen liefern die Varianten gleiche Resultate.

Solange keine metallischen Durchdringungen vorliegen, kann im Holzbau die Variante 1 für inhomogene Konstruktionen angewendet werden. Andernfalls müssen Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente durchgeführt werden. Aufgrund der physikalischen Überlegungen kommt die Variante 2 nicht in Frage. Ebenfalls in Frage kommt die Variante 3 welche ja schon heute angewendet wird. Da nur der flächenmässig relevante Teil gerechnet wird (in der Regel der dämmende Teil) liegen die Resultate auf der sicheren Seite. Es ist aber genau die Variante welche in Frage gestellt wird und zu dieser BFE-Studie geführt hat. Die Berechnungen in Kapitel 3 zeigen, dass die Resultate nach der Variante 1 durchaus höher liegen können als mit der Variante 3. Daher wird für inhomogene Bauten – in erster Line für Holzbauten – die Variante 1 vorgeschlagen.

5. Literaturverweise

- [1] Norm SIA 382/1, Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderung, Ausgabe 2005
- [2] Norm SIA 180.071, Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren, Ausgabe 2007, EN ISO 6946
- [3] Norm SIA 180.073, Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrößen – Berechnungsverfahren, Ausgabe 2007, EN ISO 13786
- [4] Norm SIA 380/1, Thermische Energie im Hochbau, Ausgabe 2009
- [5] Norm SIA 381.101, Baustoffe und Baustoffprodukte – Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte, Ausgabe 2000, EN 12524
- [6] Norm SIA 384.201 Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Ausgabe 2003, EN 12831
- [7] U-Wert-Berechnungen und Bauteilekatalog, Neubauten.
www.bbl.admin.ch/bundespublikationen
- [8] Norm SIA 382/2:2010, Klimatisierte Gebäude – Leistungs- und Energiebedarf, Ausgabe 2010
- [9] Tool SIA 382 Wärmekapazität, www.energycodes.ch
- [10] Merkblatt 2001, Wärmedämmstoffe, Excelversion von www.sia.ch
- [11] Liste SIA 380/1 Programmhersteller, www.energie.zh.ch

Anhänge

A 1. Brief an Softwareentwickler

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts

**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur

Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw
T +41 41 349 33 11, F +41 41 349 39 60
www.hslu.ch

Zentrum für Integrale Gebäudetechnik
Reto Gadola

T direkt +41 41 349 32 78
reto.gadola@hslu.ch

Horw, 1. März 2010
Seite 1/1

Berechnung der Wärmekapazität von inhomogenen Konstruktionen

Sehr geehrte Damen und Herren

Im Rahmen des BFE-Projektes „*Berechnung der Wärmekapazität von inhomogenen Konstruktionen*“ bitte ich Sie um Ihre Mithilfe. Um was genau geht es? In den letzten Jahren sind einige Bewegungen in den Heizungs-, Klima- und Lüftungsnormen zu verzeichnen. Jahrelang gültige Normen – und auch Berechnungsmethoden – wurden abgelöst und durch andere, auf EU-Normen basierende Berechnungsmethoden ersetzt. So wird in der Norm SIA 382/1:2007 für den Fall dass ein Raum klimatisiert werden soll eine Wärmespeicherfähigkeit von mindestens 30Wh/m^2 verlangt (Kapitel 2.1.4). Grundlage für die Berechnung bildet die EN 13786:2005 (SIA 180.073) „*Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen – Dynamisch-thermische Kenngrössen – Berechnungsverfahren*.“ Verlangt wird das detaillierte Verfahren mit Berücksichtigung des Übergangswiderstandes. Leider werden in der EN-Norm nur homogene Konstruktionen berücksichtigt, inhomogene Konstruktion fehlen.

Der Verein Minergie® hat 2008 mit dem Antragsformular 10 eine Beurteilung des sommerlichen Wärmeschutzes eingeführt, welcher in den wesentlichen Anforderungen die Vorgaben der Norm SIA 382/1 übernommen hat, so auch die Anforderung an die Wärmespeicherfähigkeit. Aber nicht nur Minergie®, auch die Kantone fordern mit der MuKen 2008 die Anforderung an die Wärmespeicherfähigkeit eines klimatisierten Raumes. Da aber vor allem Holzbauten inhomogene Konstruktionen aufweisen, treten bei der Berechnung immer wieder Fragen auf (das EN-Verfahren ist nur für homogene Konstruktionen ausgelegt).

Mit der BFE-Forschungsarbeit soll dieses Defizit behoben werden. Ziel ist es, eine einfache Handhabung für die Berechnung der Wärmekapazität zu finden. Auf Basis von Recherchen sollen einfache Modelle erstellt und anhand von Simulationen überprüft werden. Um die Recherche umfassend zu gestalten frage ich auch Sie an, ob Sie mit der Berechnung der Wärmekapazität nach EN 13786:2005 vertraut sind und schon Erfahrungen mit inhomogenen Konstruktionen haben. Sollte dies zutreffen, nehmen Sie bitte mit mir Kontakt auf. Sie helfen damit, einen möglichen Lösungsansatz breit abzustützen.

Freundliche Grüsse
Hochschule Luzern
Technik & Architektur

Reto Gadola
Projektleiter

FH Zentralschweiz



A 2. Übersicht Konstruktionen

A 2.1. Boden

Neubau Bauteilkatalog Bi 2	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.12m (Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A						0.5m Teilkonstruktion B						
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ
			m		m²K/W	kg/m³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m²K/W	kg/m³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Spannplatte	0.024			600		1.70	0.140							
2	Balken / Dämmung	0.16				500		1.60	0.130				32	1.03	0.036
3	Balken / Schiebboden	0.014				500		1.60	0.130						
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.198		0.13											

Neubau Bauteilkatalog Bi 3	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.12	m (Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5	m Teilkonstruktion B					
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p	λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p	λ		
			m		m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK		W/mK	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Spannplatte	0.024			600		1.70	0.140							
2	Dämmung	0.06			32		1.03	0.036							
3	Balken / Dämmung	0.16			500		1.60	0.130			32		1.03	0.036	
4	Lattung / Luftraum	0.024			500		1.60	0.130	x	0.19					
5	Verkleidung	0.014			500		1.60	0.130							
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.282		0.13											

Neubau Bauteilkatalog Bi 4	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.12m (Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A						0.5m Teilkonstruktion B						
Die erste Schicht ist raumseitig.		d	ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		W
		m		m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13										
1	Spannplatte	0.024			600		1.70	0.140						
2	Dämmung	0.08			100		1.03	0.036						
3	Balken / Dämmung	0.16			500		1.60	0.130			32		1.03	
4	Lattung / Luftraum	0.024			500		1.60	0.130	x	0.19				
5	Verkleidung	0.014			500		1.60	0.130						
6														
7														
8														
9														
10														
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.302		0.13										

Neubau Bauteilkatalog Bi 5	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.12	m (Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A						0.5	m Teilkonstruktion B					
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}				0.13											
1	Spannplatte	0.024				600		1.70	0.140							
2	Balken / Dämmung	0.16				500		1.60	0.130				32	1.03	0.036	
3	Dämmung	0.06				32		1.03	0.036							
4	Deckenverkleidung	0.014				500		1.60	0.130							
5																
6																
7																
8																
9																
10																
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.258			0.13											

Neubau Bauteilkatalog Bi 6																
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.12 m		(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5 m		Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13												
1	Spannplatte	0.024			600			1.70	0.140							
2	Balken / Dämmung	0.16			500			1.60	0.130			32		1.03	0.036	
3	Dämmung	0.08			32			1.03	0.036							
4	Deckenverkleidung	0.014			500			1.60	0.130							
5																
6																
7																
8																
9																
10																
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.278		0.13												

A 2.2. Aussenwand

Neubau Bauteilkatalog Wi 1																		
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.08 m		(Bitte Einheit wählen)					Teilkonstruktion A		0.5 m		Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ			
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK			
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13														
1	Innenverkleidung	0.014			500			1.60	0.130									
2	Lattung / Luft	0.024			500			1.60	0.130	x	0.18							
3	Balken / Dämmung	0.16			500			1.60	0.130			32		1.03	0.036			
4	Holzfaserverplatte	0.014			400			1.70	0.100									
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.212		0.13														

Neubau Bauteilkatalog Wi 2																		
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.08/m		(Bitte Einheit wählen)					Teilkonstruktion A		0.5/m		Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ			
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK			
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}				0.13													
1	Innenverkleidung	0.014			500			1.60	0.130									
2	Lattung / Luft	0.024			500			1.60	0.130	x	0.18							
3	Dämmung	0.12			32			1.03	0.036									
4	Balken / Dämmung	0.1			500			1.60	0.130			32		1.03	0.036			
5	Holzfaserverplatte	0.014			400			1.70	0.100									
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.272			0.13													

Neubau Bauteilkatalog Wi 3															
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.08 m		(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5 m		Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.		d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	
		m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Innenverkleidung	0.014			500		1.60	0.130							
2	Lattung / Luft	0.024			500		1.60	0.130	x	0.18					
3	Dämmung	0.12			32		1.03	0.036							
4	Balken / Dämmung	0.16			500		1.60	0.130			32		1.03	0.036	
5	Holzfaserverplatte	0.014			400		1.70	0.100							
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.332		0.13											

A 2.3. Dach

Neubau Bauteilkatalog Di 1	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.08	m	(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5	m	Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.		d		R	ρ	c_p	λ				R	ρ	c_p	λ	
		m	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Täfer	0.014			500		1.60	0.130							
2	Lattung / Luft	0.024			500		1.60	0.130	x	0.16					
3	Balken / Dämmung	0.18			500		1.60	0.130			32		1.03	0.036	
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.218		0.13											

Neubau Bauteilkatalog Di 2	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.08	m	(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5	m	Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.		d		R	ρ	c_p	λ				R	ρ	c_p	λ	
		m	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Täfer	0.014			500		1.60	0.130							
2	Lattung / Luft	0.024			500		1.60	0.130	x	0.16					
3	Dämmung	0.04			32		1.03	0.036							
4	Balken / Dämmung	0.18			500		1.03	0.130			32		1.03	0.036	
5															
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.258		0.13											

Neubau Bauteilkatalog Di 3	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.08	m	(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5	m	Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.		d		R	ρ	c_p	λ				R	ρ	c_p	λ	
		m	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Täfer	0.014			500		1.60	0.130							
2	Lattung / Luft	0.024			500		1.60	0.130	x	0.16					
3	Dämmung	0.08			32		1.03	0.036							
4	Balken / Dämmung	0.18			500		1.03	0.130			32		1.03	0.036	
5															
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.298		0.13											

Neubau Bauteilkatalog Di 4	
-------------------------------	--

Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.08	m	(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A					0.5	m	Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.		d		R	ρ	c_p	λ				R	ρ	c_p	λ	
		m	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	Ist Luftschicht [x]	m ² /K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13											
1	Holzschalung	0.014			500		1.60	0.130							
2	Lattung / Dämmung	0.06			500		1.60	0.130			32		1.03	0.036	
3	Dämmung	0.12			32		1.03	0.036							
4	Unterdach	0.014			500		1.03	0.130							
5															
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.208		0.13											

A 2.4. Decken

Neubau Bauteilkatalog Di 8																
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.08 m		(Bitte Einheit wählen)			Teilkonstruktion A			0.5 m		Teilkonstruktion B			
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}				0.13											
1	Täfer		0.014			500		1.60	0.130	x						
2	Lattung / Luft		0.024			500		1.60	0.130			0.16				
3	Balken / Dämmung		0.18			500		1.60	0.130				32		1.03	0.036
4	Spanplatte		0.024			600		1.70	0.140							
5																
6																
7																
8																
9																
10																
Wärmeübergang aussen R_{se}			0.242		0.13											

Neubau Bauteilkatalog DI 8															
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.08 m		(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A				0.5 m		Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}				0.13										
1	Täfer		0.014			500		1.60	0.130						
2	Lattung / Luft		0.024			500		1.60	0.130	x	0.16				
3	Balken / Dämmung		0.18			500		1.60	0.130			32		1.03	0.036
4	Dämmung		0.04			32		1.03	0.036						
5	Spanplatte		0.024			600		1.70	0.140						
6															
7															
8															
9															
10															
	Wärmeübergang aussen R_{se}		0.282		0.13										

Neubau Bauteilkatalog Di 8																
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.08 m		(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A				0.5 m		Teilkonstruktion B					
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	
			m		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m ² K/W	kg/m ³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13												
1	Täfer	0.014			500		1.60	0.130	x							
2	Lattung / Luft	0.024			500		1.60	0.130			0.16					
3	Balken / Dämmung	0.18			500		1.60	0.130				32		1.03	0.036	
4	Dämmung	0.08			32		1.03	0.036								
5	Spanplatte	0.024			600		1.70	0.140								
6																
7																
8																
9																
10																
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.322		0.13												

A 2.5. Massive Konstruktionen

Neubau Bauteilkatalog Di 8														
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)		0.1m		(Bitte Einheit wählen) Teilkonstruktion A				0.5m		Teilkonstruktion B				
Die erste Schicht ist raumseitig.		d	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [x]	R	ρ	c_p		λ
		m		m²/KW	kg/m³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m²/KW	kg/m³	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}			0.13										
1	Innenputz	0.01			1'400		0.90	0.700						
2	Beton / Mauerwerk	0.1			2'400		1.00	2.400			1'100		0.94	0.440
3	Innenputz	0.01			1'400		0.90	0.700						
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
	Wärmeübergang aussen R_{se}	0.12		0.13										

Neubau Bauteilkatalog Di 8																
Anteil des Konstruktionsteil (inhomogene Konstruktionen)			0.1 m		(Bitte Einheit wählen)				Teilkonstruktion A		0.5 m		Teilkonstruktion B			
Die erste Schicht ist raumseitig.			d	Ist Luftschicht [K]	R	ρ	c_p		λ	Ist Luftschicht [K]	R	ρ	c_p		λ	
			m		m^2/KW	kg/m^3	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK		m^2/KW	kg/m^3	Wh/kgK	kJ/kgK	W/mK	
Nr.	Wärmeübergang innen R_{si}				0.13											
1	Innenputz	0.01				1'400		0.90	0.700							
2	Beton / Mauerwerk	0.1				2'400		1.00	2.300			1'100		0.94	0.440	
3	Dämmung	0.16				32		1.03	0.036							
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
	Wärmeübergang aussen R_{se}		0.27		0.13											