

# Das Naturdorf Bärnau

## Bauphysikalische Beurteilung und energetische Bilanzierung



Arthur Duttenhöfer

L124 BT

2023 / 2024

Heinrich-Hübsch-Schule

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine weiteren als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

Karlsruhe, den .....

.....

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung .....	I
Einleitung und Zielsetzung .....	1
Das Projekt .....	2
Vorhaben .....	2
Hintergrund .....	3
Zielstellung des Projekts .....	5
Geschichtspark .....	5
Kulturell .....	5
Handwerklich .....	6
Ökologisch .....	8
Baurecht .....	10
Randbedingungen und Berechnungsgrundlagen .....	11
Grenzwerte .....	11
Berechnungsprogramme .....	11
Gebäudewahl .....	11
Tragwerk .....	12
Materialkennwerte .....	14
Abkürzungen und Indizes .....	16
Wärme- und Feuchteschutz nach Bauteil .....	17
Allgemein .....	17
Außenwand, oberste Geschossdecke, Dach .....	20
Wärmeschutz .....	20
Fazit .....	20
Feuchteschutz .....	21
Fazit .....	22

Bodenaufbau gegen Erdreich .....	22
Wärmeschutz .....	22
Feuchteschutz .....	24
Fazit .....	24
Zusammenfassung .....	24
Fenster .....	25
Hauseingangstür .....	27
Wärmebrücken .....	28
Einführung .....	28
Gleichwertigkeitsnachweis .....	29
Bedingungen .....	29
1. Konstruktives Grundprinzip .....	30
2. Bauteilabmessungen .....	30
3. Baustoffeigenschaften .....	31
Bodenplatte gegen Erdreich .....	32
Innenwand auf Bodenplatte .....	33
Innenwandeinbindung an Außenwand .....	34
Innenwand an Dach .....	35
Geschossdecke .....	36
Fensterbrüstung .....	37
Fensterlaibung .....	38
Fenstersturz .....	39
Giebelwand .....	40
Ortgang .....	41
Pfettendach .....	42
First .....	43
Ergebnisse und Evaluierung .....	44

Energetische Bilanzierung Haus C .....	45
Allgemein .....	45
Grenzwerte .....	46
Eingabe.....	47
Stammdaten.....	47
Variante 1: Dämmebene.....	48
Variante 2: Wärmebrückenzuschlag.....	49
Variante 3: Fenster .....	49
Ergebnisse und Evaluierung .....	49
Variante 1 .....	50
Variante 2 .....	50
Variante 3 .....	51
Zusammenfassung.....	51
Schlusswort.....	52
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis .....	VII
Quellenverzeichnis .....	VIII
Anhangsverzeichnis .....	XI

## Einleitung und Zielsetzung

Während meiner Berufsjahre als Zimmerer und den Jahren auf traditioneller Wanderschaft habe ich mich hauptsächlich mit der Restaurierung und Wiederherstellung von Fachwerkhäusern, Kirchendachstühlen und anderen historischen Holzkonstruktionen beschäftigt. Während meiner Wanderschaft bin ich im Sommer 2020 in den Geschichtspark Bärnau-Tachov gekommen, wo ich einige Wochen an der dortigen Burgbaustelle mitarbeitete und bei der Ideenfindung des Naturdorfs Bärnau mitwirken durfte.



*Abbildung 1: Mittelalterbaustelle*

Bis zu diesem Zeitpunkt hat mich die Arbeit im konventionellen Neubau nicht sehr interessiert und ich war aus Begeisterung an historischen Gebäuden und Holzkonstruktionen primär in der Denkmalpflege tätig.

Die Möglichkeit, mein Wissen über traditionelle Handwerkstechniken rationell in die heutige Zeit übertragen zu können, weckte erst mein Interesse am Neubau. Von dieser neuen Möglichkeit inspiriert, entschied ich mich für eine Weiterbildung zum staat-

lich geprüften Bautechniker, um mehr über die Anforderungen an und gesetzlichen Regelungen für den Neubau zu erfahren.

Mit diesem erlernten Wissen soll in dieser Arbeit die geplante Bauweise des Naturdorfs Bärnau in Hinblick auf Wärme- und Feuchteschutz bauphysikalisch beurteilt und geprüft werden, ob die gesetzlichen Mindestanforderungen eingehalten werden.

Des Weiteren wird eines der Gebäude energetisch bilanziert werden, um zu prüfen, ob die geplante Bauweise den energetischen Anforderungen an Neubauten entspricht.

## Das Projekt

### Vorhaben

Auf einer Fläche von 1700 m<sup>2</sup> werden, im oberpfälzischen Bärnau, vier Ferienhäuser mit einer Gesamtnutzfläche von circa 275 m<sup>2</sup> errichtet. Die zweistöckigen, in Fachwerkbauweise konstruierten Gebäude sollen in eine biodiverse Gartenlandschaft eingebettet werden.



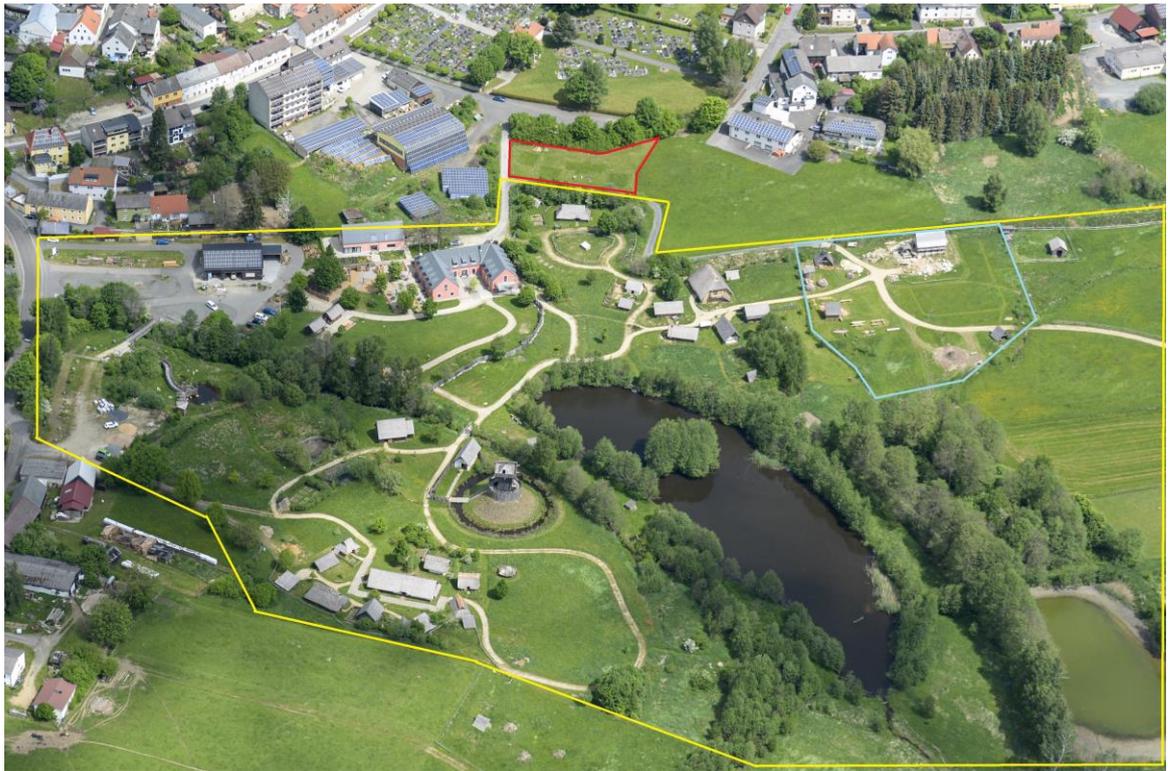
*Abbildung 2: Luftbild des Baugrundstücks*

Es soll eine Ferienhaussiedlung werden, deren Häuser traditionelle Bauweisen, regionale Materialien, aber eben auch den Wohnstandard der heutigen Zeit vereinen. Diese Häuser sollen Übernachtungsgästen, Besucher:innen, aber auch Baufachleuten die Möglichkeit geben, eine alternative Bauweise zu erleben. In Abbildung 2 ist die Anordnung der Gebäude auf dem Grundstück zu sehen. Gebäude A, B, C, D von links nach rechts.

## Hintergrund

Der Geschichtspark Bärnau Tachov ist das größte mittelalterliche archäologische Freilichtmuseum in Deutschland. Seit 2011 sind mehr als 30 Gebäude rekonstruiert worden, die die früh- und hochmittelalterlichen Bau- und Lebensweisen erlebbar machen. Diese Gebäude werden von Ehrenamtlichen regelmäßig gewartet und stehen Besuchern zum Betreten zur Verfügung. (Abbildung 3, gelb markierter Bereich)

Im Rahmen des Kompetenzzentrums traditionelle Handwerkstechniken entsteht seit 2017 ein spätmittelalterlicher burggleicher Königshof von Karl IV an der Goldenen Straße aus dem 14. Jahrhundert. Hierbei handelt es sich um ein experimentell-archäologisches Projekt, bei dem durch die Bautätigkeit traditionelles Handwerkswissen praktisch erprobt, bewahrt sowie ausgestorbene Verfahren und Techniken wieder neu erlernt werden. Dieses Projekt wurde durch öffentliche Forschungsgelder gefördert, um mit akademischer Begleitung den archäologischen Wissenstand praktisch zu überprüfen. (Abbildung 3, blau markierter Bereich)



*Abbildung 3: Luftbild, gelb: Geschichtspark Bärnau Tachov, blau: Königshof Karl IV, rot: Baugrundstück Naturdorf Bärnau*

Infolge des Bedarfs an Übernachtungsmöglichkeiten für Parkbesuchende und Erfahrungen in der Erprobung altbewährter, vorindustrieller Materialien und Handwerkstechniken an der Burgbaustelle kamen die angestellten Handwerker:innen des Geschichtsparks im Sommer 2020 auf die Idee des Naturdorf Bärnau.

Nach einer zweijährigen Planungs- und Organisationsphase durch Angestellte des Geschichtsparks mit Unterstützung des Architekturbüros Schönberger fand im Mai 2022 der erste Spatenstich statt und das Vorhaben befindet sich derzeit im Bau. (Abbildung 3, rot markierter Bereich)

## Zielstellung des Projekts

### Geschichtspark

Das Naturdorf soll nicht nur Urlaubsdomizil für Familien und Tourist:innen werden, sondern auch außerhalb der Hauptreisezeit als Unterkunft für Teilnehmende an Seminaren zu handwerklichem Bauen dienen. Dadurch sollen inhaltliche und museumspädagogische Synergieeffekte erzielt und langfristig die Finanzierung der Mittelalterbaustelle gesichert werden.

### Kulturell

Handwerker:innen der Vergangenheit haben mit ihrem Können und den über Generationen angesammelten Erfahrungen unsere Kultur, unsere Landschaft und das Erscheinungsbild unserer Städte und Dörfer geprägt. Dank dieser überlieferten Handwerkskünste erfreuen sich alte Fachwerkstädte auch bei fachfremden Besucher:innen großer Beliebtheit. Durch einen prägenden Aufenthalt im Naturdorf Bärnau soll kultureller Tourismus gefördert werden, indem kulturelle Wurzeln in Hand- und Fachwerk herausgearbeitet werden.

Die Anordnung der Häuser auf dem Grundstück soll außerdem ein möglicher Musteransatz für die Neuerschließung von Ein- und Mehrfamilienhaussiedlungen sein. Anstatt einzeln in Reih und Glied zu stehen, haben die Häuser Bezug zueinander und umschließen einen gemeinsamen Anger, in dem sich, unter Berücksichtigung von Topografie, Wettereinflüssen und richtiger Bepflanzung, ein eigenes Mikroklima bildet. Außerdem können natürliche Energiequellen effizienter und ressourcenschonender verwendet werden. Eine zentrale und direkte Energienutzung bei minimalem Verteilungsaufwand führt somit zu den geringsten Verlusten.



*Abbildung 4: Ansicht des Naturdorf Bärnau*

Damit soll ein Verständnis für ökologische Haussysteme geschaffen und die Einstellung von Bewohner:innen zu ihren Häusern verändert werden. „Denn die gebaute Umwelt und ihre Systeme allein bilden noch kein ökologisches System. Sie sind vielmehr das Gerüst für ein ökologisch orientiertes Leben, das erst in „Betrieb“ mit den Bewohnern (Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen) ein dynamisches Kreislaufsystem erzeugt.“(Hrsg. Umweltbundesamt 1982: S.26)

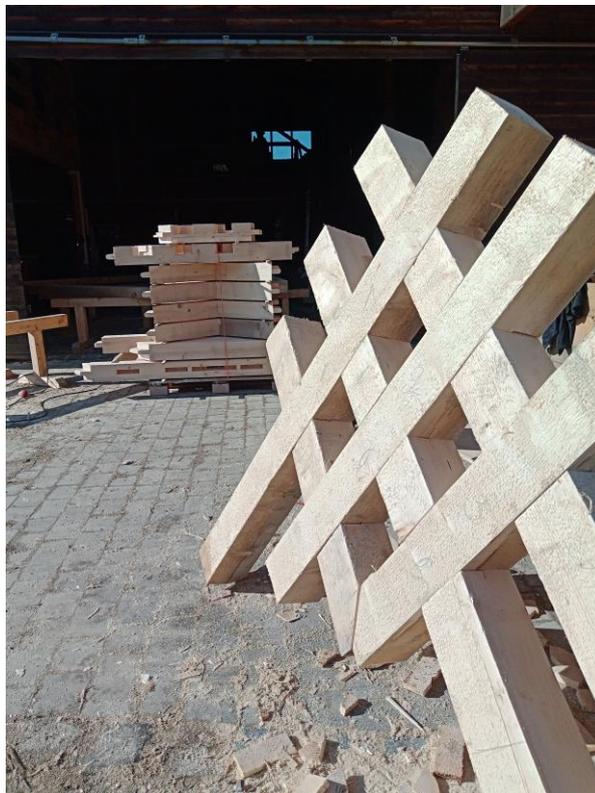
## Handwerklich

Traditionelle Handwerkstechniken sind die Grundlage aller Bauberufe und ein unschätzbare kulturelles Erbe. Sie finden allerdings, in der sehr industriell geprägten Bauwirtschaft unserer Zeit, kaum noch Anwendung. Selbst in vielen überbetrieblichen und schulischen Teilen der Ausbildungen fallen diese Grundlagen zum Teil weg.

Dies führt immer mehr zu einem enormen Wissensverlust, der sich nach bereits zwei Generationen des industrialisierten Bauens bemerkbar macht. Das zeigt beispielsweise das verlorene Wissen über das Mischen von Mörteln, Putzen und Farbanstrichen, was in weiten Teilen der mineralischen Gewerke seit einigen Jahrzehnten kaum mehr vorhanden ist. Durch die Verwendung von Fertigmischungen ist man auch ohne entsprechenden Wissensstand und Fähigkeiten äußerst effizient, mit dem richtigen Wissen aber deutlich flexibler und ressourcenschonender, da sich aus einigen wenigen Materialien eine Vielzahl von Werkstoffen für die unterschiedlichsten Anwendungen herstellen lassen.

Die Handwerker:innen, die einst aufgrund von Fachkompetenz, langjähriger Erfahrung und händischem Geschick hohes Ansehen genossen, sind heute oft Montagearbeitende.

Durch die Anwendung altbewährter Techniken besinnt man sich auf handwerkliche Werte zurück, was sich -nach Ansicht der Projektinitiatoren- attraktivitätssteigernd auf dieses Berufsfeld auswirken kann.



*Abbildung 5: Ziergiebelement, Naturdorf Bärnau*

Gleichzeitig verfolgt das Naturdorf Bärnau einen sozial-fairen und demokratischen Umgang mit den am Bau Beteiligten. Ziel ist es, Planung und Ausführung an einen Tisch zu bringen, damit alle Parteien gemeinsam und auf Augenhöhe zusammenarbeiten. Dadurch werden Hierarchien reduziert und anfallende Probleme können aus mehreren Blickrichtungen kritisch beurteilt werden, um zielgerichtete Lösungen zu erarbeiten.

Weiter dokumentiert der wissenschaftlich begleitete Bau des Naturdorfs die Umsetzung und den aktuellen Kenntnisstand traditioneller Bautechniken und bildet damit eine Wissensgrundlage für zukünftige Anwendungen. Im Sinne des traditionellen Bauhüttenwesens entsteht eine Bildungsplattform, die sowohl während der Bauphase als auch anschließend in Form von Seminaren und Workshops Menschen aus der Baubranche weiterbildet und das erarbeitete Wissen für Interessierte zur Verfügung stellt.

## Ökologisch

Mit ihrem großen Erfahrungsschatz bauten die Handwerker:innen der vorindustriellen Zeit aus einfachsten, lokal verfügbaren Materialien langlebige, widerstandsfähige und ressourcenschonende Bauten, die unterschiedlichsten Generationen und Nutzungen gerecht wurden. Dieses immer mehr in Vergessenheit geratene Wissen kann einen wichtigen Beitrag beim Übergang in eine ökologische und zukunftsfähige Bau- und Lebenskultur leisten.

Im modernen Bauwesen werden große Mengen an Hochenergiebaustoffen, wie Zementprodukte und petrochemische Verbund- und Dämmstoffe, eingesetzt, deren Wiederaufbereitung oder Entsorgung bereits heute schwierig ist und zukünftige Generationen sowie unserer Umwelt belasten wird. Die Verwendung dieser Stoffe in der jüngeren Vergangenheit führte bereits innerhalb weniger Jahrzehnte zu diversen Bauschäden und Sanierungsschwierigkeiten. Insbesondere in der Altbausanierung und -restauration führte der Einsatz moderner Baustoffe häufig zur „Verschlimm-besserung“ der Bausubstanz, die erneute Instandhaltungsarbeiten nach sich zog und jahrhundertealte Denkmäler schädigte. Das beweisen viele Fachwerkhäuser nach unsachgemäßen Sanierungsversuchen.

Ein weiterer Grund für ein Umdenken in der Baubranche ist, dass diese bundesweit für ca. 40% der CO<sub>2</sub> - Emissionen, ca. 35% des Energieverbrauchs und ca. 60% des Müllaufkommens verantwortlich ist (Schanzenberger 2023: S.40). Diesen Energieverbrauch und die daraus resultierende Schadstoffentwicklung völlig zu vermeiden, ist unmöglich. Daher liegt der Ansatz des Naturdorfs in der Minimierung des Primärenergiebedarfs und der damit einhergehenden CO<sub>2</sub> - Emissionen, was vor allem mit der Wahl der Baustoffe und ihrem Bearbeitungsgrad einhergeht. „Bei der Baustoffauswahl sind [...] nicht nur der Herstellungsaufwand, sondern auch die durch Rohstoffabbau, Herstellung, Transport und Verarbeitung entstehenden Schadstoffe entscheidend [...]. Je mehr ein Rohstoff bearbeitet und verändert wird, desto mehr Schadstoffe können bei den jeweiligen Bearbeitungsphasen entstehen. [...] Vielfach veredelte Baustoffe mit hohen technischen Qualitäten, [...] haben evtl. sogar negative Einflüsse auf das Raumklima, das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bewohner.“(Hrsg. Umweltbundesamt 1982: S.224)



Abbildung 6: Ansicht Gebäude C und D

Daher werden alle verbauten Rohstoffe im Naturdorf Bärnau, soweit möglich, aus der Region in einem Umkreis von ca. 50-100 km bezogen. Bei den eingesetzten Materialien wird eine industrielle Vorverarbeitung möglichst vermieden und auf Verbundwerkstoffe verzichtet. Nicht nur um den Primärenergiebedarf gering zu halten, sondern auch um eine sortenreine Trennung der Baustoffe nach dem Lebenszyklus der Gebäude im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen. Hochenergiebaustoffe wie Zemente, Verbundstoffe, Industrieholz, Folien und Klebstoffe kommen nicht zum Einsatz. Dadurch soll die lokale Wertschöpfung gestärkt, lokale Waren- und Wirtschaftskreisläufe geschlossen, Transportwege und Emissionen minimiert sowie Kompetenzen in der Materialverarbeitung gebündelt werden.

## Baurecht

Für das Baugebiet besteht ein Bebauungsplan mit integrierter Grünordnung. Dieser Bebauungsplan für das Sondergebiet „Hammerweiher“ wurde eigens für das Gebiet des Geschichtsparks Bärnau – Tachov im Jahr 2009 durch die Stadt Bärnau erstellt. Seither kam es zu zwei Änderungen in den Jahren 2012 und 2016.

Die Gebäude des Naturdorfs Bärnau erfüllen alle Kriterien, die der Bebauungsplan fordert.



*Abbildung 7: Dachlandschaft im Naturdorf Bärnau*

# Randbedingungen und Berechnungsgrundlagen

## Grenzwerte

Die zu vergleichenden Grenzwerte werden der DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden und den technischen Ausführungen des Referenzgebäudes des Gebäudeenergiegesetzes 2020 (weiter als GEG) in Anlage 1 entnommen.

## Berechnungsprogramme

Für die Berechnungen von Wärme- und Feuchteschutz der einzelnen Bauteile werden zwei Programme herangezogen, um Vergleichswerte zu schaffen und eine gewisse Abweichung von Berechnungsdaten einzuschränken. Zum einen der online U-Wert Rechner der u-wert.net GmbH, im Weiteren mit „Ubakus“ gekennzeichnet. Und zum anderen das Energieplanungsprogramm des Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, im Weiteren mit „BKI“ gekennzeichnet. Für die energetische Bilanzierung wird das Gebäude in BKI eingegeben. Ubakus eignet sich hierfür nicht, da das Programm ausschließlich für die bauphysikalische Beurteilung einzelner Bauteilaufbauten ausgelegt ist.

## Gebäudewahl

Das geplante Ensemble des Naturdorf Bärnau besteht aus vier Gebäuden. Gebäude A, B und D mit einer Wohnfläche von ca. 50-60 m<sup>2</sup> sollen Unterkünfte für drei bis fünf Personen bieten. Gebäude C mit einer Wohnfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> bietet Platz für eine Gruppe von bis zu 12 Personen und ist barrierearm gestaltet. Für die weiteren Berechnungen und Betrachtungen von Details in dieser Arbeit ist Gebäude C ausgewählt worden. Mit einer Wohnfläche von 100 m<sup>2</sup> und einem Bruttoraumvolumen von knapp 470 m<sup>3</sup> kann das Gebäude mit einem Einfamilienhaus der heutigen Zeit verglichen werden.

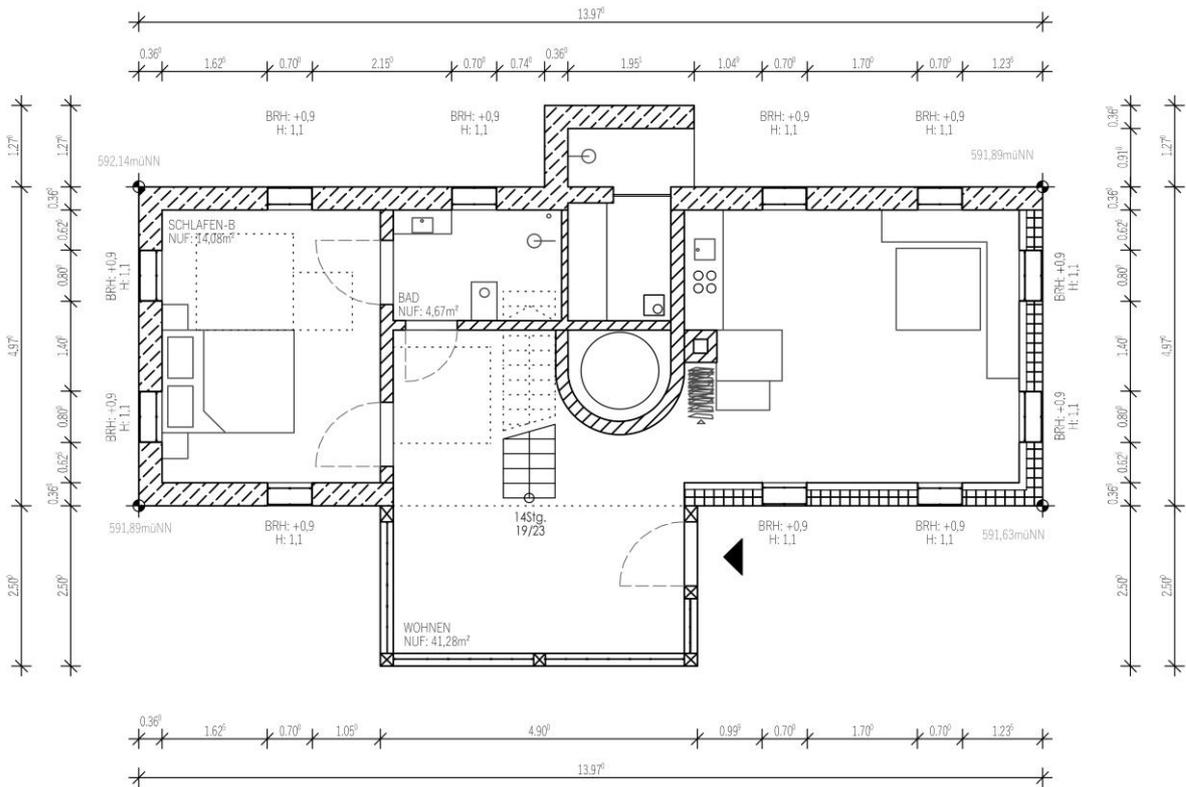


Abbildung 8: Grundriss Erdgeschoss, Haus C

## Tragwerk

Die gewählte traditionelle Fachwerkbauweise versinnbildlicht den jahrtausendealten Beruf des/der Zimmerers:in und prägt bis heute unsere historischen Innenstädte. Selbst ohne statische Berechnungen sind so mehrgeschossige Gebäude errichtet worden, die über Jahrhunderte ihre Langlebigkeit, Standsicherheit und Tragfähigkeit beweisen.

Statische Systeme in dieser Bauweise sind einfach zu erkennen und nachzuvollziehen. Durch die erprobten und ausgefeilten Holzverbindungen lassen sich Fachwerkkonstruktionen mit einfachen Mitteln und ohne energieintensiv industriell produzierte Verbindungsmittel herstellen.

Daraus ergibt sich eine Konstruktionsweise, die ressourcenschonend aus lokalen Wäldern und ohne weite Transportwege und industrielle Bearbeitung und Verklebung bezogen werden kann. Gleichzeitig ermöglichen das simple statische Prinzip und die

Verbindungsarten eine einfache Instandhaltung und Erneuerung einzelner Bauteile. Die Wiederverwendung von Konstruktionselementen und eine sortenreine Trennung ist bei einem Rückbau problemlos möglich und handwerklich umsetzbar.



*Abbildung 9: Gebäude D*

Ein Aufmaß der Fassade von Gebäude D (Abbildung 9) im April 2022 ergab einen Flächenanteil der Konstruktionselemente von 40% und einen Flächenanteil der Gefache von 60%. Für die Berechnung des Wärme- und Feuchteschutzes wird der Konstruktionsaufbau mit diesem Verhältnis in die Berechnungsprogramme eingegeben.

## Materialkennwerte

Das Ziel des Bauvorhabens ist es, den Primärenergiebedarf der Gebäude so gering wie möglich zu halten. Dies geschieht vor allem durch kurze Transportwege und die geringe industrielle Vorverarbeitung der zu verbauenden Materialien. Aus diesem Grund hat sich das Naturdorf für die Dämmung der Gebäudehülle für ein In-Situ-Verfahren entschieden.

Beim anstehenden Baugrund handelt es sich um einen schluffigen Boden. Allerdings haben Probekörper aus diesem Material ergeben, dass der Tonanteil zu gering und damit das Material zu mager ist, um es als Stampflehmdämmung zu verwenden.

Daher hat man sich für eine Dämmung aus Hanfkalk oder Hanfbeton entschieden. Bei diesem Dämmmaterial handelt es sich um eine Mischung aus Branntkalk als Bindemittel und Hanfschäben als lufteinschließendes Material. Beide Bestandteile sind in der oberpfälzischen Region und im benachbarten Tschechien zu erwerben. Die genannten Hanfschäben sind ein Abfallprodukt aus der Hanffaserproduktion. Auf der Baustelle vermischt und gelöscht ergibt sich ein Dämmmaterial, das In-Situ in einer Schalung eingebaut werden kann.



Abbildung 10: Innendämmung ausgeschalt

Erste Versuche des Materials ergaben eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,06 \frac{W}{mK}$  bis  $1,0 \frac{W}{mK}$  (Tantz 2023: S.54). Als Berechnungsgrundlage werden die Werte des ISOHemp HL Mix der Firma IsoHemp verwendet. Das beschriebene Material kommt in Zusammensetzung und Verarbeitungsweise der Hanfkalkmischung im Naturdorf Bärnau sehr nahe und weist eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,068 \frac{W}{mK}$  (IsoHemp S.A. 2023) auf. Außerdem ist das Material in der Datenbank von Ubakus zu finden. Die eingetragenen Materialkennwerte werden in die Datenbank von BKI übernommen, da kein vergleichbares Material hinterlegt ist.

Im Bereich von Dach und oberster Geschosdecke kann eine Hanfkalkdämmung auf Grund der hohen Rohdichte von  $300 \frac{kg}{m^2}$  aus statischen Gründen nicht eingesetzt werden. Alternativ wird eine Hanffaserdämmung eingesetzt. Durch die schlechten Wasseraufnahmefähigkeit der Dämmwolle muss zusätzlich eine Dampfbremse eingebaut werden, um Tauwasserschäden zu vermeiden. Geplant wird bisher mit der Papierdampfbremse Sisalex 303 der Fima Ampack. Die Bestandteile dieser Dampfbremse sind laut Hersteller alle natürlichen Ursprungs (Hrsg.: Ampack AG) und fügen sich damit in das ökologische Grundprinzip des Naturdorf Bärnau.

Gleichzeitig werden von der Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg Recherchen über die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von Wollfilzen betrieben, um eine ökologischere und verwertbarere Alternative für Dampfbremsen zu finden.

Für alle weiteren Materialien werden die hinterlegten Werte des jeweiligen Berechnungsprogramms verwendet. Dies führt zu einer geringfügigen Abweichung der Ergebnisse.

## Abkürzungen und Indizes

Tabelle 1 und Tabelle 2 fassen alle verwendeten Abkürzungen und Indizes dieser Arbeit zusammen.

*Tabelle 1: Abkürzungen*

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
R	Wärmedurchlasswiderstand	$\left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$
U	Wärmedurchgangskoeffizient	$\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
M	Flächenbezogene Tauwassermenge	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$
m´	Flächenbezogene Masse	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$
A	Fläche	$[\text{m}^2]$
l	Länge	$[\text{m}]$
d	Dicke	$[\text{m}]$
H´ <sub>t</sub>	Transmissionswärmeverlust	$\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
Q <sub>p</sub>	Primärenergiebedarf	$\left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}} \right]$

Tabelle 2: Indizes

Index	Bedeutung
ref	Referenzwert nach DIN 4108 / GEG
G	Bereich des Gefachs
K	Bereich der Konstruktion
m	Gesamtes Bauteil im Mittel
c	Tauwasser (condensation)
ev	Verdunstung (vetilation)
W	Fenster (window)
D	Tür (door)
f	Rahmen (frame)
g	Glas
P	Füllung (Paneele)

## Wärme- und Feuchteschutz nach Bauteil

### Allgemein

Im Folgenden werden die Bauteile der wärmeübertragenden Umfassungsfläche von Gebäude C hinsichtlich Wärme- und Feuchteschutz beurteilt. Auf Dach- und Wandaufbauten im Bereich des unbeheizten Dachspitzes wird nicht näher eingegangen.

Der Wandaufbau ist umlaufend gleich in Fachwerkbauweise mit Innendämmung ausgeführt. Die Außenwände, die nach Norden ausgerichtet sind, werden zusätzlich mit einer Boden-Deckel-Schalung versehen, um die Holzkonstruktion vor Witterungseinflüssen auf dieser sonnenabgewandten Seite des Gebäudes zu schützen. Für die Wärme- und Feuchteschutzberechnungen der Außenwände wird die Schalung nicht berücksichtigt. Eine vorgehängte Fassade verbessert jedoch die errechneten Werte.



Abbildung 11: Außenwandaufbau im Dämmprozess

Für den Wärmeschutz werden in der DIN 4108 Mindestanforderung an den Wärmedurchgangswiderstand, im Weiteren als R-Wert bezeichnet, gestellt (DIN 4108-2 2013). Der R-Wert in  $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$  gibt den Widerstand an, den ein Bauteil oder eine Bauteilschicht dem Wärmestrom bei einer Temperaturdifferenz von 1° Kelvin von innen nach außen auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> entgegensetzt. Je höher dieser Wert, desto besser ist die Wärmedämmeigenschaft des Bauteils oder der Schicht (Hrsg.: Heinze GmbH 2024).

Das Gebäudeenergiegesetz stützt sich auf diese Mindestanforderungen an den R-Wert und setzt mit der technischen Ausführung des Referenzgebäudes zusätzlich Höchstwerte an den Wärmedurchgangskoeffizienten, im Folgenden als U-Wert bezeichnet (GEG 2020: Anlage 1). Der U-Wert in  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$  beschreibt die Wärmeenergie, die pro Sekunde durch 1 m<sup>2</sup> Fläche eines Bauteils bei einer Temperaturdifferenz von 1° Kelvin strömt (Bläsi 2022: S.16). Hierbei werden neben des R-Wertes eines Bauteils zusätzlich die Wärmeübergangswiderstände  $R_{\text{si}}$  und  $R_{\text{se}}$  an den Bauteiloberflächen eingerechnet. Dadurch werden sowohl die Wärmekonvektion als auch die Wärmestrahlung an der Bauteiloberfläche mitberücksichtigt (Hrsg.: Viesmann 2021: S.1161). Je niedriger der U-Wert, desto geringer ist der Wärmedurchgang und desto besser ist die Wärmedämmung.

Da die Mindestanforderung an den R-Wert nicht ausreichen, um den geforderten U-Wert des Referenzgebäudes zu unterschreiten, sind die maximal zulässigen U-Werte des Referenzgebäudes in Anlage 1 Gebäudeenergiegesetz maßgebend. Außerdem stellt der U-Wert die wichtigste bauphysikalische Größe im Wärmeschutz dar.

Für die Beurteilung des Feuchteschutzes wird das Berechnungsverfahren nach DIN 4108-3 herangezogen. Hierbei handelt es sich um das Periodenbilanzverfahren nach Glaser (Hrsg.: Heinze GmbH 2024). Dabei wird durch die Ermittlung von Wasserdampfteildrücken zwischen einzelnen Bauteilschichten in Abhängigkeit der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit, untersucht ob und wie viel Tauwasser sich in einem Bauteil niederschlägt.

Hierfür werden aufgrund der klimatischen Umgebungsbedingungen zwei Perioden unterschieden: Die Tauperiode in den Wintermonaten und die Verdunstungsperiode in den Sommermonaten.

Während der Tauperiode nimmt der Wasserdampf-sättigungsdruck durch den herrschenden Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsunterschied innerhalb eines Bauteils von innen nach außen ab. Übersteigt der tatsächliche Wasserdampfdruck, der sich aufgrund von Diffusion bildet, diesen Sättigungswert, so kommt es zum Tauwasserausfall.

In der Verdunstungsperiode wird im gesamten Bauteil die gleiche Temperatur, Luftfeuchtigkeit und der gleiche Wasserdampf-sättigungsdruck angenommen. Ebenso wird der tatsächliche Wasserdampfdruck innen wie außen gleich hoch angesetzt. Dieser ist, aufgrund der hohen Lufttemperatur, kleiner als der Wasserdampf-sättigungsdruck, was dazu führt, dass Feuchtigkeit, die innerhalb eines Bauteils angefallen ist, wieder ausdiffundieren kann (Bläsi 2022: S.267).

Hierfür muss die mögliche Verdunstungsmenge in der Verdunstungsperiode größer als die tatsächlich angefallene Tauwassermenge sein. Diese Anforderung gilt für alle Bauteile (DIN 4108-3 2023: 5.2.2 b)).

$$M_c \left[ \frac{kg}{m^2} \right] \leq M_{ev} \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

Schichtaufbauten und-zeichnungen sowie Berechnungsprotokolle und -diagramme der einzelnen Bauteile finden sich im Anhang (A1 – D3).

## Außenwand, oberste Geschossdecke, Dach

### Wärmeschutz

Durch die gewählte Holzfachwerkbauweise fallen Außenwand, Dach und oberste Geschossdecke unter die Anforderungen an inhomogene nichttransparente Bauteile (DIN 4108-2 2013: 5.1.3). Es sind zwei Wärmedurchlasswiderstände einzuhalten.  $R_{G,ref} \geq 1,75 \frac{m^2K}{W}$  für den Bereich des Gefachs und  $R_{m,ref} \geq 1,00 \frac{m^2K}{W}$  für das gesamte Bauteil im Mittel. Für die einzelnen Bauteile finden sich im Gebäudeenergiegesetz Anlage 1 folgende Höchstwerte für die Wärmedurchgangskoeffizienten.  $U_{ref} = 0,28 \frac{W}{m^2K}$  für Außenwände und  $U_{ref} = 0,20 \frac{W}{m^2K}$  für Dach und oberste Geschossdecke. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für Wärmedurchlasswiderstände und Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengefasst.

Tabelle 3: Wärmeschutz Außenwand, oberste Geschossdecke, Dach

Bauteil		$R_G \left[ \frac{m^2K}{W} \right]$	$R_m \left[ \frac{m^2K}{W} \right]$	$U \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$	✓ / ✗
Außenwand	Ubakus	4,49	4,42	0,23	✓
	BKI	4,65	4,31	0,22	✓
Oberste Geschossdecke	Ubakus	7,72	7,06	0,14	✓
	BKI	7,25	6,88	0,14	✓
Dach	Ubakus	6,15	6,07	0,16	✓
	BKI	7,55	6,21	0,16	✓

### Fazit

Alle drei Bauteile halten die gegebenen Grenzwerte an die R-Werte für inhomogene Bauteile und den U-Wert an das gesamte Bauteil ein und sind somit wärmeschutztechnisch zulässig.

## Feuchteschutz

Um Schäden durch anfallende Feuchtigkeit zu vermeiden, darf zusätzlich zu der allgemeinen Anforderung aus Tau- und Verdunstungsperiode bei Dächern, Wänden und Decken unter unbeheizten Dachräumen nur eine maximale Tauwassermenge von insgesamt  $M_c = 1,0 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$  (DIN 4108-3 2023: 5.2.2 c)) anfallen. Da sich in den Konstruktionen Holzbauteile befinden, ist außerdem eine Erhöhung des Feuchtegehalts des Holzes durch anfallendes Tauwasser von mehr als 5% unzulässig (DIN 4108-3 2023: 5.2.2 d)). Da es sich bei Glaser um eine stationäre Diffusionsberechnung handelt, werden bei inhomogenen Bauteilen Gefach- und Konstruktionsbereich separat voneinander betrachtet. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Wasserdampfdiffusionsberechnung aufgelistet.

Tabelle 4: Feuchteschutz, Außenwand, oberste Geschossdecke, Dach

Bauteil		$M_{c,G} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$	$M_{ev,G} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$	$M_{c,K} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$	$M_{ev,K} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$	Holzfeuchte	✓/X
Außenwand	Ubakus	0,634	4,782	1,106	1,345	+ 1,8 %	✓
	BKI	0,674	4,806	1,101	1,391		✓
Oberste Geschossdecke	Ubakus	-	-	-	-	-	✓
	BKI	-	-	-	-		✓
Dach	Ubakus	-	-	-	-	-	✓
	BKI	0,131	0,383	0,017	0,455		✓

## Fazit

Dach und oberste Geschossdecke sind diffusionstechnisch zulässig, da es zu gar keinem bis minimalen Tauwasserausfall innerhalb der Konstruktion kommen kann. Auftretendes Tauwasser kann problemlos in der Verdunstungsperiode wieder abtrocknen und übersteigt den zulässigen Höchstwert nicht. Dieses Ergebnis war, aufgrund des Einsatzes einer Dampfbremse, zu erwarten, da es sich um einen zeitgemäß erprobten Aufbau handelt.

In der Außenwand kommt es in jedem Fall zu einem Tauwasserausfall. Sowohl im Bereich des Gefaches als auch der Konstruktion wird die Anforderung  $M_c < M_{ev}$  erfüllt. Somit kann das anfallende Tauwasser wieder ausdiffundieren. Allerdings übersteigt die Tauwassermenge zwischen der Innendämmung und der Konstruktion den höchst zulässigen Maximalwert von  $M_c = 1,0 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$ , führt aber nur zu einer Erhöhung von 1,8% der Holzfeuchte. Dennoch kristallisiert sich eine feuchteschutztechnische Problemstelle heraus, die auf einem Flächenanteil von 40% nicht unbeachtet bleiben darf.

Aber es kann davon ausgehen werden, dass es aufgrund der hohen Trocknungsreserve, der stark alkalischen Umgebung und der hygroskopischen Eigenschaft von Hanfkalkdämmung und Lehmputz zu keinen gravierenden Feuchteschäden und Schimmelbildung kommt.

## Bodenaufbau gegen Erdreich

### Wärmeschutz

Da aufwendige Erd- und Tiefarbeiten und damit einhergehende Abdichtungsmaßnahmen mit Hochenergiebaustoffen vermieden werden sollen, ist bewusst auf eine Unterkellerung der Gebäude verzichtet worden. Die Gebäude ruhen auf einem Natursteinsockel auf Streifenfundamenten.



Abbildung 12: Streifenfundament auf Frostschuttschicht

Der Bodenaufbau als unterer Abschluss der Aufenthaltsräume gegen das Erdreich fällt unter die Anforderungen an homogene Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse von  $m' > 100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  (DIN 4108-2 2013: 5.1.2.1) und einem Wärmedurchlasswiderstand von mindestens  $R_{\text{ref}} = 0,90 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$  (DIN 4108-2 2013: 5.1.2.1, Tabelle 3). Der höchst zulässige Wärmedurchgangskoeffizient für Bodenplatten von beheizten Räumen gegen Erdreich liegt bei  $U_{\text{ref}} = 0,35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$  (GEG 2020: Anlage 1).

Tabelle 5: Wärmeschutz, Bodenaufbau gegen Erdreich

	Ubakus	BKI	ref	✓ / X
R-Wert $\left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$	4,30	4,51	0,90	✓
U-Wert $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	0,23	0,25	0,35	✓

## Feuchteschutz

Das Periodenbilanzverfahren ist für erdberührte Bauteile nicht anwendbar (DIN 4108-3 2023: 5.2.1), daher weist Ubakus keine Berechnung aus. Allerdings zeigt das Temperaturverlaufdiagramm einen wahrscheinlichen Tauwasserausfall unterhalb der Dämmebene im Bereich der kapillarbrechenden Schotterschicht auf.

BKI berechnet dennoch die anfallende Tauwassermenge, um eine erste Abschätzung über das Bauteil treffen zu können.

$$M_c = 1,891 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} < M_{ev} = 2,415 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

## Fazit

Der geplante Bodenaufbau gegen das Erdreich erfüllt die gestellten Anforderungen der DIN 4108 und des Gebäudeenergiegesetz an den Wärmeschutz. Tauwasser fällt voraussichtlich zwischen Dämm- und kapillarbrechender Schicht an und kann in der Verdunstungsperiode vollständig abtrocknen. Außerdem kann an dieser Stelle angenommen werden, dass anfallende Feuchtigkeit von der Konstruktion durch die kapillarbrechende Schicht abgeleitet wird.

## Zusammenfassung

Alle Bauteile halten die im Gebäudeenergiegesetz festgelegten Höchstwerte für die Wärmedurchgangskoeffizienten des Referenzgebäudes ein. Analog dazu werden die Mindestanforderungen für Wärmedurchgangswiderstände der DIN 4108-2 erfüllt.

Die feuchteschutztechnischen Berechnungen zeigen, dass in allen Bauteilen, in denen Tauwasser anfällt, dieses in der Verdunstungsperiode wieder abtrocknen kann und sogar noch Trocknungsreserven bestehen. Die einzig kritische Stelle ist der Bereich zwischen Fachwerkkonstruktion und Innendämmung in den Außenwänden. Jedoch bleibt zu prüfen, wie die hygroskopische Eigenschaft von Hanfkalk und Lehm-

putz in Kombination mit einer Flächenwandheizung sich auf den Diffusionsdurchgang und den Tauwasserausfall auswirkt.

Außerdem ist das Periodenbilanzverfahren für inhomogene Bauteile nicht gut geeignet, da keine instationären Wärmeströme berücksichtigt werden (Heinzel 2024). „Das Periodenbilanzverfahren ist ein modellhaftes Nachweis- und Bewertungsverfahren [...] zur Beurteilung des klimabedingten Feuchteschutzes. Es bildet nicht die realen physikalischen Vorgänge in ihrer tatsächlichen zeitlichen Abfolge ab. Das Periodenbilanzverfahren erlaubt keine abschließende Bewertung des Risikos von Korrosion oder Pilzbefall.“ (DIN 4108-3 2023: 5.2.1)

*Tabelle 6: Zusammenfassung, Wärme- & Feuchteschutz nach Bauteil*

Bauteil	Mindestwärmeschutz		Mindestfeuchteschutz	
	Erfüllt	Nicht erfüllt	Erfüllt	Nicht erfüllt
Außenwand	✓		✓/ X	
Oberste Geschossdecke	✓		✓	
Dach	✓		✓	
Bodenaufbau gegen Erdreich	✓		✓/ X	

## Fenster

Um dem traditionell handwerklichen und ressourcenschonenden Anspruch des Naturdorf Bärnau gerecht zu werden, sind Sprossenfenster aus Lärchenholz (Abbildung 13) von eigens angestellten Schreibern hergestellt worden. Die Fenster bestehen aus zwei Flügeln mit insgesamt 6 Scheibefeldern. Bei der Verglasung handelt es sich um zweifach Isolierglas aus mundgeblasenen Glasscheiben der Firma Lamberts, die zu den letzten Herstellern von mundgeblasenem Flachglas (Abbildung 14) weltweit gehört und ihren Firmensitz nur 30 km von Bärnau entfernt haben. Die zweifachverglaste Isolierscheibe besteht aus einer ca. 2

mm starken mundgeblasenen Flachglasscheibe außen und einer 3 mm starken Floatglasscheibe innen. Der dazwischenliegende Scheibenzwischenraum von 6mm ist mit Krypton gefüllt. Damit erhält man eine Gesamtdicke von 11 bis 12 mm mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U_g = 1,5 \frac{W}{m^2K}$  (Hrsg.: Glashütte Lamberts Waldsassen GmbH).



Abbildung 13: Fensterrahmen mit Flügel, Naturdorf Bärnau



Abbildung 14: Isolierglas von Solling Glas mit mundgeblasenem Glas von Lamberts, Naturdorf Bärnau

Im Gesamten erzielt das Fenster nach erster händischer Berechnung (Anhang E1) einen Wärmedurchgangskoeffizienten von

$$U_w = 2,07 \frac{W}{m^2K}$$

Damit wird der angegebene Grenzwert an den U-Wert von  $U_{w,ref} = 1,3 \frac{W}{m^2K}$  (GEG 2020: Anlage 1) überschritten. Bei dieser Berechnung handelt es sich um eine Zuschlagsrechnung für Sprossenfenster nach Produktnorm EN 14351-1. Hierbei wird zunächst der  $U_w$ -Wert desselben Fensters ohne Sprossen ermittelt und anschließend mit einem Zuschlagswert beaufschlagt (Hrsg.: ift Rosenheim 2014: S.6). Diese Zuschlagswerte, abhängig von der Sprossenart, sind zwar einfach anzuwenden, jedoch für Sprossenfenster in vielen Fällen unangemessen hoch (Hrsg.: Bundesverband Flachglas e.V. 2017: S.2). Deshalb ist für eine exakte Berechnung der Sprossenfenster ein geeignetes Fachbüro mit verifizierten Berechnungsprogrammen zu empfehlen.

## Hauseingangstür

Für Außentüren wird ein Wärmedurchgangskoeffizienten von maximal  $U_{D,ref} = 1,8 \frac{W}{m^2K}$  vorgeschrieben (GEG 2020: Anlage 1). Die finale Konstruktion der Außentür befindet sich noch in der Planungsphase.

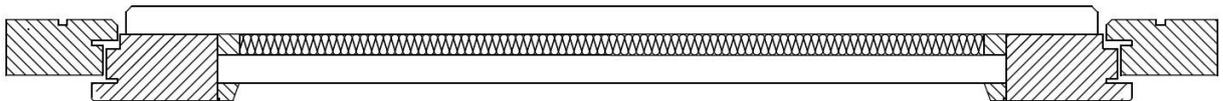


Abbildung 15: Horizontalschnitt Haustür, Naturdorf Bärnau

Abbildung 15 zeigt den bisher geplanten Aufbau der Eingangstür. Es handelt sich um einen zweischaligen Aufbau mit dazwischenliegender Stopfhandämmung. Für die Berechnung wird eine Schalstärke von 24 mm mit einem 20 mm Dämmkern angenommen. Der daraus händisch errechnete Wärmedurchgangskoeffizient hält den geforderten Grenzwert ein (Anhang E2).

$$U_D = 1,04 \frac{W}{m^2K}$$

Eine genaue Berechnung der tatsächlich gebauten Tür muss nach Abschluss der endgültigen Planung nochmals vorgenommen werden. Da die Anforderungen für die Ermittlung des U-Wertes von Außentüren unter dieselbe Produktnorm wie Fenster fallen (Hrsg.: ift Rosenheim 2014: S.1), muss für eine solche Berechnung ein verifizierte Berechnungsprogramm herangezogen werden.

# Wärmebrücken

## Einführung

Wärmebrücken sind Stellen in der Gebäudehülle, an denen erhöhte Transmissionswärmeverluste auftreten. Es herrscht ein erhöhter Wärmestrom, der zu niedrigeren raumseitigen Temperaturen führt. Dadurch kann es zur Kondensierung von warmer feuchter Raumluft an der Oberfläche kommen, was wiederum zur Schimmelpilzbildung führen kann (Beuth 2024). Solche Stellen ergeben sich immer in Bereichen, an denen unterschiedliche Materialien oder Bauteile aufeinandertreffen. Diese Bereiche gilt es besonders gut und im besten Fall vollständig zu überdämmen.



*Abbildung 16: Anschlussstelle Außenwand, Dach*

Auftretende Wärmebrücken im Fachwerkbau können ohne eine Außendämmung nur schwer vermieden werden. Eine Außendämmung des Gebäudes ist allerdings im Bestand aus Denkmalschutzgründen nicht möglich oder, wie im Fall des Naturdorfs Bärnau, aus gestalterischen Gründen nicht erwünscht. Daher ist die Planung und Ausführung von Anschlussdetails ein wichtiger Aspekt, um Wärmeverluste an diesen Stellen zu vermeiden.

## Gleichwertigkeitsnachweis

Durch einen Gleichwertigkeitsnachweis mit den Planungsbeispielen zur Vermeidung von Wärmebrückeneinwirkungen (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.4) kann ein Zuschlag für Transmissionswärmeverluste ermittelt werden. Dieser ist für eine weitere energetische Bilanzierung eines Gebäudes notwendig und ausschlaggebend. Dieser Gleichwertigkeitsnachweis kann bildlich oder rechnerisch erfolgen (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.4.1) und es werden zwei Kategorien von Wärmebrücken beschrieben. Kategorie A und B (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.2). Diese unterscheiden zwei energetische Niveaus, wobei Kategorie B als höherwertig einzustufen ist. Die Höhe des Wärmebrückenzuschlags richtet sich nach der nachgewiesenen Kategorie.

Für die Ermittlung des Wärmebrückenzuschlags von Gebäude C wird ein bildlicher Gleichwertigkeitsnachweis vorgenommen. Bei allen Planungsbeispielen für Anschlussausführungen handelt es sich im Holzbau um Wärmebrücken der Kategorie B.

## Bedingungen

Es ist zu untersuchen, ob eine eindeutige Zuordnung des konstruktiven Grundprinzips und eine Übereinstimmung der Bauteilabmessungen und Baustoffeigenschaften vorliegen (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.4.2 a)).

## 1. Konstruktives Grundprinzip

Die Planungsbeispiele für den Holzbau sind mit einer außenseitigen Wanddämmung abgebildet und gelten auch für Holzbaukonstruktionen mit Innendämmung (DIN 4108 Beiblatt 2 2019), wie im Fall des Naturdorf Bärnau. Daher wird die geplante Innendämmschicht mit der ausgewiesenen Außendämmung verglichen. Alle Außenbauteile halten für sich das konstruktive Grundprinzip ein. Deshalb bleibt nur noch zu prüfen, ob der Anschluss zweier Bauteile konstruktiv mit den Planungsbeispielen übereinstimmt.

## 2. Bauteilabmessungen

Für diese Bedingung wird nur die Dämmstärke von geforderten Überdämmungen von Anschlusselementen betrachtet.

Die Dämmschichtdicken von Wand, Boden gegen Erdreich und Dach erfüllen alle die geforderten Dämmschichtabmessungen.

*Tabelle 7: Dämmstärken, Gleichwertigkeitsnachweis Wärmebrücken*

Bauteil	$d_{\text{ref}}$ [cm]	d [cm]	✓ / ✗
Außenwand	10	12	✓
Innendämmung	6	19	✓
Boden gegen Erdreich	10	22	✓
Dach	14	28	✓

### 3. Baustoffeigenschaften

Bei abweichender Wärmeleitfähigkeit der Materialien hat der Gleichwertigkeitsnachweis über den Wärmedurchlasswiderstand R der jeweiligen Schicht zu erfolgen (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.4.2 b)). Da die Wärmeleitfähigkeit der geplanten Dämmmaterialien vom vorgegebenen Bemessungswert  $\lambda = 0,035 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$  (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 7.1 Tabelle 3) abweicht, ist in jedem Fall ein Nachweis über den R-Wert zu führen. Bei den geplanten Dämmmaterialien handelt es sich um Hanfkalk und Hanfwolle mit Wärmeleitfähigkeiten von  $\lambda = 0,068 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$  und  $\lambda = 0,04 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ .

Bis auf die Dämmung der Außenwand erfüllen alle Dämmebenen den geforderten Mindestwärmedurchlasswiderstand. Aber es ist bereits gezeigt worden, dass die Bauteile der Gebäudehülle alle Anforderungen an den Mindestwärmeschutz einhalten.

Daher bleibt nur der R-Wert einer zusätzlich geforderten Überdämmung zu prüfen.

*Tabelle 8: R-Werte, Gleichwertigkeitsnachweis Wärmebrücken*

Bauteil	$R_{\text{ref}} \left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$	$R \left[ \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right]$	✓ / ✗
Außenwand	2,85	1,76	✗
Innendämmung	1,71	2,79	✓
Boden gegen Erdreich	2,86	3,24	✓
Dach	4	7	✓

## Bodenplatte gegen Erdreich

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.3.4, Tabelle 10, Nr. 34

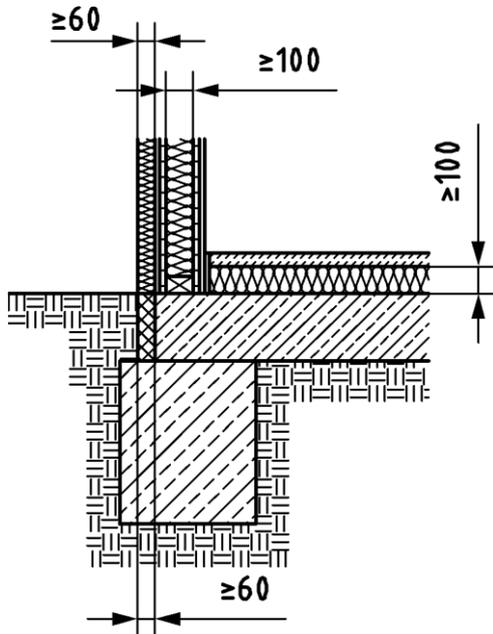


Abbildung 17: Bodenplatte gegen Erdreich, DIN 4108

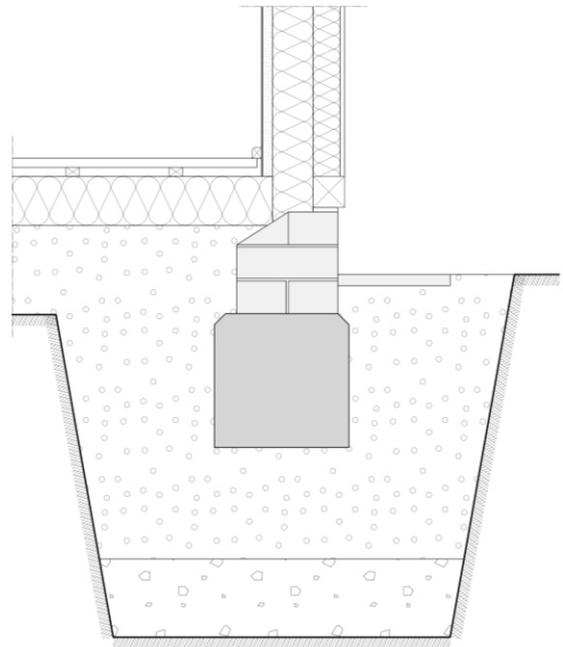


Abbildung 18: Bodenplatte gegen Erdreich, Naturdorf Bärnau

Abbildung 18 zeigt, dass keine Bodenplatte vorhanden ist. Daher ist auch eine umlaufende Stirndämmung von mindestens 6 cm nicht vorhanden und nicht nötig. Die auftretenden Vertikallasten werden über den Natursteinsockel direkt in die Streifenfundamente geleitet. Die Hanfkalkdämmschicht dient der Wärmedämmung gegen das Erdreich und bildet mit der Außenwanddämmung eine durchlaufende Dämmebene. Eine ausreichende Überdämmung der Schwelle und des Sockelbereichs ist gegeben.

Tabelle 9: Gleichwertigkeitsnachweis Bodenplatte gegen Erdreich

Bedingung	✓ / X	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

# Innenwand auf Bodenplatte

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.7.1, Tabelle 21, Nr. 85

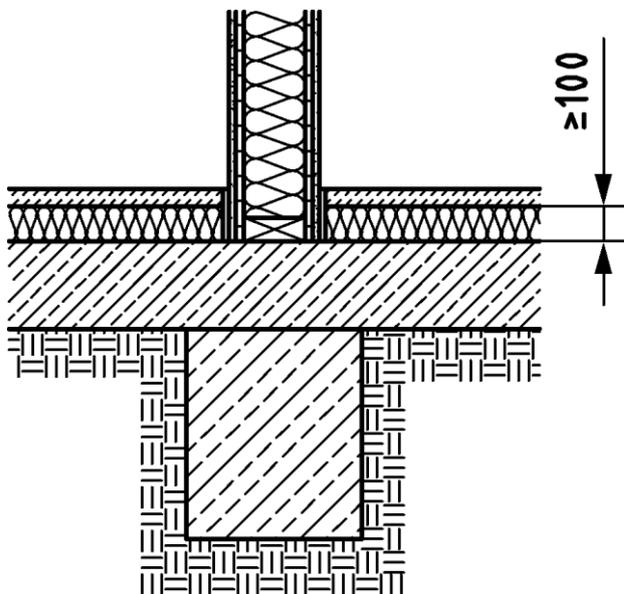


Abbildung 19: Innenwand auf Bodenplatte, DIN 4108

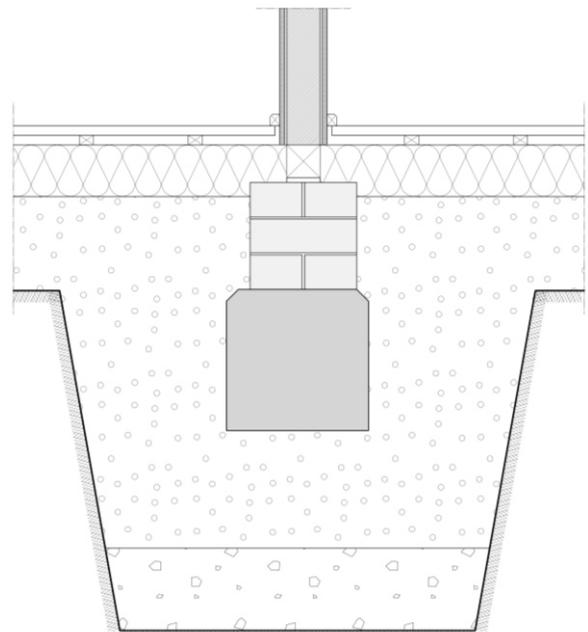


Abbildung 20: Innenwand auf Bodenplatte, Naturdorf Bärnau

Die Innenwand durchbricht die Dämmebene mit der Schwelle auf voller Länge. Abbildung 20 zeigt, dass die Schwelle anders als in Abbildung 19 bündig mit der Dämmschicht abschließt. Eine ausreichende Überdämmung der Schwelle wird durch die Ausfachung aus Leichtlehmsteinen ( $\lambda = 0,035 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ ) gewährleistet.

Tabelle 10: Gleichwertigkeitsnachweis, Innenwand auf Bodenplatte

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

## Innenwandeinbindung an Außenwand

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.7.5, Tabelle 37, Nr. 161

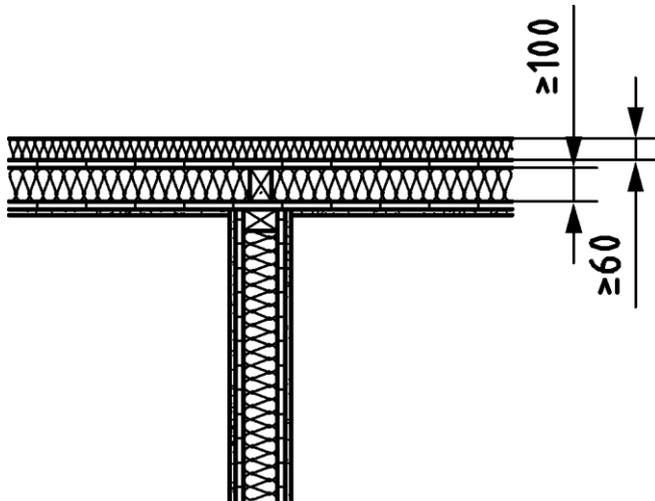


Abbildung 21: Innenwandeinbindung an Außenwand,  
DIN 4108

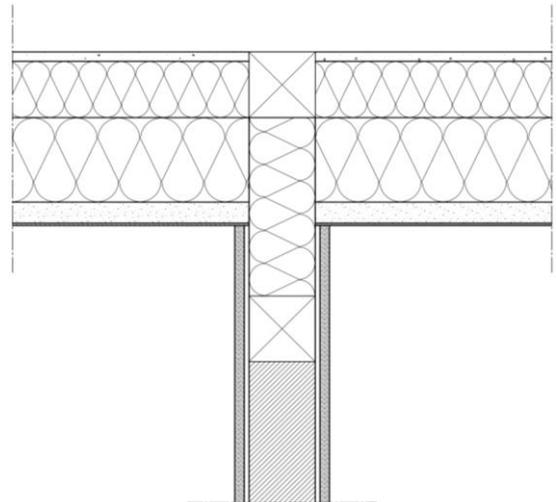


Abbildung 22: Innenwandeinbindung an Außenwand,  
Naturdorf Bärnau

Schwelle und Rähm der Innenwand durchstoßen die innere Dämmebene, was bei Innenwänden, die der Aussteifung dienen, nicht zu vermeiden ist. Damit ist eine durchlaufende Dämmung nicht vollumfänglich gewährleistet. Allerdings können diese konstruktiv notwendigen Durchdringungen vernachlässigt werden (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.5).

Tabelle 11: Gleichwertigkeitsnachweis, Innenwand an Außenwand

Bedingung	✓ / X	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

# Innenwand an Dach

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.7.7, Tabelle 39, Nr. 171

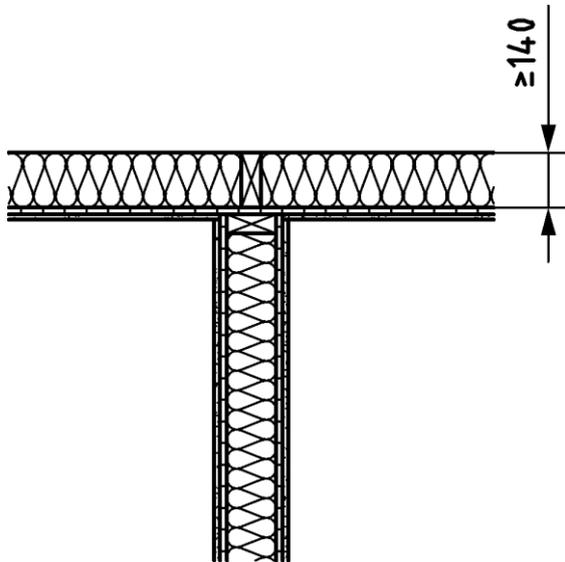


Abbildung 23: Innenwand an Dach, DIN 4108

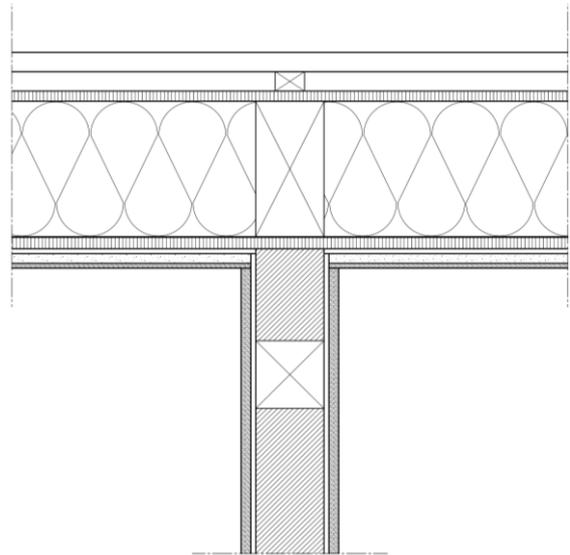


Abbildung 24: Innenwand an Dach, Naturdorf Bärnau

Tabelle 12: Gleichwertigkeitsnachweis Innenwand an Dach

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

# Geschossdecke

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.9.3, Tabelle 44, Nr. 186

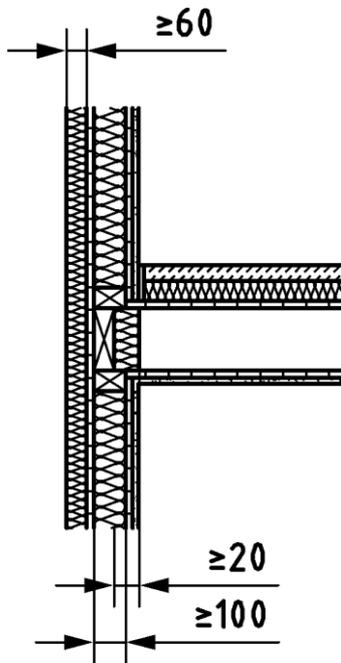


Abbildung 25: Einbindende Geschossdecke, DIN 4108

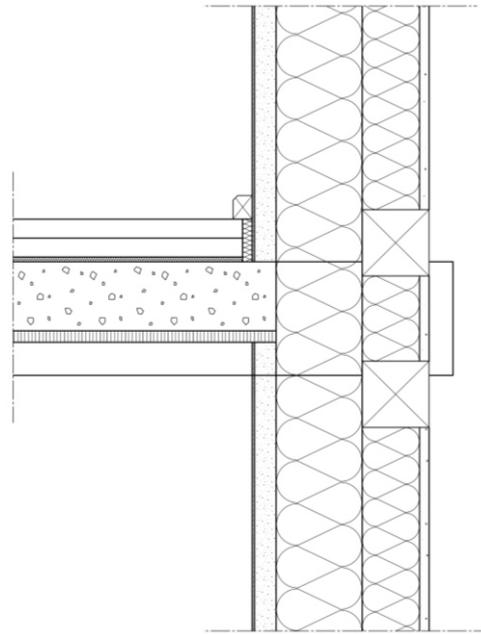


Abbildung 26: Einbindende Geschossdecke, Naturdorf Bärnau

Im Deckenbereich wird eine zusätzliche innenseitige Überdämmung von mindestens 2 cm der horizontalen Bauteile gefordert. Da es sich im Naturdorf um eine Konstruktion mit Innendämmung handelt, wird diese Mindestüberdämmung eingehalten. Die Durchdringungen der Deckenbalken können vernachlässigt werden (DIN 4108 Beiblatt 2 2019: 5.5).

Tabelle 13: Gleichwertigkeitsnachweis, Geschossdecke

Bedingung	✓ / X	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

# Fensterbrüstung

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.13.4, Tabelle 60, Nr. 224

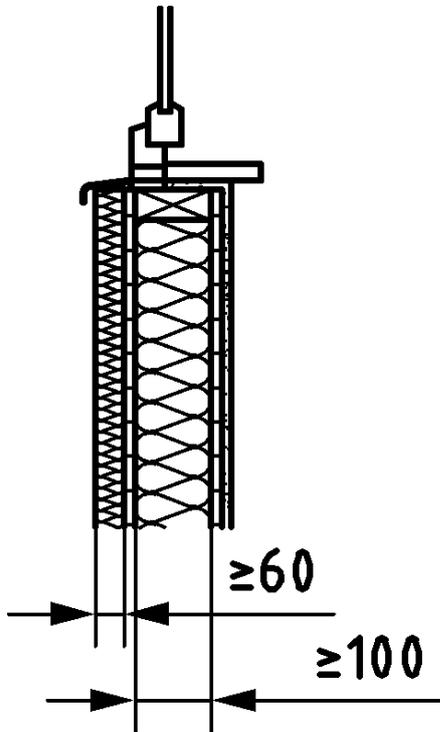


Abbildung 27: Fensterbrüstung DIN 4108

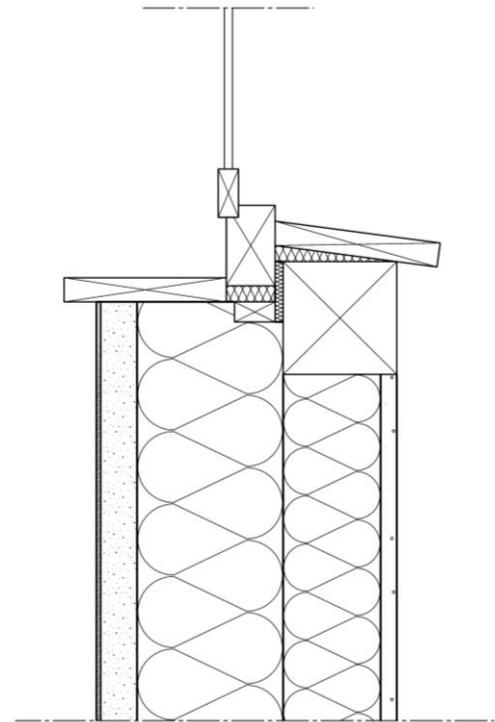


Abbildung 28: Fensterbrüstung, Naturdorf Bärnau

Tabelle 14: Gleichwertigkeitsnachweis, Fensterbrüstung

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

# Fensterlaibung

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.14.4, Tabelle 64, Nr. 230

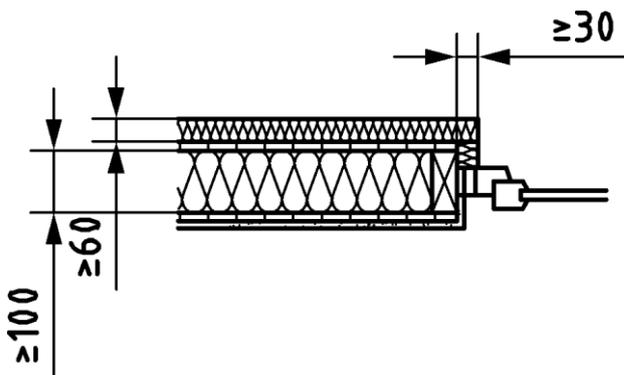


Abbildung 29: Fensterlaibung, DIN 4108

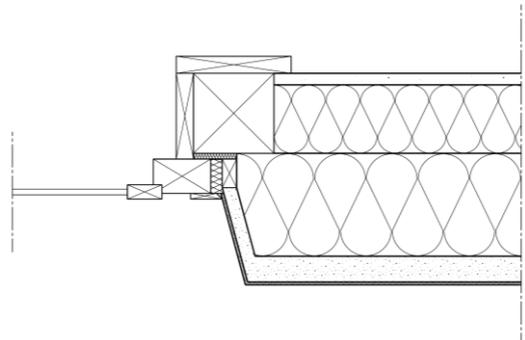


Abbildung 30: Fensterlaibung, Naturdorf Bärnau

Die in Abbildung 29 geforderte Mindestüberdämmung der Anschlussfuge von 3 cm ist in Abbildung 30 nicht gegeben.

Tabelle 15: Gleichwertigkeitsnachweis, Fensterlaibung

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✗	✗
2	✗	
3	✗	

# Fenstersturz

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.15.4, Tabelle 68, Nr. 248

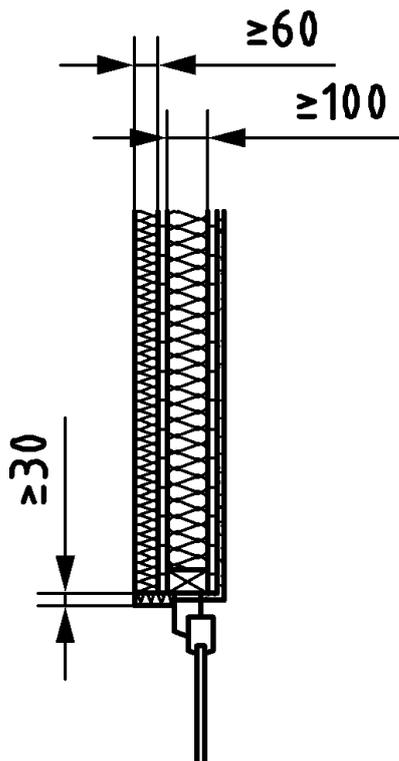


Abbildung 31: Fenstersturz, DIN 4108

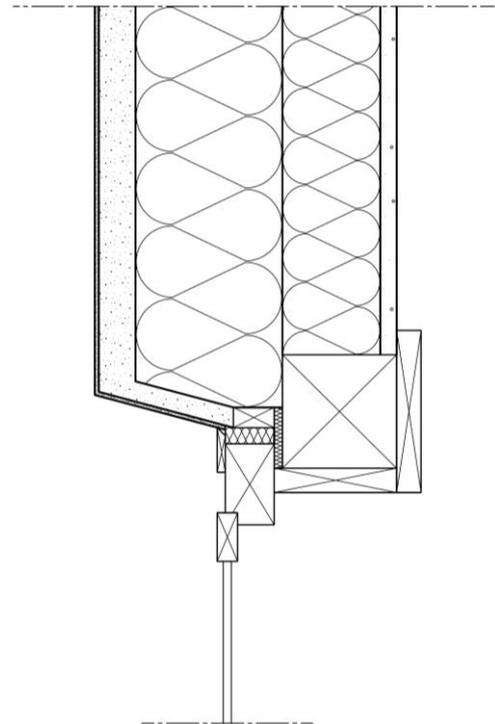


Abbildung 32: Fenstersturz, Naturdorf Bärnau

Die in Abbildung 31 geforderte Mindestüberdämmung der Anschlussfuge von 3 cm ist in Abbildung 32 nicht gegeben.

Tabelle 16: Gleichwertigkeitsnachweis, Fenstersturz

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✗	✗
2	✗	
3	✗	

# Giebelwand

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.18.4, Tabelle 80, Nr. 309

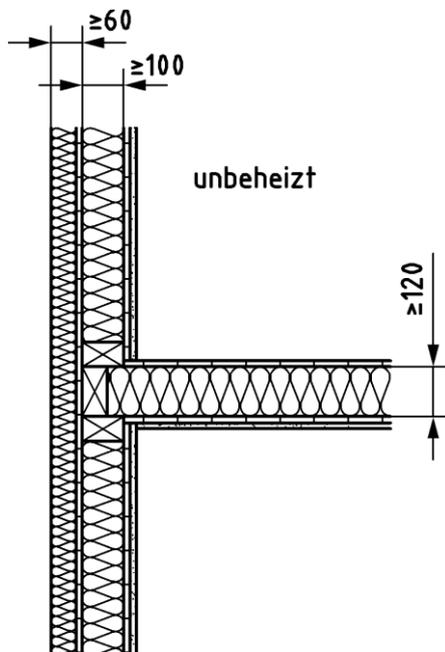


Abbildung 33: Giebelwand zum unbeheizten Geschoss, DIN 4108

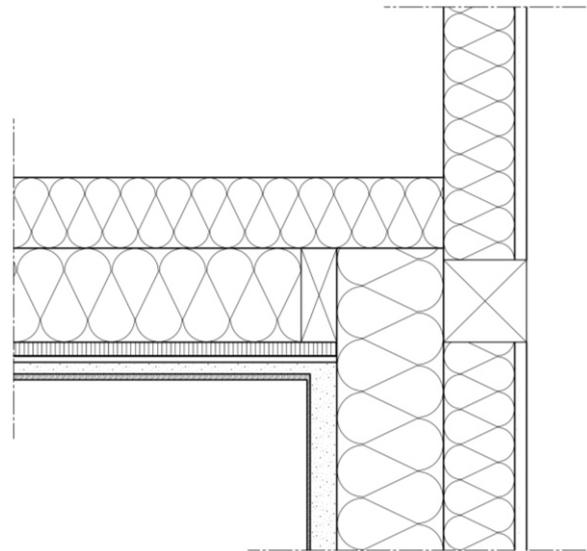


Abbildung 34: Giebelwand zum unbeheizten Geschoss, Naturdorf Bärnau

Abbildung 34 zeigt, dass im Bereich des unbeheizten Geschosses auf die Innendämmung verzichtet wurde. Der sich daraus ergebende Wärmedurchlasswiderstand der Dämmschicht erfüllt die Mindestanforderungen der Wanddämmschicht nicht. Dennoch ist eine ausreichende Überdämmung der horizontalen Bauteile gegeben.

Tabelle 17: Gleichwertigkeitsnachweis, Giebelwand an unbeheiztes Geschoss

Bedingung	✓ / X	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	X
2	X	
3	X	

# Ortgang

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.19.4 Tabelle 84, Nr. 318

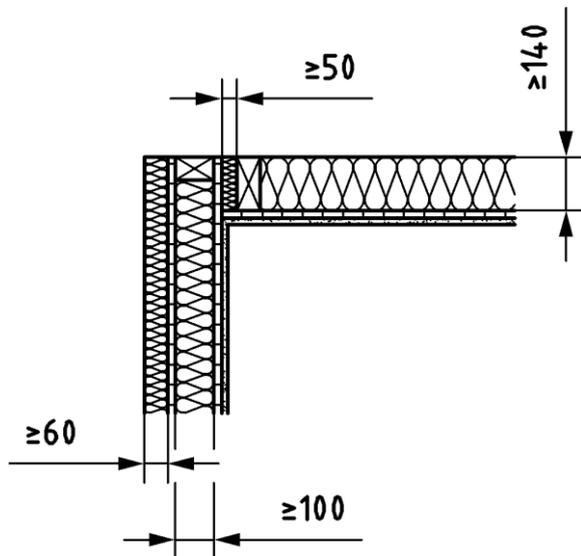


Abbildung 35: Ortgang an Steildach, DIN 4108

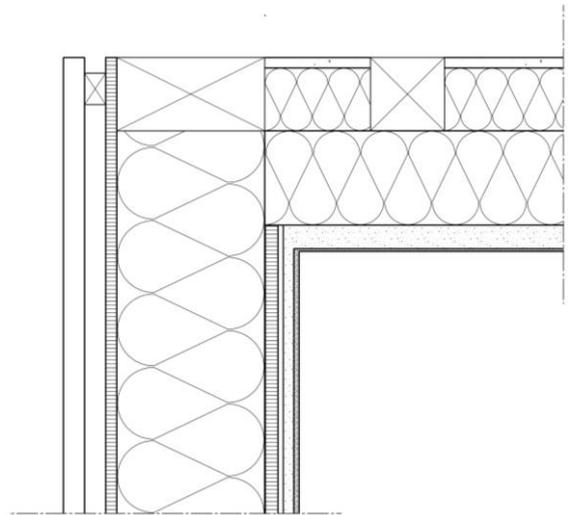


Abbildung 36: Ortgang an Steildach, Naturdorf Bärnau

Die geforderte Anschlussdämmung in Abbildung 35 von 5 cm kann im Anschlussbereich der horizontalen Bauteile der Ortgangwand nicht geleistet werden. Außerdem gewährleistet die Innendämmung von 19 cm eine ausreichende Überdämmung der Anschlussstellen.

Tabelle 18: Gleichwertigkeitsnachweis, Ortgang an Steildach

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✗
2	✗	
3	✗	

# Pfettendach

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.21.4, Tabelle 92, Nr. 348

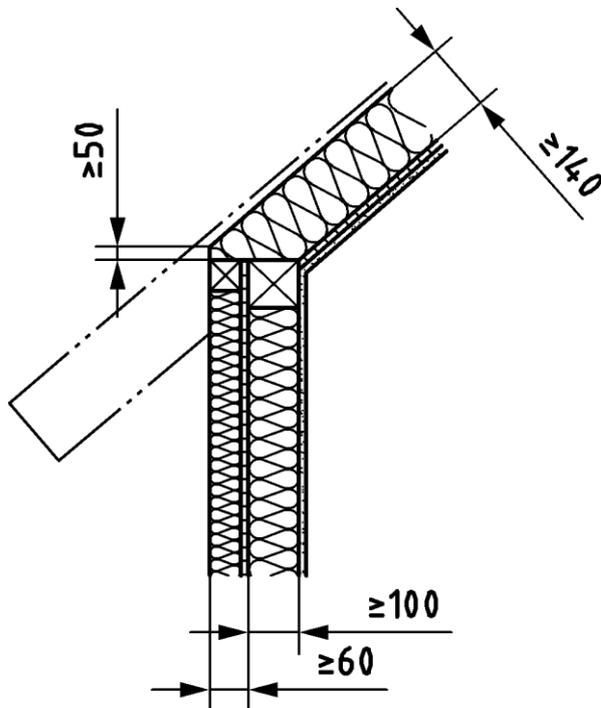


Abbildung 37: Steildach Schwellenanschluss, DIN 4108

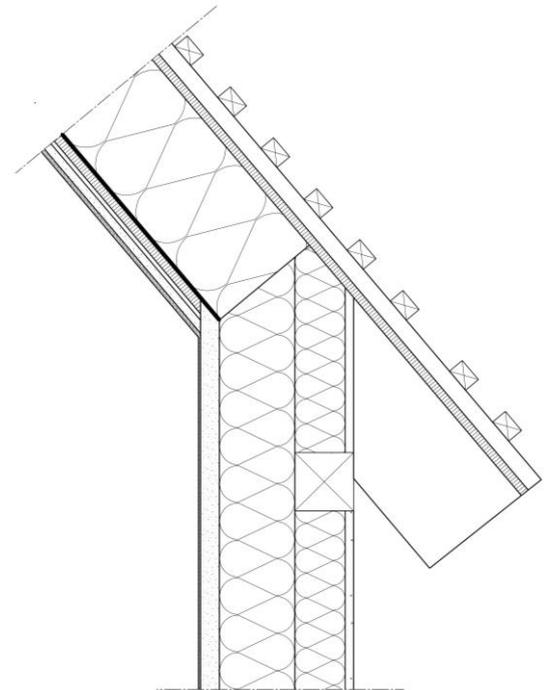


Abbildung 38: Steildach Schwellenanschluss, Naturdorf Bärnau

Aus Montagegründen wird in Abbildung 38 die Außenwanddämmung bis gegen die Dachhaut geführt. Es ergibt sich ein homogener Übergang der Dämmebene in die Dachebene. Damit ist die geforderte Dämmung zwischen Schwelle und Dachhaut von mindestens 5 cm eingehalten.

Tabelle 19: Gleichwertigkeitsnachweis, Steildach Schwellenanschluss

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

# First

DIN 4108 Beiblatt 2, 7.27, Tab. 104, Nr. 390

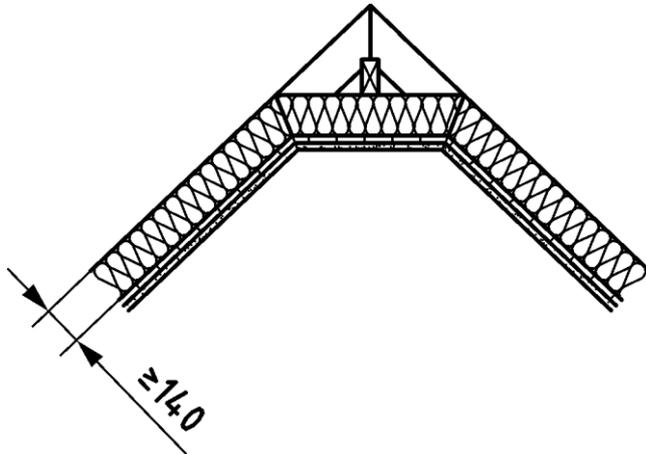


Abbildung 39: Steildach Firstanschluss, DIN 4108

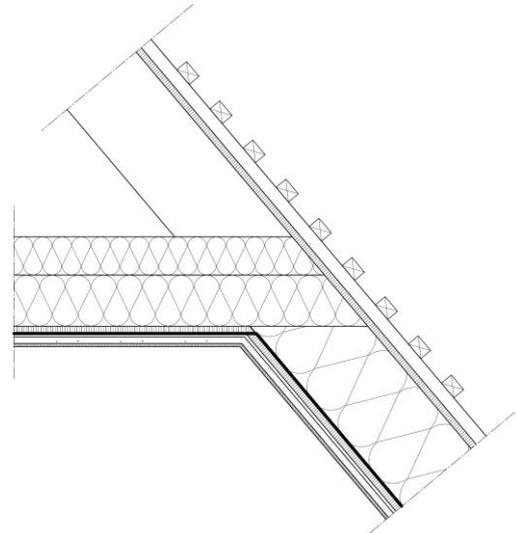


Abbildung 40: Steildach Firstanschluss, Naturdorf Bärnau

Tabelle 20: Gleichwertigkeitsnachweis, Steildach Firstanschluss

Bedingung	✓ / ✗	Erfüllung Gleichwertigkeitsnachweis
1	✓	✓
2	✓	
3	✓	

## Ergebnisse und Evaluierung

Dreiviertel der Ausführungsdetails im Naturdorf Bärnau entsprechen den Empfehlungen für Anschlussdetails. Allerdings schließt eine bildliche Abweichung einen geringen Wärmeverlust nicht direkt aus. Eine genauere rechnerische Bewertung der einzelnen Anschlussstellen ist daher empfehlenswert, um eine vollumfängliche Aussage über den Einfluss der Wärmebrückenverluste zu treffen

Aus diesem Grund wird für die energetische Bilanzierung mit einem pauschalen Wärmebrückenzuschlag von  $0,1 \frac{W}{m^2K}$  (Hrsg.: KfW 2015: S.1) gearbeitet.

Aber aus konstruktiver Sicht, dem Anspruch an ein Sichtfachwerk und dem gewünschten Verzicht auf industriell vorgefertigte Anschlussprodukte, sind die Ausführungsdetails im Naturdorf Bärnau gut geplant und ein vollumfänglicher Nachweis ist mit einer Neuplanung möglich.

*Tabelle 21: Ergebnis, Gleichwertigkeitsnachweis Wärmebrücken*

Wärmebrücke	Bildlicher Gleichwertigkeitsnachweis	
	Erfüllt	Nicht erfüllt
Bodenplatte gegen Erdreich	✓	
Innenwand auf Bodenplatte	✓	
Innenwand an Außenwand	✓	
Innenwand an Dach	✓	
Einbindende Geschossdecke	✓	
Fensterbrüstung	✓	
Fensterlaibung		✗
Fenstersturz		✗
Giebelwand zum unbeheizten Geschoss		✗
Ortgang an Steildach		✗
Steildach Schwellenanschluss	✓	
Steildach Firstanschluss	✓	

# Energetische Bilanzierung Haus C

## Allgemein

Für eine energetische Beurteilung von Gebäuden wird über die Eingabe in ein Energieplanungsprogramm untersucht, wie hoch der Primärenergiebedarf und der bauliche Wärmeschutz im Vergleich zum Referenzgebäude ist.

Das Referenzgebäude ist hierbei eine Art theoretisches Hilfsgebäude, das die gleiche Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung aufweist, wie das zu errichtende Gebäude und den technischen Referenzausführungen entspricht (Hrsg.: Heinze GmbH 2024).

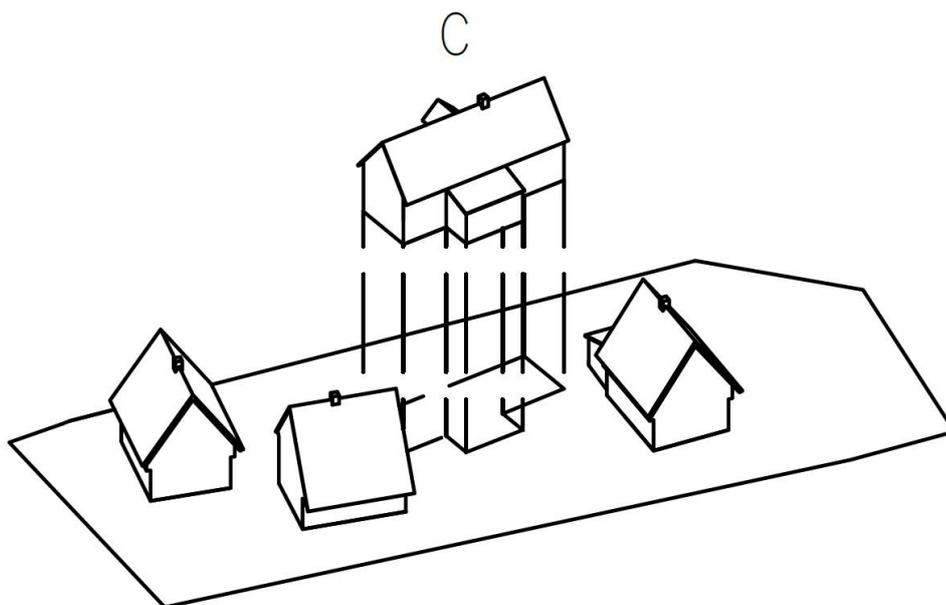


Abbildung 41: Isometrie der geplanten Gebäude im Naturdorf Bärnau

Dafür müssen Kubatur, beheizte und unbeheizte Zonen im Gebäude, Lage, Ausrichtung und äußere Randbedingungen ermittelt und eingegeben werden. Im nächsten Schritt sind alle Bauteile der Gebäudehülle einzugeben. Dabei ist der U-Wert der Bauteilaufbauten ausschlaggebend. Den einzelnen Bauteilaufbauten wird die tatsächlich verbaute Fläche in Abhängigkeit der Ausrichtung zugeordnet.

## Grenzwerte

Der bauliche Wärmeschutz wird über den Transmissionswärmeverlust  $H'_t$  in  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$  definiert. Mit dem Transmissionswärmeverlust wird der Wärmeverlust der wärmeübertragenden Umfassungsfläche eines Gebäudes bezeichnet (Hrsg.: Heinze GmbH 2024) und beschreibt damit den mittleren U-Wert eines Gebäudes. Je geringer dieser Wert ausfällt, umso besser ist die Außenhülle gedämmt. Es darf das 1,0 fache des entsprechenden Wertes des Referenzgebäudes nicht überschritten werden (GEG 2020: §16).



Abbildung 42: Ansicht Gebäude C

Der Primärenergiebedarf  $Q_p$  in  $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}}\right]$  beschreibt die benötigte Energiemenge eines Gebäudes pro Quadratmeter pro Jahr. Dieser Jahres-Primärenergiebedarf darf das 0,55 fache des Jahres-Primärenergiebedarfs des Referenzgebäudes nicht überschreiten (GEG 2020: §16). Dabei wird auch die zusätzliche Energiemenge berücksichtigt, die bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung von Brennstoffen entsteht. Auch hier gilt: je kleiner der Wert, umso geringer und damit sparsamer ist der

benötigte Energiebedarf eines Gebäudes. Bei dem ermittelten Referenzwert handelt es sich bereits um die 55%-Schwelle.

Durch die Eingabe in BKI ergeben sich folgende Grenzwerte des Referenzgebäudes, die einzuhalten sind, um einen GEG Nachweis zu erfüllen:

$$H'_t = 0,354 \frac{W}{m^2K}$$

$$Q_p = 66,20 \frac{kWh}{m^2a}$$

## Eingabe

### Stammdaten

Alle Bauteileingaben werden nach dem aktuellen Ausführungs- und Planungsstand getätigt. Für die Ermittlung der Kubatur und Ausrichtung des Gebäudes wird der Ab- und Bundplan herangezogen. Tabelle 22 zeigt die sich daraus ergebenden U-Werte der einzelnen Bauteile.

Für  $Q_p$  ist nicht nur der Transmissionswärmeverlust ausschlaggebend, sondern auch die Art der verbauten Heiztechnik und der genutzten Energieträger. Im Naturdorf Bärnau handelt es sich dabei um eine zentrale Pelletheizung mit Pufferspeicher, die durch Photovoltaik und Solarthermie unterstützt wird. Damit wird auf fossile Energieträger vollständig verzichtet. Die Konzipierung der Haustechnikanlage als Nahwärmenetz für alle vier Gebäudeunterstreicht den regenerativen und ressourcenschonenden Ansatz des Projektes, muss aber rechnerisch auf ein Gebäude umgelegt werden. Daher erfolgt die Eingabe in BKI über das Assistenztool für Anlagentechnik. Dabei ermittelt das Programm die passende Dimension der eingegebenen Anlagentechnik für die Größe des Gebäudes.

Tabelle 22: BKL, U-Werte Bauteile

Bauteil	U-Wert $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$	U <sub>ref</sub> GEG $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$	✓ / ✗
Bodenaufbau gegen Erdreich	0,25	0,35	✓
Außenwand Fachwerk	0,22	0,28	✓
Außenwand Fachwerk verschalt	0,20	0,28	✓
Oberste Geschossdecke	0,14	0,20	✓
Dachaufbau über beheizt	0,16	0,20	✓
Haustüre	1,04	1,8	✓
Fenster	2,07	1,3	✗
Wärmebrückenzuschlag	0,10	0,03	✗

Die eingegebenen Stammdaten reichen bei weitem aus, um den geforderten Wert des Primärenergiebedarfs einzuhalten, während die Mindestanforderung an den Transmissionswärmeverlust nicht erfüllt wird.

Um einen Nachweis nach GEG 2020 zu erfüllen, muss in erster Linie, den Transmissionswärmeverlust weiter zu minimieren.

Deshalb werden weitere Varianten erarbeitet, um zu prüfen, an welchen Stellen der Gebäudehülle noch Änderungen vorgenommen werden müssen.

#### Variante 1: Dämmebene

Betrachtet man in der Dämmebene nur die massiven Bauteile, so ist der Bodenaufbau gegen das Erdreich das Bauteil mit dem höchsten U-Wert und damit dem größten Transmissionswärmeverlust. Allerdings reicht eine Erhöhung der Bodendämmung nicht aus, um den Grenzwert für  $H'_t$  zu erfüllen. Daher wird in Variante 1 die gesamte Dämmebene des Gebäudes auf 50 cm erhöht.

## Variante 2: Wärmebrückenzuschlag

Beim bildlichen Gleichwertigkeitsnachweis handelt es sich ausschließlich um Wärmebrücken der Kategorie B. Unter der Annahme, dass eine vollumfängliche Übereinstimmung mit den Planungsbeispielen nachgewiesen werden kann, darf der Wärmebrückenzuschlag von  $0,10 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$  auf bis zu  $0,03 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$  verringert werden.

## Variante 3: Fenster

Da die Fenster als einziges Bauteil nicht die Mindestanforderungen erfüllen, wird in Variante 3 für die Fenster der geforderte Mindestwärmedurchgangskoeffizient von  $U_W = 1,30 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$  (GEG 2020: Anlage 1) angenommen.

## Ergebnisse und Evaluierung

Tabelle 23 stellt die Ergebnisse für den Transmissionswärmeverlust und den Primärenergiebedarf der Stammdaten und aller Varianten gegenüber, und zeigt, welche Positionen den Nachweis erfüllen. Die detaillierten Berichte finden sich in Anhang F1 bis F4.

Tabelle 23: Ergebnisse energetische Bilanzierung, Stammdaten & Varianten

	$H'_t \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	Abweichung [%]	✓ / ✗	$Q_P \left[ \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{a}} \right]$	Abweichung [%]	✓ / ✗
Referenzwert	0,354			66,20		
Stammdaten	0,384	+8,5	✗	30,2	-54,0	✓
Variante 1	0,315	-10,9	✓	26,9	-59,3	✓
Variante 2	0,314	-11,3	✓	26,9	-59,4	✓
Variante 3	0,343	-3,1	✓	28,4	-57,1	✓

Obwohl die Außenbauteile, bis auf die Fenster, einzeln betrachtet die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz erfüllen, reicht es dennoch nicht aus, um den Mindestwert an  $H_t$  einzuhalten. Der errechnete Wert übersteigt den geforderten Grenzwert um 8,5 %. Der Grenzwert des Primärenergiebedarfs wird sowohl in den Stammdaten als auch in allen Varianten eingehalten.

## Variante 1

Einer Erhöhung der Dämmstärke von durchschnittlich 26 cm auf umlaufend 50 cm wäre notwendig, um den Grenzwert für  $H_t$  einzuhalten und diesen sogar, um ein Zehntel zu unterschreiten. Die Erhöhung der Dämmschicht um im Durchschnitt circa 22 cm hat einer Veränderung der Gebäudekubatur zur Folge, die in Variante 1 nicht berücksichtigt wird. Um die gewünschten Wohnflächen beizubehalten, müssten die exakten Gebäudeabmessungen neu definiert und der Grundriss angepasst werden. Bei dieser geringen Veränderung der Gebäudeabmessungen ist davon auszugehen, dass die Einhaltung der Mindestanforderungen dennoch gewährleistet bleibt. Allerdings übersteigt das In-Situ-Verfahren bei einer Einbaustärke von 50 cm seine wirtschaftlichen Grenzen. Außerdem fordert der hohe Feuchteeintrag lange Trocknungs- und damit Bauzeiten.

## Variante 2

Durch die Minimierung des Wärmebrückenzuschlags von  $0,10 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$  auf  $0,03 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$  kommt es zu einem ähnlichen Ergebnis wie in Variante 1 und damit zur Einhaltung der Grenzwerte ohne eine Veränderung der Gebäudekubatur. Der bildliche Gleichwertigkeitsnachweis hat bereits gezeigt, dass drei Viertel der untersuchten Wärmebrücken der Kategorie B entsprechen. Eine vollumfängliche Übereinstimmung ist daher nach einer Neuplanung realistisch zu gewährleisten.

## Variante 3

Wird für die Fenster der geforderte Mindestwärmedurchgangskoeffizient von  $U_W = 1,30 \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$  (GEG 2020: Anlage 1) angenommen, reicht dieser bereits aus, um die Mindestanforderung an den Transmissionswärmeverlust einzuhalten. Eine genaue Ermittlung von  $U_W$  bleibt daher abzuwarten. Das Ergebnis von Variante 3 zeigt, dass durch einen Einbau von heutzutage üblichen Standardfenstern der Grenzwert an  $H'_t$  in jedem Fall eingehalten werden kann.

## Zusammenfassung

In seinem jetzigen Planungszustand hält das Gebäude einem Nachweis nach GEG nicht Stand.

Während der Grenzwert für den Primärenergiebedarf in jedem Fall eingehalten wird, reicht die Bestandsplanung der Stammdaten nur minimal nicht aus, um die Mindestanforderungen an den Transmissionswärmeverlust zu erfüllen. Die dargestellten Varianten zeigen, dass die Bauweise des Naturdorf nur leichte Anpassungen benötigt, um einen Nachweis nach GEG zu erfüllen.

## Schlusswort

Die Untersuchungen zeigen, dass die Mehrheit der Bauteile der wärmeabstrahlenden Umfassungsfläche die gesetzlichen und technischen Mindestanforderungen an den Wärme- und Feuchteschutz einhalten.

Einzig die Fenster erfüllen diese Anforderungen nicht und sind damit für einen Neubau unzulässig. Außerdem ist die Außenwand aus feuchteschutztechnischer Sicht kritisch zu betrachten. Das anfallende Tauwasser im Bereich zwischen Konstruktion und Innendämmung kann zwar in der Verdunstungsperiode vollständig abtrocknen, übersteigt aber den zulässigen Maximalwert. Jedoch bilden die durchgeführten Untersuchungen kein exaktes und endgültiges Ergebnis ab und müssen durch eine genauere Berechnung und Simulation mit verifizierten Programmen bestätigt werden.

Dies gilt auch für den Wärmebrückenzuschlag, da ein bildlicher Gleichwertigkeitsnachweis einen gewissen Interpretationsspielraum bietet.

Der energetische Anspruch an Gebäude C wird mit den bisher geplanten Bauteilen nur knapp nicht eingehalten. Die Eingabe der Varianten zeigt aber, dass eine Einhaltung der energetischen Grenzwerte durch leichte technische und konstruktive Anpassungen problemlos möglich ist.

Das Ziel des Naturdorf Bärnau, möglichst keine industriell vorverarbeiteten Materialien zu verwenden, konnte bis auf die geplante Dampfbremse und Hanfwolle eingehalten werden. Allerdings könnten durch eine statische Umplanung der obersten Geschossdecke und des Daches, Dämmmaterialien wie Hanfkalk oder Leichtlehm zum Einsatz kommen, die den Einbau einer Dampfbremse überflüssig machen könnten.

Für eine Standardisierung dieser Bauweise für den Neubau bedarf es aber noch weiterer Forschungsergebnisse und einer Beurteilung nach der Neuauflage des Gebäudeenergiegesetzes von 2023.

Außerdem ist die Anpassung von Ausführungsweisen und Details oder eine besondere Spezialisierung von Fachkräften nötig, um eine wirtschaftliche Umsetzung einer solchen Bauweise zu realisieren. Gleichzeitig ermöglicht die Einfachheit des Systems, dass viele Arbeiten nach kurzer Einlernzeit auch von ungelerntem Personal ausgeführt werden kann, was eine stärkere Bauherrenbeteiligung möglich macht.

Alles in allem zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Bauweise des Naturdorf Bärnau im Stande ist, den bauphysikalischen und energetischen Anspruch an Neubauten zu erfüllen. Damit ist ein grundlegendes Ziel des Naturdorf Bärnau bewiesen, dass mit handwerklichen Grundprinzipien der Vergangenheit und ohne industriell vorverarbeitete Bauprodukte Häuser gebaut werden können, die einem modernen Energie- und Wohnstandard entsprechen. Häuser, die nach den Erfahrungen aus der Denkmalpflege eine weit längere Lebensdauer aufweisen können als konventionelle Neubauten, leicht in Stand zu halten sind und nach ihrer Nutzungszeit problemlos recycelt oder in Teilen wiederverwendet werden können.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die Denkweise des Naturdorfs Bärnau den fachlichen Diskurs bereichert und ein Umdenken zu einer zukunftsorientierten und ressourcenschonenden Bauweise unterstützt und wegweisend ist.



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mittelalterbaustelle.....	1
Abbildung 2: Luftbild des Baugrundstücks .....	2
Abbildung 3: Luftbild, gelb: Geschichtspark Bärnau Tachov, blau: Königshof Karl IV, rot: Baugrundstück Naturdorf Bärnau.....	4
Abbildung 4: Ansicht des Naturdorf Bärnau.....	6
Abbildung 5: Ziergiebelement, Naturdorf Bärnau.....	7
Abbildung 6: Ansicht Gebäude C und D .....	9
Abbildung 7: Dachlandschaft im Naturdorf Bärnau.....	10
Abbildung 8: Grundriss Erdgeschoss, Haus C .....	12
Abbildung 9: Gebäude D .....	13
Abbildung 10: Innendämmung ausgeschalt .....	14
Abbildung 11: Außenwandaufbau im Dämmprozess .....	18
Abbildung 12: Streifenfundament auf Frostschutzschicht.....	23
Abbildung 13: Fensterrahmen mit Flügel, Naturdorf Bärnau .....	26
Abbildung 14: Isolierglas von Solling Glas mit mundgeblasenem Glas von Lamberts, Naturdorf Bärnau .....	26
Abbildung 15: Horizontalschnitt Haustür, Naturdorf Bärnau .....	27
Abbildung 16: Anschlussstelle Außenwand, Dach.....	28
Abbildung 17: Bodenplatte gegen Erdreich, DIN 4108 .....	32
Abbildung 18: Bodenplatte gegen Erdreich, Naturdorf Bärnau .....	32
Abbildung 19: Innenwand auf Bodenplatte, DIN 4108.....	33
Abbildung 20: Innenwand auf Bodenplatte, Naturdorf Bärnau .....	33
Abbildung 21: Innenwandinbindung an Außenwand, DIN 4108 .....	34
Abbildung 22: Innenwandinbindung an Außenwand, Naturdorf Bärnau .....	34
Abbildung 23: Innenwand an Dach, DIN 4108 .....	35
Abbildung 24: Innenwand an Dach, Naturdorf Bärnau .....	35
Abbildung 25: Einbindende Geschossdecke, DIN 4108 .....	36
Abbildung 26: Einbindende Geschossdecke, Naturdorf Bärnau.....	36
Abbildung 27: Fensterbrüstung DIN 4108 .....	37
Abbildung 28: Fensterbrüstung, Naturdorf Bärnau .....	37
Abbildung 29: Fensterlaibung, DIN 4108.....	38

Abbildung 30: Fensterlaibung, Naturdorf Bärnau .....	38
Abbildung 31: Fenstersturz, DIN 4108 .....	39
Abbildung 32: Fenstersturz, Naturdorf Bärnau .....	39
Abbildung 33: Giebelwand zum unbeheizten Geschoss, DIN 4108 .....	40
Abbildung 34: Giebelwand zum unbeheizten Geschoss, Naturdorf Bärnau .....	40
Abbildung 35: Ortgang an Steildach, DIN 4108 .....	41
Abbildung 36: Ortgang an Steildach, Naturdorf Bärnau .....	41
Abbildung 37: Steildach Schwellenanschluss, DIN 4108 .....	42
Abbildung 38: Steildach Schwellenanschluss, Naturdorf Bärnau .....	42
Abbildung 39: Steildach Firstanschluss, DIN 4108 .....	43
Abbildung 40: Steildach Firstanschluss, Naturdorf Bärnau .....	43
Abbildung 41: Isometrie der geplanten Gebäude im Naturdorf Bärnau .....	45
Abbildung 42: Ansicht Gebäude C .....	46

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungen .....	16
Tabelle 2: Indizes .....	17
Tabelle 3: Wärmeschutz Außenwand, oberste Geschossdecke, Dach .....	20
Tabelle 4: Feuchteschutz, Außenwand, oberste Geschossdecke, Dach .....	21
Tabelle 5: Wärmeschutz, Bodenaufbau gegen Erdreich .....	23
Tabelle 6: Zusammenfassung, Wärme- & Feuchteschutz nach Bauteil .....	25
Tabelle 7: Dämmstärken, Gleichwertigkeitsnachweis Wärmebrücken .....	30
Tabelle 8: R-Werte, Gleichwertigkeitsnachweis Wärmebrücken .....	31
Tabelle 9: Gleichwertigkeitsnachweis Bodenplatte gegen Erdreich .....	32
Tabelle 10: Gleichwertigkeitsnachweis, Innenwand auf Bodenplatte .....	33
Tabelle 11: Gleichwertigkeitsnachweis, Innenwand an Außenwand .....	34
Tabelle 12: Gleichwertigkeitsnachweis Innenwand an Dach .....	35
Tabelle 13: Gleichwertigkeitsnachweis, Geschossdecke .....	36
Tabelle 14: Gleichwertigkeitsnachweis, Fensterbrüstung .....	37
Tabelle 15: Gleichwertigkeitsnachweis, Fensterlaibung .....	38
Tabelle 16: Gleichwertigkeitsnachweis, Fenstersturz .....	39

Tabelle 17: Gleichwertigkeitsnachweis, Giebelwand an unbeheiztes Geschoss .....	40
Tabelle 18: Gleichwertigkeitsnachweis, Ortgang an Steildach.....	41
Tabelle 19: Gleichwertigkeitsnachweis, Steildach Schwellenanschluss .....	42
Tabelle 20: Gleichwertigkeitsnachweis, Steildach Firstanschluss.....	43
Tabelle 21: Ergebnis, Gleichwertigkeitsnachweis Wärmebrücken.....	44
Tabelle 22: BKI, U-Werte Bauteile .....	48
Tabelle 23: Ergebnisse energetische Bilanzierung, Stammdaten & Varianten .....	49

## Quellenverzeichnis

### Abbildungen:

- 1, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 16, 42: eigenständige Aufnahme
- 2, 3, 5, 8, 11, 13, 14, 15 ,41: zur Verfügung gestellt vom Naturdorf Bärnau
- 17, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 35, 37, 39: DIN 4108 Beiblatt 2
- 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40: erstellt mit einer Schülerversion von Allplan

Hrsg.: Umweltbundesamt. 1982. Ökologisches Bauen. Wiesbaden: Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin

Schanzenberger, Bodo. 2023. „Elefant im Raum: Der Bausektor im Klimawandel“. Der Holznagel, Zeitschrift der Interessengemeinschaft Bauernhaus e.V. Heft Nr. 05/2023

Tantz, Jakob. 2023. Hanfkalk als Dämmstoff, Untersuchung zum praxisgerechten Einsatz und Bewertung der Treibhausgasemission des Baustoffs über den gesamten Lebenszyklus. Bachelorarbeit

Hrsg.: IsoHemp S.A. 2023. Technisches Datenblatt IsoHemp HL Mix. [https://www.iso hemp.com/sites/default/files/fichiers/ish\\_technisches\\_datenblatt\\_hl\\_mix\\_2023\\_de\\_0.pdf](https://www.iso hemp.com/sites/default/files/fichiers/ish_technisches_datenblatt_hl_mix_2023_de_0.pdf) 29.10.2023

Hrsg.: Ampack AG. Sisalex 303 Papierdampfbremse und Luftdichtung. <https://www.ampack.biz/at-de/produkte/bahnen/dampfbremsen/sisalex-303>(29.10.2023)

Hrsg.: Vismann, Ulrich. 2021. Wendehorst Bautechnische Zahlentafel. Auflage 37. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Hrsg.: Heinze GmbH 2024: Baunetz Wissen.  
<https://www.baunetzwissen.de/impressum> (28.02.2024)

- Wärmedurchgangswiderstand (Stichwort):  
<https://www.baunetzwissen.de/glossar/w/waermedurchlasswiderstand-6641607> (20.02.2024)
- Glaser-Verfahren (Stichwort):  
<https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/feuchteschutz/tauwasser-und-glaser-verfahren-4421843?glossar=/glossar/g/glaser-verfahren-4381289>  
(20.02.2024)
- Transmissionswärmeverlust (Stichwort):  
<https://www.baunetzwissen.de/glossar/t/transmissionswaermeverlust-49273>  
(26.02.2024)
- Referenzgebäude (Stichwort)  
<https://www.baunetzwissen.de/glossar/r/referenzgebaeude-8114409>  
(26.02.2024)

Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2013. DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2023. DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

Hrsg.: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019. DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin

Hrsg.: Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch Bundesministerium der Justiz. 2020. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kältegewinnung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG):  
<https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf> (29.02.2024)

Bläsi, Walter. Ferdinand, Silvia. Schlatter, Kuon. 2022. Bauphysik. Auflage 11. Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel

Heinzel, Jennifer. 2024. Heinrich-Hübsch-Schule, Fachschule für Bautechnik

Hrsg.: Glashütte Lamberts Waldsassen GmbH. 2024: Lambertsglas als Isolierglas. <https://lamberts.de/isolierglas-aus-lambertsglas> (26.01.2024)

Hrsg.: ift Rosenheim. Siebersth, Ulrich. Demel, Manuel. Benitz-Wildenburg, Jürgen. 2014. Ermittlung des U-Wertes von Fenstern und Außentüren gemäß Produktnorm EN 14351-1. [https://www.ift-rosenheim.de/fileadmin/IFT/Wissen/Fachartikel/2014/EnEV1408\\_Ermittlung\\_U\\_Werte\\_Demel\\_Benitz/EnEV1408\\_Ermittlung\\_U\\_Werte\\_Demel\\_Benitz.pdf](https://www.ift-rosenheim.de/fileadmin/IFT/Wissen/Fachartikel/2014/EnEV1408_Ermittlung_U_Werte_Demel_Benitz/EnEV1408_Ermittlung_U_Werte_Demel_Benitz.pdf) (27.01.2024)

Hrsg.: Bundesverband Flachglas e.V. 2017. U<sub>w</sub>-Wert Berechnung von Sprossenfenstern. [https://www.bundesverband-flachglas.de/wp-content/uploads/simple-file-list/bf-informationen/BF-Information\\_007-2017\\_Uw-Wert\\_Berechnung\\_von\\_Sprossenfenstern.pdf](https://www.bundesverband-flachglas.de/wp-content/uploads/simple-file-list/bf-informationen/BF-Information_007-2017_Uw-Wert_Berechnung_von_Sprossenfenstern.pdf) (27.01.2024)

Hrsg.: KfW. 2015. Infoblatt KfW-Wärmebrückenbewertung. [https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/Arbeitshilfen-Pr%C3%A4sentationen/Arbeitshilfen/Infoblatt\\_KfW-Waermebrueckenbewertung.pdf](https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/Arbeitshilfen-Pr%C3%A4sentationen/Arbeitshilfen/Infoblatt_KfW-Waermebrueckenbewertung.pdf) (26.01.2024)

Beuth, Martin. 2024. Heinrich-Hübsch-Schule, Fachschule für Bautechnik, Fach: Energetische Gebäudesanierung

Heinzel, Jennifer. 2024. Heinrich-Hübsch-Schule, Fachschule für Bautechnik, Fach: Bauphysik

# Anhangsverzeichnis

A1: Außenwandaufbau Fachwerk sichtbar

A2: BKI, Berechnung Bauteile, Außenwand

A3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand

A4: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand Konstruktionsbereich

B1: Aufbau Oberste Geschossdecke

B2: BKI, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke

B3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke

C1: Dachaufbau

C2: BKI, Berechnung Bauteile, Dach

C3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Dach

D1: Bodenaufbau gegen Erdreich

D2: BKI, Berechnung Bauteile, Bodenaufbau gegen Erdreich

D3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Bodenaufbau gegen Erdreich

E1: U-Wert Berechnung Fenster

E2: U-Wert Berechnung Außentüre

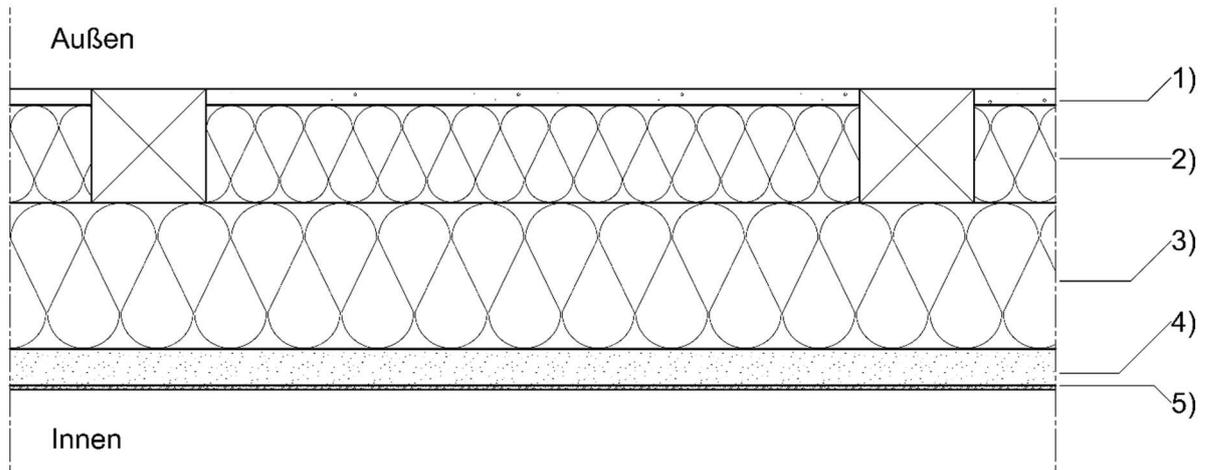
F1: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Stammdaten

F2: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Variante 1

F3: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Variante 2

F4: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Variante 3

## A1: Außenwandaufbau Fachwerk sichtbar



Aufbau von außen nach innen:

- 1) 20 mm Kalkputz
- 2) 12 cm Hanfkalk - 14/14 cm Fachwerk
- 3) 19 cm Hanfkalk
- 4) 4,5 cm Lehm Unterputz
- 5) 5 mm Lehm Oberputz

## A2: BKI, Berechnung Bauteile, Außenwand

### Bauteilaufbau: Außenwand Fachwerk

#### Berechnung des oberen Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{T'}$

Bereich 1 Anteil: 60,00% (f=0,6000)	Dicke d	$\lambda$	R	maßg. $\mu$	äquiv. Dicke	Temp.- Verlauf	Satt- dampf- druck
Baustoffe	[cm]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[ - ]	[m]	[°C]	[Pa]
Wärmeübergang innen $R_{si}$			0,130			20,0	2337
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	0,05	0,730	0,001	5	0,0025	18,7	2160
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	4,5	0,730	0,062	5	0,225	18,7	2159
Hanfalk	19,0	0,068	2,794	2	0,38	18,4	2118
Hanfalk	12,0	0,068	1,765	2	0,24	4,3	828
Putze und Mörtel aus Kalk, Sand (1600 kg/m <sup>3</sup> )	2,0	0,800	0,025	10	0,2	-4,7	413
Wärmeübergang außen $R_{se}$			0,040			-4,8	408
			$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$		$\Sigma S_d =$	-5,0	401
			4,816		1,0		

Temperaturverlauf und Satttdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit  $R_{si} = 0,25$  m<sup>2</sup>K/W und  $R_{se} = 0,04$  m<sup>2</sup>K/W berechnet.

Bereich 2 Anteil: 40,00% (f=0,4000)	Dicke d	$\lambda$	R	maßg. $\mu$	äquiv. Dicke	Temp.- Verlauf	Satt- dampf- druck
Baustoffe	[cm]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[ - ]	[m]	[°C]	[Pa]
Wärmeübergang innen $R_{si}$			0,130			20,0	2337
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	0,05	0,730	0,001	5	0,0025	18,6	2135
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	4,5	0,730	0,062	5	0,225	18,5	2135
Hanfalk	19,0	0,068	2,794	2	0,38	18,2	2088
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	12,0	0,120	1,000	50	6	2,0	705
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	2,0	0,120	0,167	50	1	-3,8	444
Wärmeübergang außen $R_{se}$			0,040			-4,8	409
			$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$		$\Sigma S_d =$	-5,0	401
			4,193		7,6		

Temperaturverlauf und Satttdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit  $R_{si} = 0,25$  m<sup>2</sup>K/W und  $R_{se} = 0,04$  m<sup>2</sup>K/W berechnet.

$$R_{T'} = 1/\Sigma(f/R) = 4,546 \text{ m}^2\text{K/W}$$

#### Berechnung des unteren Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{T''}$

Schicht Nr.	d [cm]	$\lambda_a$ [W/mK]	$f_a$ [%]	$\lambda_b$ [W/mK]	$f_b$ [%]	$\lambda_c$ [W/mK]	$f_c$ [%]	$\lambda_d$ [W/mK]	$f_d$ [%]	$R_j$ [m <sup>2</sup> K/W]
1	0,05	0,730	60,00	0,730	40,00					0,001
2	4,50	0,730	60,00	0,730	40,00					0,062
3	19,00	0,068	60,00	0,068	40,00					2,794
4	12,00	0,068	60,00	0,120	40,00					1,351
5	2,00	0,800	60,00	0,120	40,00					0,038

$$R_{T''} = R_{si} + \Sigma R_j + R_{se} = 4,416 \text{ m}^2\text{K/W}$$

### **Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U**

$$R_T = (R_{T'} + R_{T''}) / 2 = (4,546 + 4,416) / 2 = 4,481 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = 1/R_T = 0,22 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Die mittlere flächenbezogene Masse des Bauteils beträgt  $m' = 195,8 \text{ kg/m}^2$ .

Der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 beträgt  $\min R = 1,00 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

(DIN 4108-2 Abs. 5.1.3: inhomogene Bauteile)

Diese Anforderung ist mit vorh.  $R = 4,31 \text{ m}^2\text{K/W}$  erfüllt.

Der Mindestwärmeschutz des Gefachbereiches beträgt  $\min R = 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ . (DIN 4108-2 Abs. 5.1.3)

Diese Anforderung ist mit vorh.  $R = 4,65 \text{ m}^2\text{K/W}$  erfüllt.

### **Wirksame Wärmekapazität des Bauteils (10-cm-Regel)**

$$C_{\text{wirk},i} = 26,58 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$C_{\text{wirk},e} = 18,93 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

### **Wirksame Wärmekapazität des Bauteils für die Berechnung der Nachtabenkung (3-cm-Regel)**

$$C_{\text{wirk},i} = 13,33 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

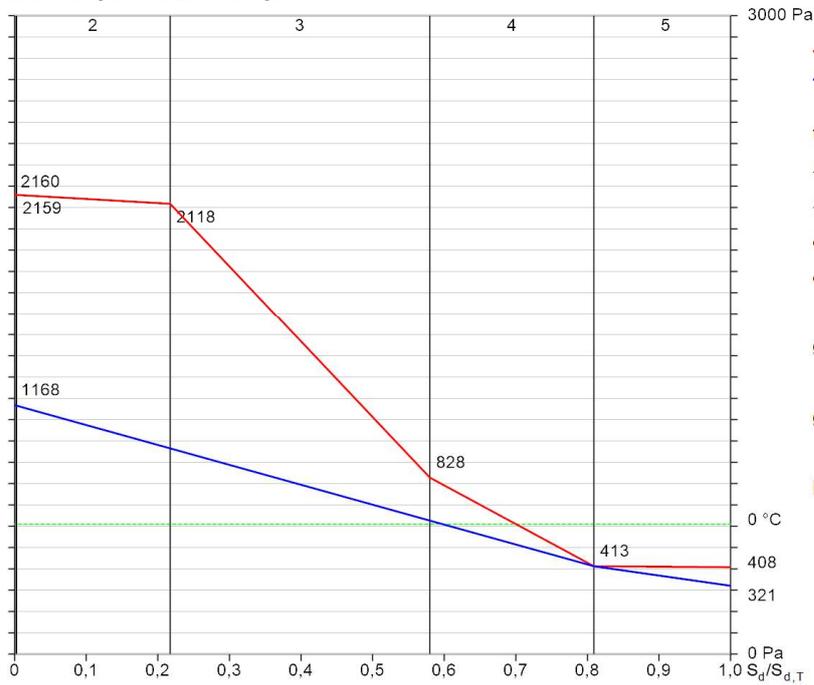
$$C_{\text{wirk},e} = 8,43 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

# Berechnung der Wasserdampf-Diffusion und des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2018-10

## Bereich 1

### Tauperiode (Winter)

Berechnung der Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$t_t = 2160 \text{ h}$$

$$\vartheta_a = -5,0 \text{ °C}$$

$$\vartheta_i = 20,0 \text{ °C}$$

$$\varphi_a = 80 \%$$

$$\varphi_i = 50 \%$$

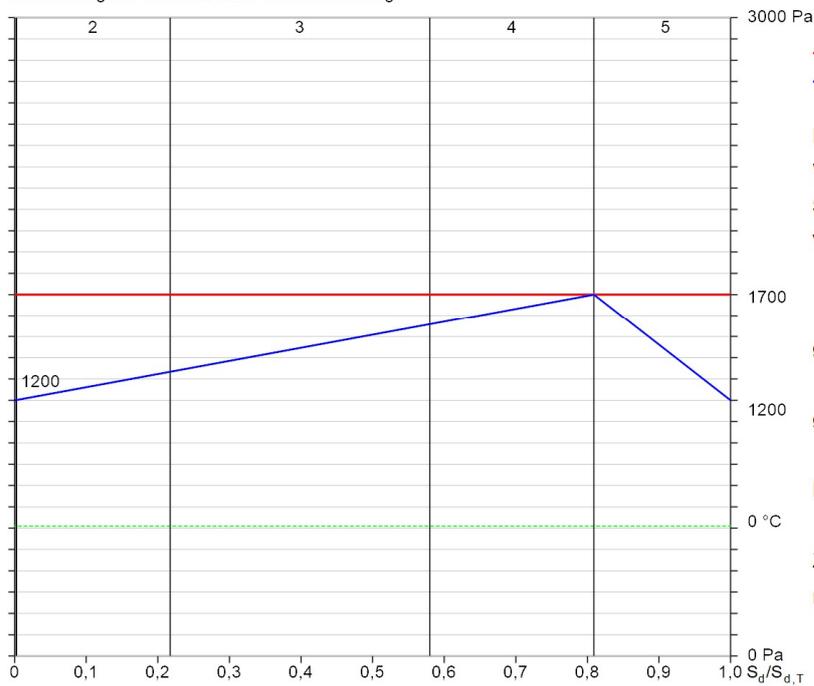
$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_c}{s_{d,i}} = 0,6421 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{s_{d,e}} = 0,3301 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_c = t_c \cdot (g_i - g_e) = 674,1 \text{ g/m}^2$$

### Verdunstungsperiode (Sommer)

Berechnung der verdunstenden Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$\text{Dauer Verdunstungsperiode } t_v = 2160 \text{ h}$$

$$\text{Wasserdampfdruck Außen: } 1200 \text{ Pa}$$

$$\text{Sättigungsdampfdruck: } 1700 \text{ Pa}$$

$$\text{Verdunstung von einem Punkt}$$

$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_i}{s_{d,i}} = 0,4248 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{s_{d,e}} = 1,8 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_{ev} = 4805,5 \text{ g/m}^2$$

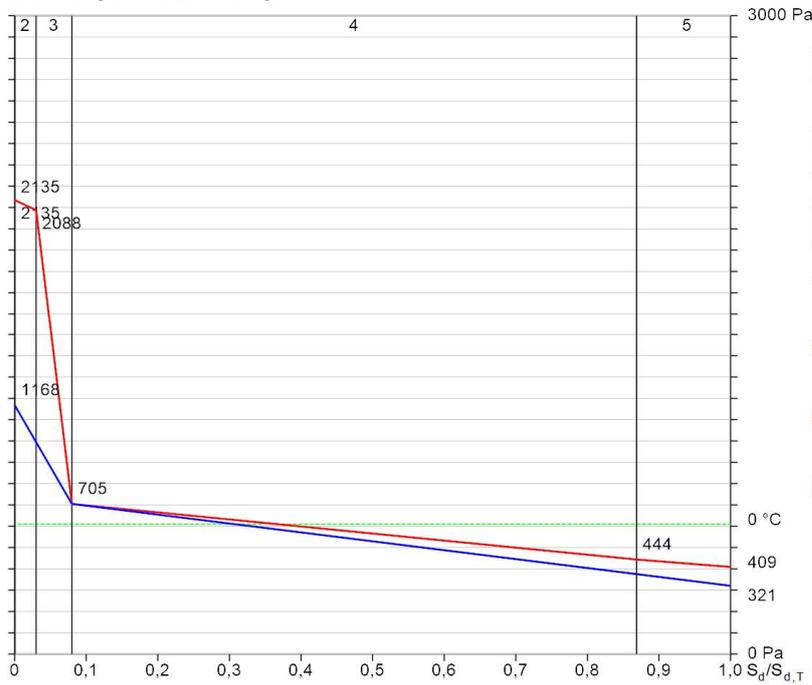
Zur Beurteilung der anfallenden Tauwasser-  
masse siehe DIN 4108-3:2018-10.

# Berechnung der Wasserdampf-Diffusion und des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2018-10

## Bereich 2

### Tauperiode (Winter)

Berechnung der Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$t_t = 2160 \text{ h}$$

$$\vartheta_a = -5,0 \text{ °C}$$

$$\vartheta_i = 20,0 \text{ °C}$$

$$\varphi_a = 80 \%$$

$$\varphi_i = 50 \%$$

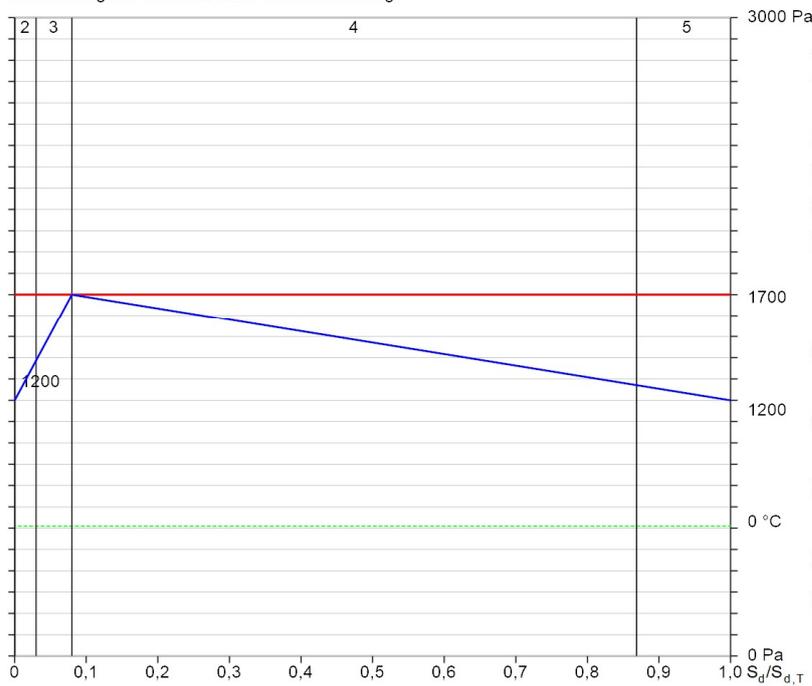
$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_c}{S_{d,i}} = 0,5493 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{S_{d,e}} = 0,0395 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_c = t_c \cdot (g_i - g_e) = 1101,2 \text{ g/m}^2$$

### Verdunstungsperiode (Sommer)

Berechnung der verdunstenden Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$\text{Dauer Verdunstungsperiode } t_v = 2160 \text{ h}$$

$$\text{Wasserdampfdruck Außen: } 1200 \text{ Pa}$$

$$\text{Sättigungsdampfdruck: } 1700 \text{ Pa}$$

$$\text{Verdunstung von einem Punkt}$$

$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_i}{S_{d,i}} = 0,5926 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{S_{d,e}} = 0,05143 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_{ev} = 1391,1 \text{ g/m}^2$$

Zur Beurteilung der anfallenden Tauwasser-  
masse siehe DIN 4108-3:2018-10.

## A3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand

Fachwerk

### U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Lehm-Unterputz	0,50	0,910	0,005
2	Lehm-Oberputz	4,50	0,910	0,049
3	IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	19,00	0,068	2,794
4	IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	12,00	0,068	1,765
	Fichte (Breite: 14 cm)	14,00	0,130	1,077
5	Kalkputz	2,00	0,870	0,023
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung horizontal

Rse: Wärmestromrichtung horizontal, außen: Direkter Übergang zur Außenluft

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{\text{tot,upper}} = 4,495 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{\text{tot,lower}} = 4,347 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

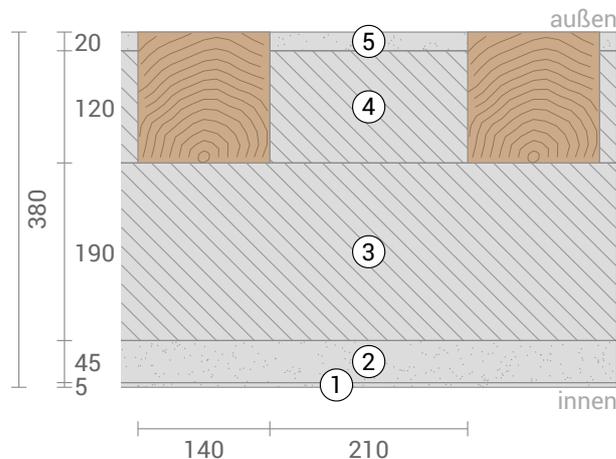
Prüfe Anwendbarkeit:  $R_{\text{tot,upper}} / R_{\text{tot,lower}} = 1,034$  (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand  $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot,upper}} + R_{\text{tot,lower}}) / 2 = 4,421 \text{ m}^2\text{K/W}$

Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 1,7%

Wärmedurchgangskoeffizient  $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$





A3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand,  $U=0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	ps [Pa]	$\Sigma$ sd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250			18,73	2160	0
1	0,5 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,005	0,03	1600	18,70	2157	0,03
2	4,5 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,049	0,23	1500	18,45	2123	0,25
3	19 cm IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	0,068	2,794	0,38	300			
4	12 cm IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	0,068	1,765	0,24	300	4,27	829	0,63
5	2 cm Kalkputz	0,870	0,023	0,2	1400	-4,68	413	0,87
Wärmeübergangswiderstand			0,040			-4,80	408	1,07

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte ( $\Sigma$ sd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

### Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 54%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



### Tauperiode (Winter)

#### Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit

$p_i = 1168 \text{ Pa}$

Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit

$p_e = 321 \text{ Pa}$

Dauer Tauperiode (90 Tage)

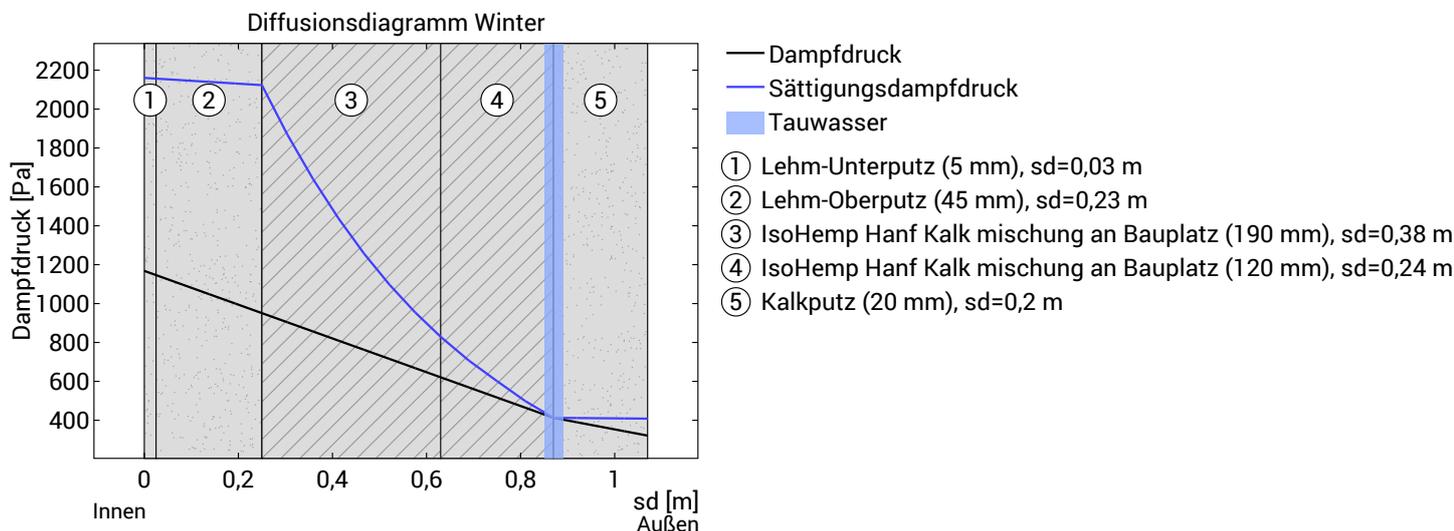
$t_c = 7776000 \text{ s}$

Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft

$\delta_0 = 2.0E-10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s}\cdot\text{Pa})$

sd-Wert (gesamtes Bauteil)

$s_{de} = 1,07 \text{ m}$



**Tauwasserebene  $c_1$ :** Schichtgrenze zwischen IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz und Kalkputz bei  $s_{d,c1}=0,87 \text{ m}$ ;  $p_{c1}=413 \text{ Pa}$ ;  $x_1=36 \text{ cm}$

Tauwassermenge:  $M_c = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_i - p_{c1})/s_{d,c1} - (p_{c1} - p_e)/(s_{de} - s_{d,c1})) = 0,634 \text{ kg}/\text{m}^2$

IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz wird als wasseraufnahmefähig eingestuft weil  $A_w \geq 0,1$  ist.

Kalkputz wird als wasseraufnahmefähig eingestuft weil  $A_w \geq 0,1$  ist.

Alle vom Tauwasser betroffenen Schichten sind kapillar Wasseraufnahmefähig. Die maximal erlaubte Tauwassermenge beträgt deshalb  $1 \text{ kg}/\text{m}^2$ .

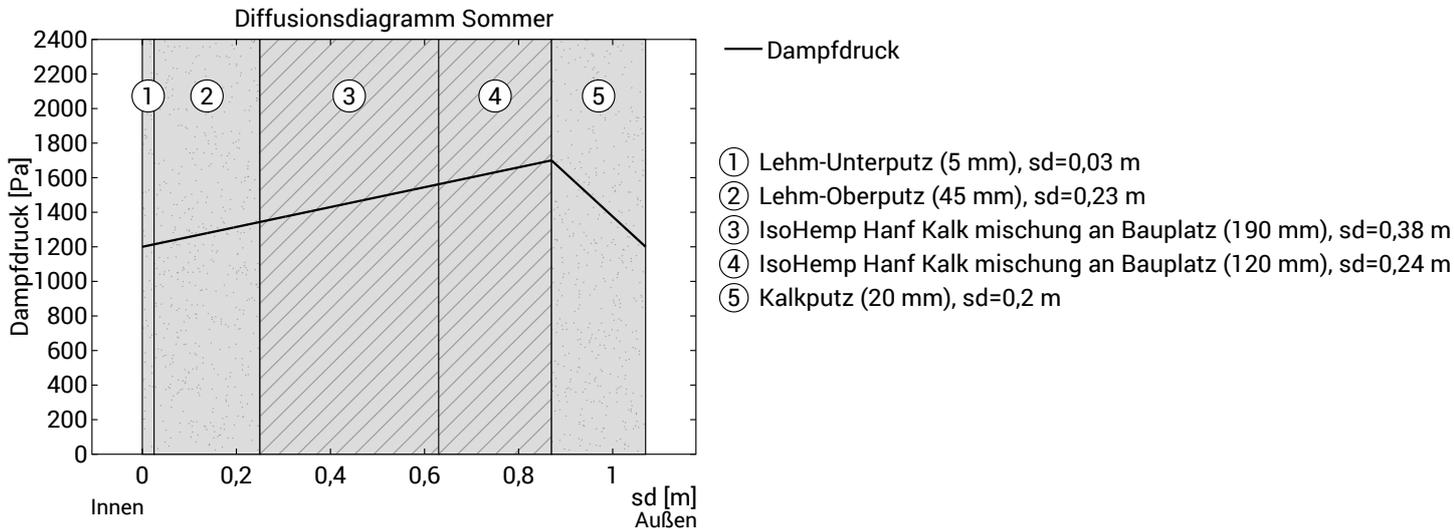
Tauwasser insgesamt:  $M_c = 0,634 \text{ kg}/\text{m}^2$



A3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand,  $U=0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen	
Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Maximal mögliche Verdunstungsmenge:

$$M_{ev} = t_c \cdot \delta_0 \cdot \left( \frac{(p_s - p_i)}{sd_{c1}} + \frac{(p_s - p_e)}{(sd_e - sd_{c1})} \right) = 4,782 \text{ kg/m}^2$$

Die Tauwassermenge von  $0,634 \text{ kg/m}^2$  kann vollständig trocknen.



Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

Trocknungsreserve:  $M_r = (M_{ev} - M_c) \cdot 1000 = 4148 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken:  $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$



Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch zulässig.

Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

# A4: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand Konstruktionsbereich

## U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,130
1	Lehm-Oberputz	0,50	0,910	0,005
2	Lehm-Unterputz	4,50	0,910	0,049
3	IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	19,00	0,068	2,794
4	Fichte	14,00	0,130	1,077
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,040

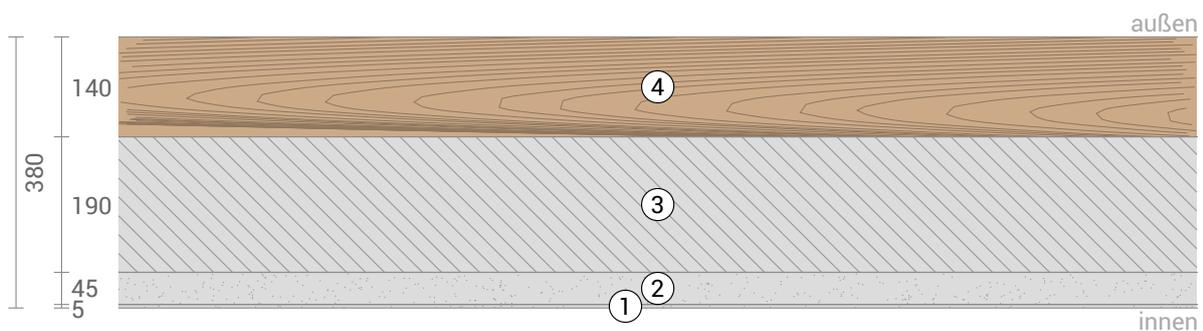
Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung horizontal

Rse: Wärmestromrichtung horizontal, außen: Direkter Übergang zur Außenluft

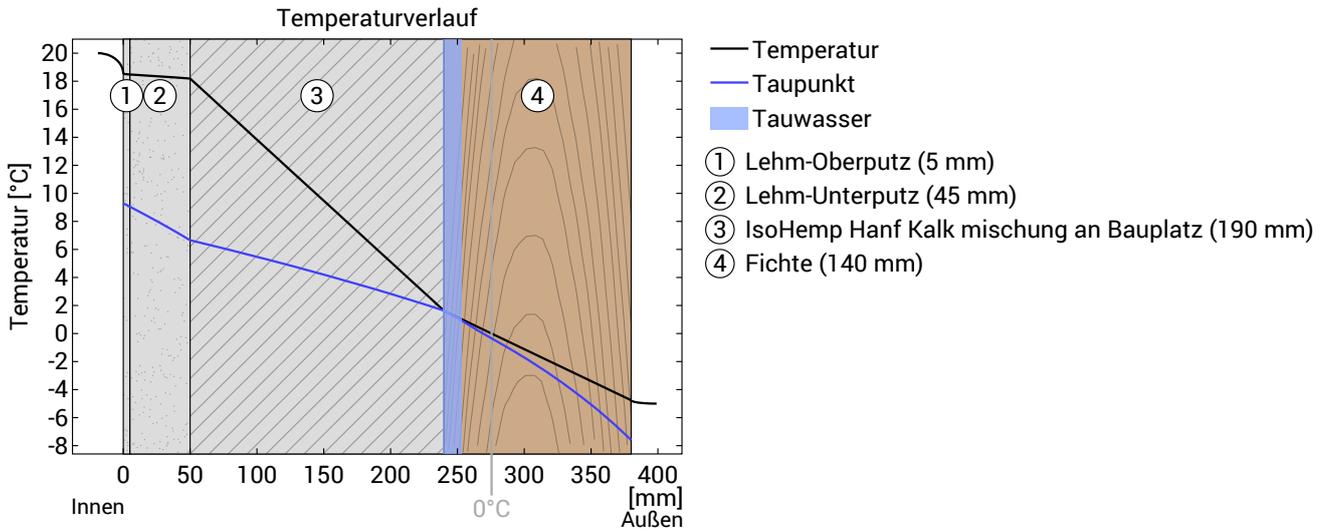
Wärmedurchgangswiderstand  $R_{tot} = 4,096 \text{ m}^2\text{K/W}$

Wärmedurchgangskoeffizient  $U = 1/R_{tot} = 0,24 \text{ W/(m}^2\text{K)}$



A4: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand Konstruktionsbereich,  $U=0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Temperaturverlauf



Verlauf von Temperatur und Taupunkt innerhalb des Bauteils. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

## Schichten (von innen nach außen)

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m <sup>2</sup> ]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,250	18,5	20,0	
1	0,5 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,005	18,5	18,5	7,5
2	4,5 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,049	18,2	18,5	72,0
3	19 cm IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	0,068	2,794	1,6	18,2	57,0
4	14 cm Fichte	0,130	1,077	-4,8	1,6	63,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,040	-5,0	-4,8	
	38 cm Gesamtes Bauteil		4,096			199,5

\*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max): 18,5°C 18,5°C 18,5°C  
Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max): -4,8°C -4,8°C -4,8°C

A4: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand Konstruktionsbereich,  $U=0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	ps [Pa]	$\Sigma$ sd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250			18,52	2132	0
1	0,5 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,005	0,03	1500	18,48	2128	0,03
2	4,5 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,049	0,23	1600	18,19	2089	0,25
3	19 cm IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	0,068	2,794	0,38	300			
4	14 cm Fichte	0,130	1,077	7	450	1,62	687	0,63
Wärmeübergangswiderstand			0,040			-4,76	410	7,63

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte ( $\Sigma$ sd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

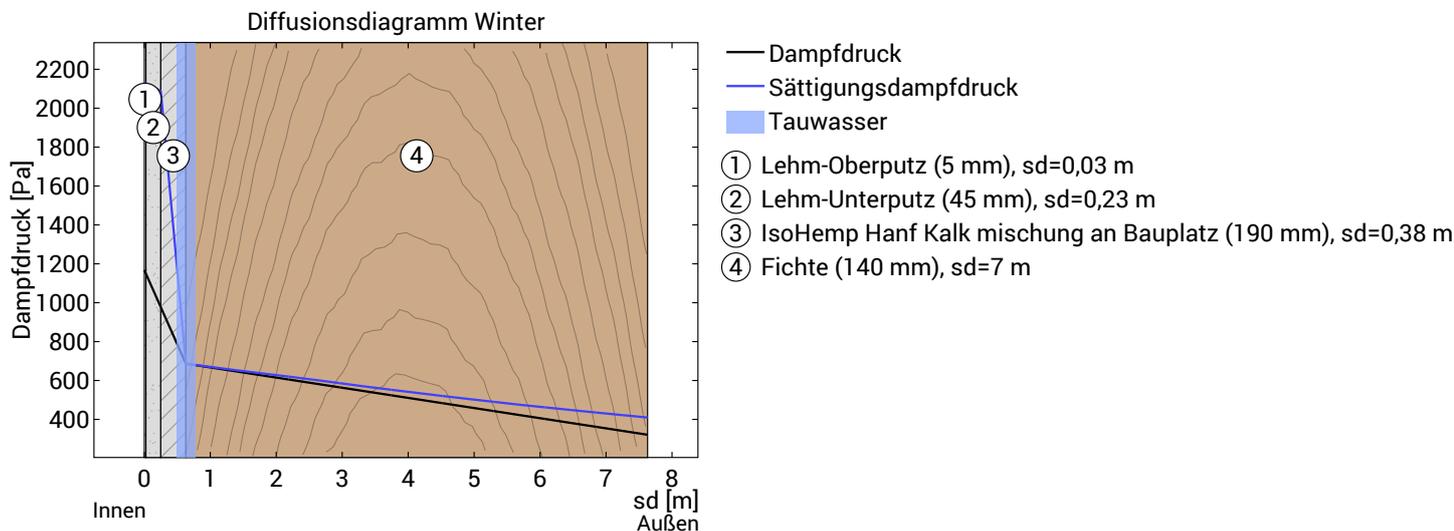
### Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 55%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



### Tauperiode (Winter)

Randbedingungen	
Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Dauer Tauperiode (90 Tage)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft	$\delta_0 = 2.0E-10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$
sd-Wert (gesamtes Bauteil)	$s_{d,e} = 7,63 \text{ m}$



**Tauwasserebene  $c_1$ :** Schichtgrenze zwischen IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz und Fichte bei  $s_{d,c1}=0,63 \text{ m}$ ;  $p_{c1}=687 \text{ Pa}$ ;  $x_1=24 \text{ cm}$

Tauwassermenge:  $M_c = t_c * \delta_0 * ((p_i - p_{c1})/s_{d,c1} - (p_{c1} - p_e)/(s_{d,e} - s_{d,c1})) = 1,106 \text{ kg/m}^2$

IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz wird als wasseraufnahmefähig eingestuft weil  $A_w \geq 0.1$  ist.

Fichte wird als wasseraufnahmefähig eingestuft weil  $A_w \geq 0.1$  ist.

Alle vom Tauwasser betroffenen Schichten sind kapillar Wasseraufnahmefähig. Die maximal erlaubte Tauwassermenge beträgt deshalb  $1 \text{ kg/m}^2$ .

Tauwasser insgesamt:  $M_c = 1,106 \text{ kg/m}^2$

Anforderung nicht erfüllt!

A4: Ubakus, Berechnung Bauteile, Außenwand Konstruktionsbereich,  $U=0,24 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Erhöhung des Feuchtegehalts bei Holz und Holzwerkstoffen

Unter der Annahme, dass sich das Tauwasser vollständig auf die Schicht 'Fichte' mit der Rohdichte  $\rho = 450 \text{ kg}/\text{m}^3$  verteilt, ergibt sich folgende Zunahme des massebezogenen Feuchtegehalts  $\Delta u$  in M.-%:

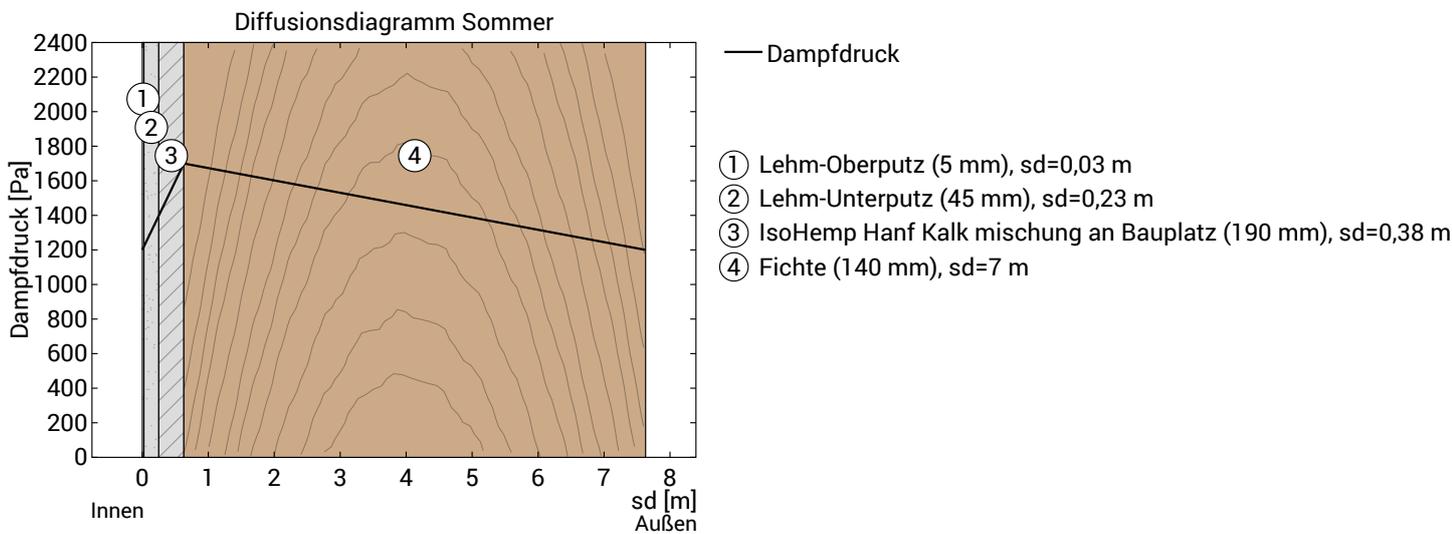
$$\Delta u = M_c / (\rho * d) * 100\% = 1,106 / (450 * 0,14) * 100\% = 1,8\%$$

Maximal erlaubte Zunahme bei Holz: 5%



Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen	
Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Maximal mögliche Verdunstungsmenge:

$$M_{ev} = t_c * \delta_0 * ((p_s - p_i) / sd_{c1} + (p_s - p_e) / (sd_e - sd_{c1})) = 1,345 \text{ kg}/\text{m}^2$$

Die Tauwassermenge von  $1,106 \text{ kg}/\text{m}^2$  kann vollständig trocknen.



Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

$$\text{Trocknungsreserve: } M_r = (M_{ev} - M_c) * 1000 = 239 \text{ g}/\text{m}^2/\text{a}$$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken:  $100 \text{ g}/\text{m}^2/\text{a}$



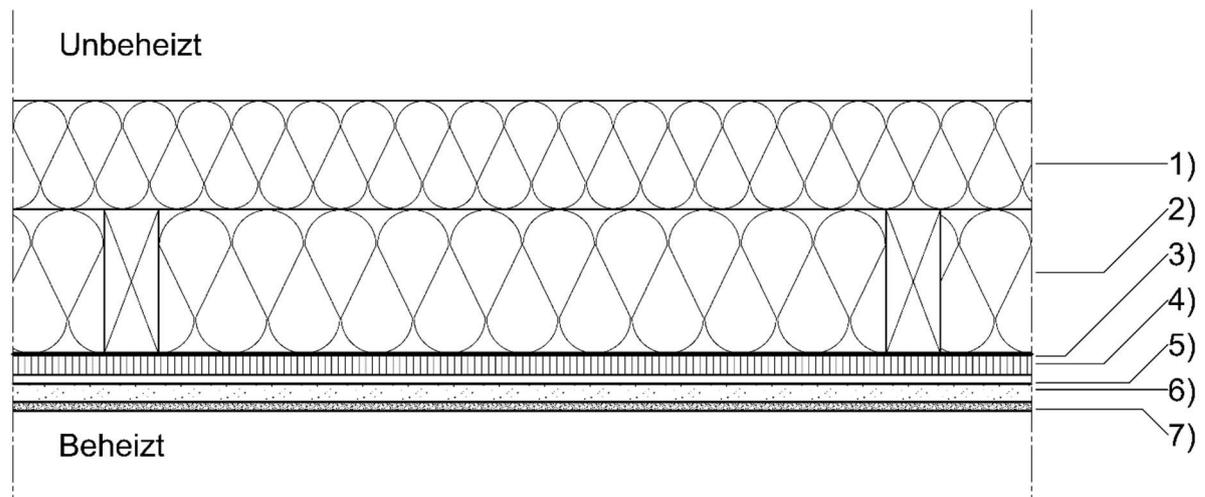
Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch nicht zulässig.

Hinweise

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

## B1: Aufbau oberste Geschossdecke



Aufbau von unbeheizt nach beheizt:

- 1) 12 cm Hanfwolle
- 2) 16 cm Hanfwolle - 6/16 cm Zangen
- 3) Dampfbremse
- 4) 24 mm Sparschalung Fichte
- 5) 10 mm Schilfrohrmatte
- 6) 20 mm Lehm Unterputz
- 7) 10 mm Lehm Oberputz

## B2: BKI, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke

### Bauteilaufbau: Oberste Geschossdecke

#### Berechnung des oberen Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{T'}$

Bereich 1 Anteil: 93,48% (f=0,9348)	Dicke d	$\lambda$	R	maßg. $\mu$	äquiv. Dicke	Temp.- Verlauf	Satt- dampf- druck
Baustoffe	[cm]	[W/mK]	[m²K/W]	[-]	[m]	[°C]	[Pa]
Wärmeübergang innen $R_{si}$			0,100			20,0	2337
Lehmbaustoffe (1600 kg/m³)	1,00	0,730	0,014	10	0,1	19,2	2220
Lehmbaustoffe (1600 kg/m³)	2,0	0,730	0,027	10	0,2	19,1	2213
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m³)	2,4	0,120	0,200	50	1,2	19,0	2201
Diffusionshemmende Schicht (feuchtevariabel 0,5..5m), luftdicht	0,10	0,250	0,004		5	18,4	2110
Hanf-Dämmplatte 040	16,0	0,040	4,000	2	0,32	5,1	877
Hanf-Dämmplatte 040	12,0	0,040	3,000	2	0,24	-4,9	406
Wärmeübergang außen $R_{se}$			0,100			-5,0	401
			$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$	7,445	$\Sigma S_d =$	7,1	

Temperaturverlauf und Satttdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit  $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  berechnet.

Bereich 2 Anteil: 6,52% (f=0,0652)	Dicke d	$\lambda$	R	maßg. $\mu$	äquiv. Dicke	Temp.- Verlauf	Satt- dampf- druck
Baustoffe	[cm]	[W/mK]	[m²K/W]	[-]	[m]	[°C]	[Pa]
Wärmeübergang innen $R_{si}$			0,100			20,0	2337
Lehmbaustoffe (1600 kg/m³)	1,00	0,730	0,014	10	0,1	18,7	2158
Lehmbaustoffe (1600 kg/m³)	2,0	0,730	0,027	10	0,2	18,6	2148
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m³)	2,4	0,120	0,200	50	1,2	18,5	2129
Diffusionshemmende Schicht (feuchtevariabel 0,5..5m), luftdicht	0,10	0,250	0,004		5	17,5	1996
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m³)	16,0	0,120	1,333	50	8	17,5	1994
Hanf-Dämmplatte 040	12,0	0,040	3,000	2	0,24	10,6	1278
Wärmeübergang außen $R_{se}$			0,100			-4,8	408
			$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$	4,778	$\Sigma S_d =$	14,7	401

Temperaturverlauf und Satttdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit  $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  berechnet.

$$R_{T'} = 1/\Sigma(f/R) = 7,184 \text{ m}^2\text{K/W}$$

#### Berechnung des unteren Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{T''}$

Schicht Nr.	d [cm]	$\lambda_a$ [W/mK]	$f_a$ [%]	$\lambda_b$ [W/mK]	$f_b$ [%]	$\lambda_c$ [W/mK]	$f_c$ [%]	$\lambda_d$ [W/mK]	$f_d$ [%]	$R_j$ [m²K/W]
1	1,00	0,730	93,48	0,730	6,52					0,014
2	2,00	0,730	93,48	0,730	6,52					0,027
3	2,40	0,120	93,48	0,120	6,52					0,200
4	0,10	0,250	93,48	0,250	6,52					0,004
5	16,00	0,040	93,48	0,120	6,52					3,538
6	12,00	0,040	93,48	0,040	6,52					3,000

$$R_{T''} = R_{si} + \Sigma R_j + R_{se} = 6,984 \text{ m}^2\text{K/W}$$

### **Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U**

$$R_T = (R_T' + R_T'') / 2 = (7,184 + 6,984) / 2 = 7,084 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = 1/R_T = 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Die mittlere flächenbezogene Masse des Bauteils beträgt  $m' = 74,9 \text{ kg/m}^2$ .

Der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 beträgt  $\min R = 1,00 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

(DIN 4108-2 Abs. 5.1.3: inhomogene Bauteile)

Diese Anforderung ist mit vorh.  $R = 6,88 \text{ m}^2\text{K/W}$  erfüllt.

Der Mindestwärmeschutz des Gefachbereiches beträgt  $\min R = 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ . (DIN 4108-2 Abs. 5.1.3)

Diese Anforderung ist mit vorh.  $R = 7,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  erfüllt.

### **Wirksame Wärmekapazität des Bauteils (10-cm-Regel)**

$$C_{\text{wirk},i} = 19,94 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

$$C_{\text{wirk},e} = 1,69 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

### **Wirksame Wärmekapazität des Bauteils für die Berechnung der Nachtabenkung (3-cm-Regel)**

$$C_{\text{wirk},i} = 13,33 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

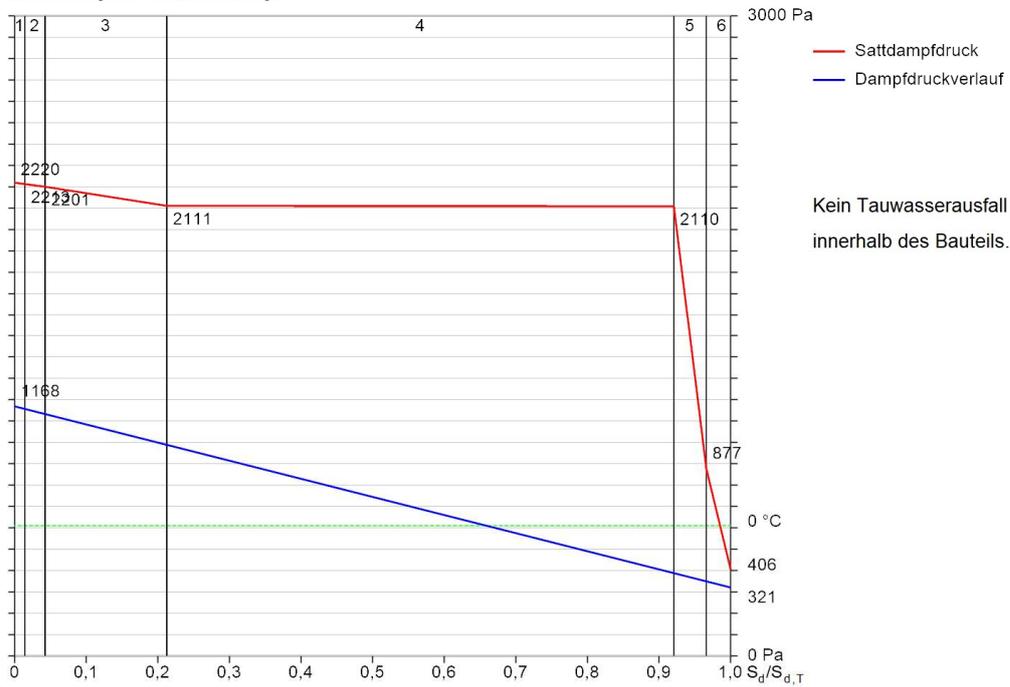
$$C_{\text{wirk},e} = 0,51 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{K})$$

# Berechnung der Wasserdampf-Diffusion und des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2018-10

## Bereich 1

### Tauperiode (Winter)

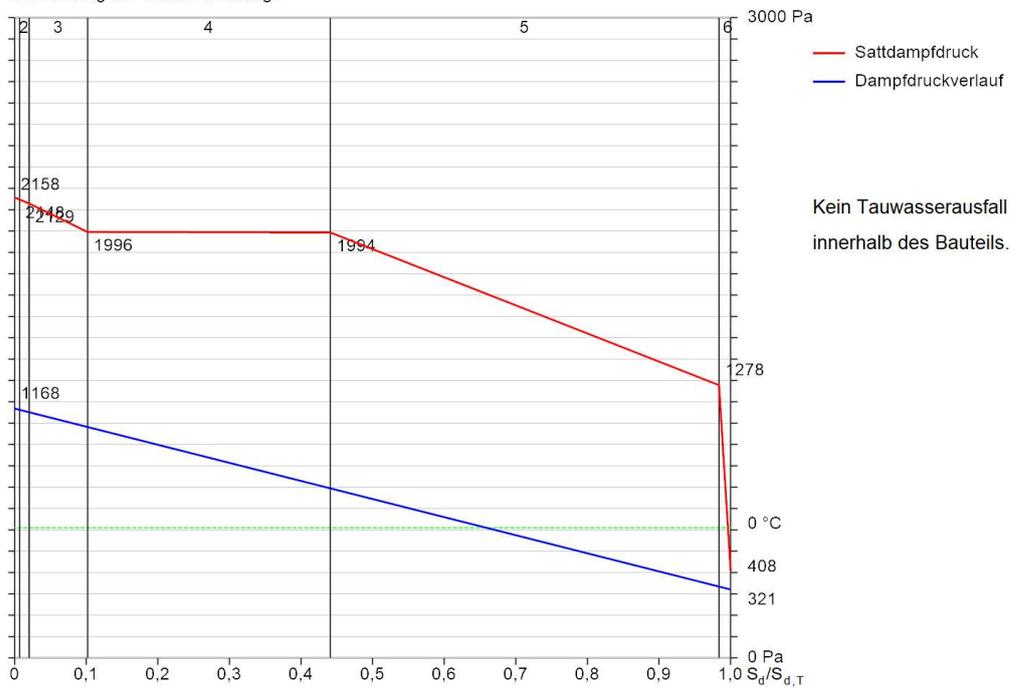
Berechnung der Tauwassermenge



## Bereich 2

### Tauperiode (Winter)

Berechnung der Tauwassermenge



# B3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke

Decke

## U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Lehm-Oberputz	1,00	0,910	0,011
2	Lehm-Unterputz	2,00	0,910	0,022
3	Schilfrohrplatten und -matten	1,00	0,120	0,083
4	Holzschalung (Decke) mit Fugen	2,40	0,175	0,137
5	Sisalex 303	0,03	0,230	0,001
6	Thermo Hanf COMBI JUTE	16,00	0,040	4,000
	Fichte (6,5%)	16,00	0,130	1,231
7	Thermo Hanf COMBI JUTE	12,00	0,040	3,000
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,100

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung aufwärts

Rse: Wärmestromrichtung aufwärts, außen: Nicht beheizter Dachraum

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{tot,upper} = 7,178 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{tot,lower} = 6,943 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

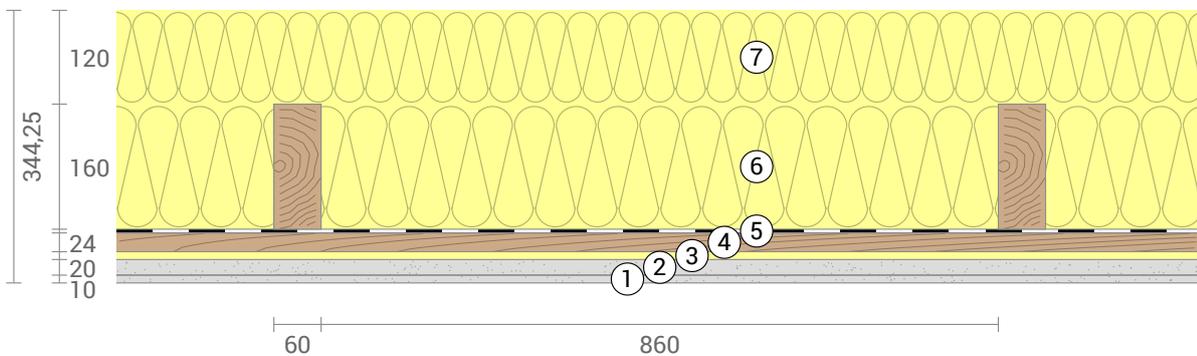
Prüfe Anwendbarkeit:  $R_{tot,upper} / R_{tot,lower} = 1,034$  (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand  $R_{tot} = (R_{tot,upper} + R_{tot,lower})/2 = 7,060 \text{ m}^2\text{K/W}$

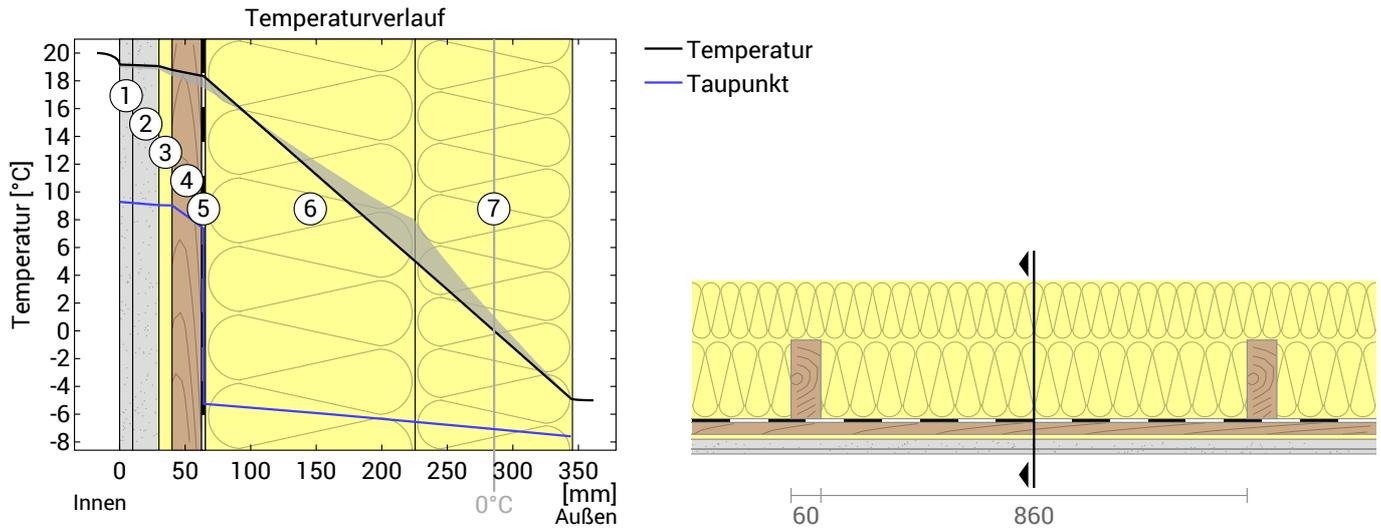
Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 1,7%

Wärmedurchgangskoeffizient  $U = 1/R_{tot} = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$



B3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke,  $U=0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Temperaturverlauf



- ① Lehm-Oberputz (10 mm)                      ④ Holzschalung mit Fugen (24 mm)                      ⑦ Thermo Hanf COMBI JUTE (120 mm)
- ② Lehm-Unterputz (20 mm)                      ⑤ Sisalex 303
- ③ Schilfrohrplatten und -matten (10 mm)                      ⑥ Thermo Hanf COMBI JUTE (160 mm)

**Links:** Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

**Rechts:** Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

## Schichten (von innen nach außen)

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m <sup>2</sup> ]	
				min	max		
Wärmeübergangswiderstand*					19,0	20,0	
1	1 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,011	18,9	19,2	15,0	
2	2 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,022	18,8	19,1	32,0	
3	1 cm Schilfrohrplatten und -matten	0,120	0,083	18,3	19,1	3,0	
4	2,4 cm Holzschalung (Decke) mit Fugen	0,175	0,137	17,5	18,8	16,8	
5	0,025 cm Sisalex 303	0,230	0,001	17,5	18,3	0,2	
6	16 cm Thermo Hanf COMBI JUTE	0,040	4,000	5,1	18,3	5,5	
	16 cm Fichte (6,5%)	0,130	1,231	8,1	17,7	4,7	
7	12 cm Thermo Hanf COMBI JUTE	0,040	3,000	-4,9	8,1	4,4	
Wärmeübergangswiderstand*					-5,0	-4,8	
34,425 cm Gesamtes Bauteil			7,052			81,6	

\*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max):    19,0°C    19,1°C    19,2°C  
 Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max):    -4,9°C    -4,9°C    -4,8°C

B3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke,  $U=0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	ps [Pa]	$\Sigma$ sd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250			19,17	2220	0
1	1 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,011	0,05	1500	19,14	2215	0,05
2	2 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,022	0,1	1600	19,06	2205	0,15
3	1 cm Schilfrohrplatten und -matten	0,120	0,083	0,01	300	18,79	2168	0,16
4	2,4 cm Holzschalung (Decke) mit Fugen	0,175	0,137	0,96	700	18,33	2107	1,12
5	0,025 cm Sisalex 303	0,230	0,001	5	720	18,33	2107	6,12
6	16 cm Thermo Hanf COMBI JUTE	0,040	4,000	0,32	37	5,07	877	6,44
7	12 cm Thermo Hanf COMBI JUTE	0,040	3,000	0,24	37	-4,87	406	6,68
Wärmeübergangswiderstand			0,040					

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte ( $\Sigma$ sd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

### Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

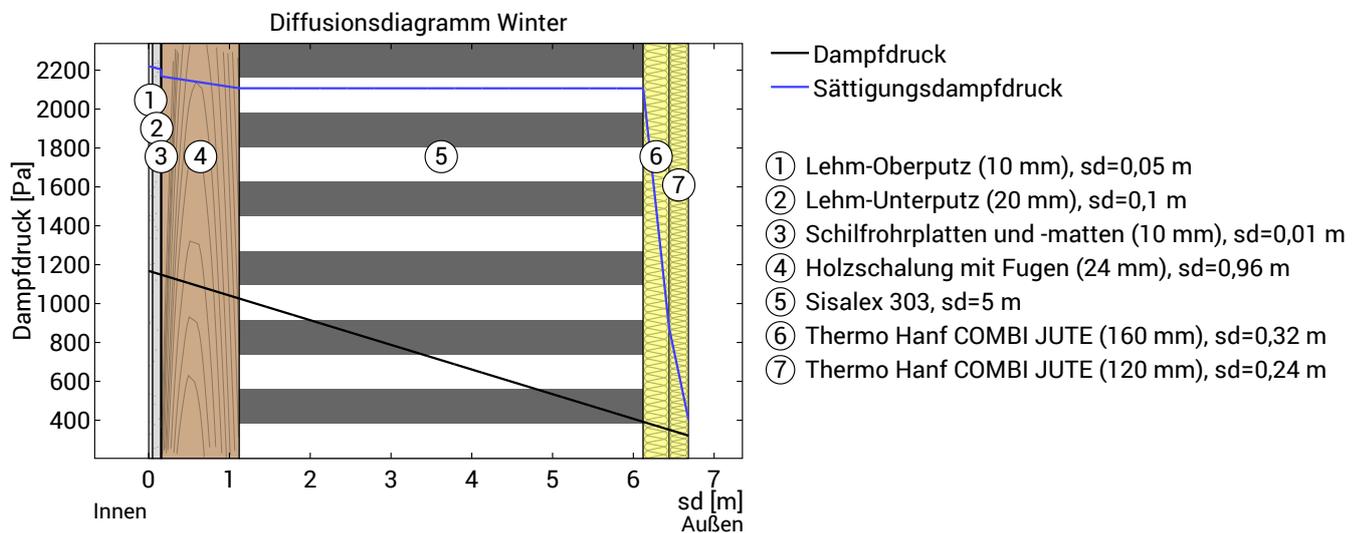
Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 53%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht.



### Tauperiode (Winter)

#### Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit	$p_i = 1168 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit	$p_e = 321 \text{ Pa}$
Dauer Tauperiode (90 Tage)	$t_c = 7776000 \text{ s}$
Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft	$\delta_0 = 2.0\text{E}-10 \text{ kg}/(\text{m}^*\text{s}*\text{Pa})$
sd-Wert (gesamtes Bauteil)	$s_{de} = 6,68 \text{ m}$



Unter den angenommenen Bedingungen ist der untersuchte Querschnitt frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren.



Berechne Verdunstungspotential für die Trocknungsreserve in der Tauperiode für die Ebene mit dem geringsten Verdunstungspotential:

$s_d=1,12 \text{ m}$ ;  $x=6,4 \text{ cm}$ ;  $p_s=2107 \text{ pa}$ :

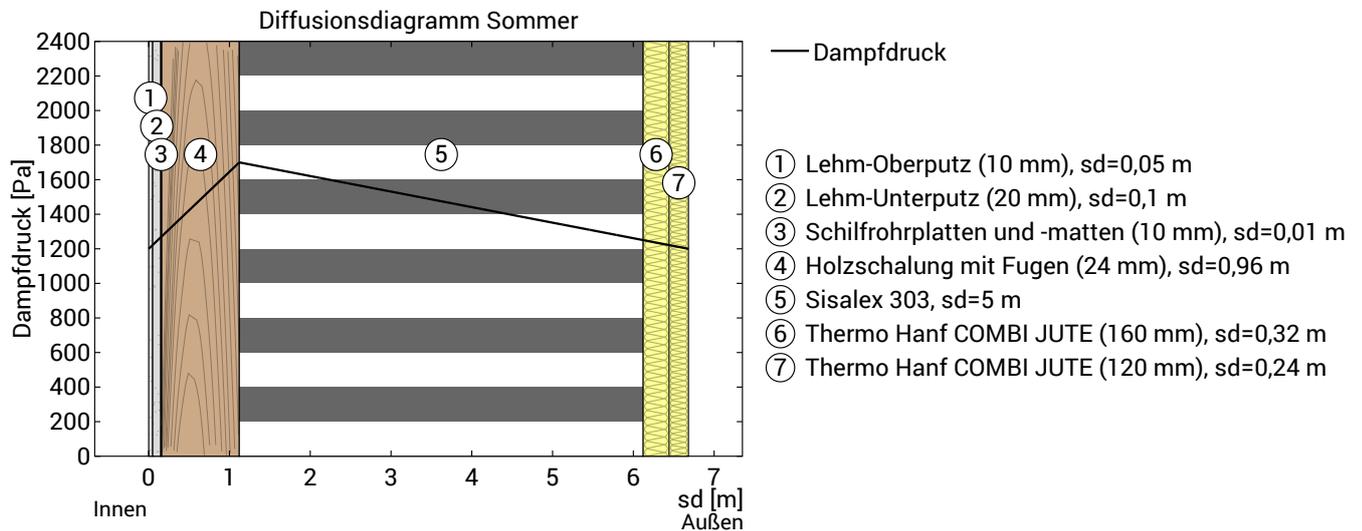
Schichtgrenze zwischen Holzschalung (Decke) mit Fugen und Sisalex 303

$$M_{ev, \text{Tauperiode}} = t_c * \delta_0 * ((p_s - p_i) / s_{d_{ev}} + (p_s - p_e) / (s_{d_e} - s_{d_{ev}})) = 1,801 \text{ kg}/\text{m}^2$$

### B3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Oberste Geschossdecke, $U=0,14 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

#### Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen	
Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 1700 \text{ Pa}$
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Tauwasserfreies Bauteil: Es wird die maximal mögliche Verdunstungsmasse für die Trocknungsreserve berechnet. Betrachtet wird die Ebene, die in der Tauperiode das geringste Verdunstungspotential aufweist bei  $s_d=1,12 \text{ m}$ ;  $x=6,4 \text{ cm}$ : Schichtgrenze zwischen Holzschalung (Decke) mit Fugen und Sisalex 303  
 Verdunstungsmenge:  $M_{ev} = \delta_0 \cdot t_{ev} \cdot \left[ \frac{(p_s - p_i)}{s_d} + \frac{(p_s - p_e)}{(s_{de} - s_d)} \right] = 0,83 \text{ kg/m}^2$

#### Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

Tauwasserfreies Bauteil: Das Verdunstungspotential der Tauperiode wird ebenfalls berücksichtigt.

Trocknungsreserve:  $M_r = (M_{ev} + M_{ev, \text{Tauperiode}}) \cdot 1000 = 2634 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Mindestens gefordert bei Wänden und Decken:  $100 \text{ g/m}^2/\text{a}$



#### Bewertung gemäß DIN 4108-3

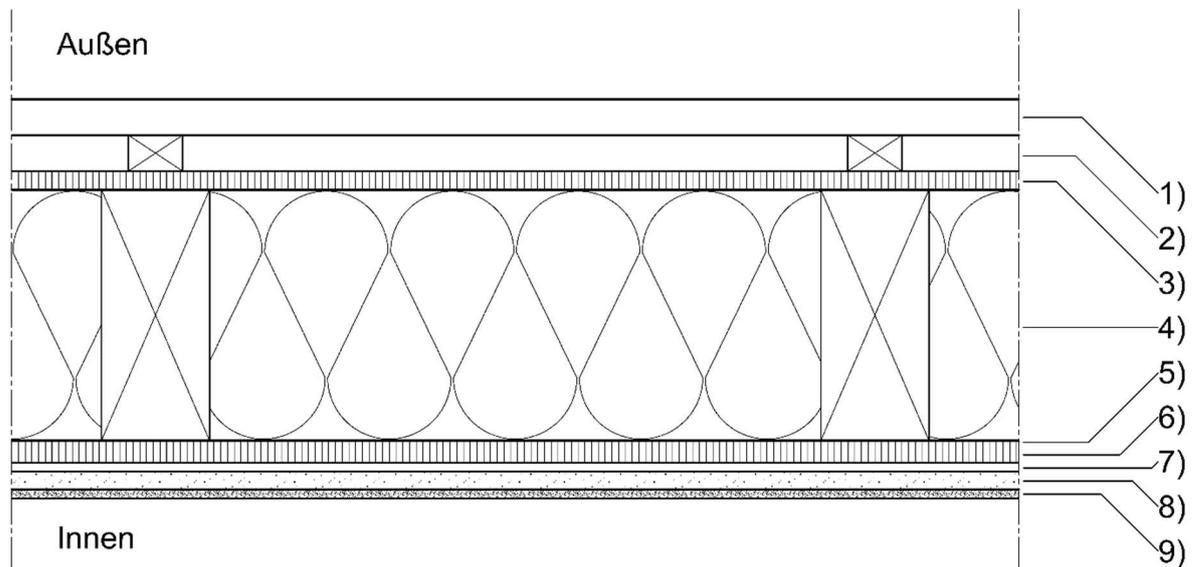
Das Bauteil ist diffusionstechnisch zulässig.

#### Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

## C1: Dachaufbau



Aufbau von außen nach innen:

- 1) 40/60 mm Traglattung - Biberschwanzdeckung
- 2) 40 mm Hinterlüftung
- 3) 21 mm Schalung Fichte
- 4) 28 cm Hanfwole - 12/28 cm Sparren
- 5) Dampfbremse
- 6) 24 mm Schalung Fichte
- 7) 10 mm Schilfrohrmatte
- 8) 20 mm Lehm Unterputz
- 9) 10 mm Lehm Unterputz

## C2: BKI, Berechnung Bauteile, Dach

### Bauteilaufbau: Dachaufbau über beheizt

#### Berechnung des oberen Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{T'}$

Bereich 1 Anteil: 86,96% (f=0,8696)	Dicke d	$\lambda$	R	maßg. $\mu$	äquiv. Dicke	Temp.- Verlauf	Satt- dampf- druck
Baustoffe	[cm]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[-]	[m]	[°C]	[Pa]
Wärmeübergang innen $R_{si}$			0,100			20,0	2337
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	1,00	0,730	0,014	5	0,05	19,2	2224
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	2,0	0,730	0,027	5	0,1	19,2	2218
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	2,4	0,120	0,200	20	0,48	19,1	2206
Diffusionshemmende Schicht (feuchtevariabel 0,5..5m), luftdicht	0,10	0,250	0,004		5	18,4	2120
Hanf-Dämmplatte 040	28,0	0,040	7,000	1	0,28	18,4	2118
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	2,1	0,120	0,175	50	1,05	-3,9	441
Luftschicht schwach bel., Wärmestrom aufwärts (15-300 mm)	4,0		0,080	1	0,04	-4,5	420
Dachziegelsteine Ton	5,0	1,000	0,050	40	2	-4,7	411
Wärmeübergang außen $R_{se}$			0,100			-4,9	406
			7,750		9,0	-5,0	401
			$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$		$\Sigma S_d =$		

Temperaturverlauf und Satttdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit  $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  berechnet.

Bereich 2 Anteil: 6,52% (f=0,0652)	Dicke d	$\lambda$	R	maßg. $\mu$	äquiv. Dicke	Temp.- Verlauf	Satt- dampf- druck
Baustoffe	[cm]	[W/mK]	[m <sup>2</sup> K/W]	[-]	[m]	[°C]	[Pa]
Wärmeübergang innen $R_{si}$			0,100			20,0	2337
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	1,00	0,730	0,014	5	0,05	18,0	2067
Lehmstoffe (1600 kg/m <sup>3</sup> )	2,0	0,730	0,027	5	0,1	17,9	2053
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	2,4	0,120	0,200	20	0,48	17,7	2025
Diffusionshemmende Schicht (feuchtevariabel 0,5..5m), luftdicht	0,10	0,250	0,004		5	16,1	1833
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	28,0	0,120	2,333	20	5,6	16,1	1829
Holz - Fichte PCAB (450 kg/m <sup>3</sup> )	2,1	0,120	0,175	20	0,42	-2,3	505
Luftschicht schwach bel., Wärmestrom aufwärts (15-300 mm)	4,0		0,080	1	0,04	-3,7	450
Dachziegelsteine Ton	5,0	1,000	0,050	40	2	-4,3	426
Wärmeübergang außen $R_{se}$			0,100			-4,7	412
			3,083		13,7	-5,0	401
			$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$		$\Sigma S_d =$		

Temperaturverlauf und Satttdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit  $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  berechnet.

$$R_{T'} = 1/\Sigma(f/R) = 6,526 \text{ m}^2\text{K/W}$$

### Berechnung des unteren Grenzwertes des Wärmedurchgangswiderstandes $R_{T''}$

Schicht Nr.	d [cm]	$\lambda_a$ [W/mK]	$f_a$ [%]	$\lambda_b$ [W/mK]	$f_b$ [%]	$\lambda_c$ [W/mK]	$f_c$ [%]	$\lambda_d$ [W/mK]	$f_d$ [%]	$R_j$ [m <sup>2</sup> K/W]
1	1,00	0,730	86,86	0,730	6,51	0,730	0,00	0,730	6,62	0,014
2	2,00	0,730	86,86	0,730	6,51	0,730	0,00	0,730	6,62	0,027
3	2,40	0,120	86,86	0,120	6,51	0,120	0,00	0,120	6,62	0,200
4	0,10	0,250	86,86	0,250	6,51	0,250	0,00	0,250	6,62	0,004
5	28,00	0,040	86,86	0,120	6,51	0,040	0,00	0,120	6,62	5,537
6	2,10	0,120	86,86	0,120	6,51	0,120	0,00	0,120	6,62	0,175
7	4,00	0,500	86,86	0,500	6,51	0,120	0,00	0,120	6,62	0,084
8	5,00	1,000	86,86	1,000	6,51	1,000	0,00	1,000	6,62	0,050

$$R_{T''} = R_{si} + \sum R_j + R_{se} = 6,291 \text{ m}^2\text{K/W}$$

### Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U

$$R_T = (R_{T'} + R_{T''}) / 2 = (6,526 + 6,291) / 2 = 6,409 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = 1/R_T = 0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Die mittlere flächenbezogene Masse des Bauteils beträgt  $m' = 196,6 \text{ kg/m}^2$ .

Der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 beträgt  $\min R = 1,00 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

(DIN 4108-2 Abs. 5.1.3: inhomogene Bauteile)

Diese Anforderung ist mit vorh.  $R = 6,21 \text{ m}^2\text{K/W}$  erfüllt.

Der Mindestwärmeschutz des Gefachbereiches beträgt  $\min R = 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ . (DIN 4108-2 Abs. 5.1.3)

Diese Anforderung ist mit vorh.  $R = 7,55 \text{ m}^2\text{K/W}$  erfüllt.

### Wirksame Wärmekapazität des Bauteils (10-cm-Regel)

$$C_{\text{wirk},i} = 20,50 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

$$C_{\text{wirk},e} = 24,79 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

### Wirksame Wärmekapazität des Bauteils für die Berechnung der Nachtabsenkung (3-cm-Regel)

$$C_{\text{wirk},i} = 13,35 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

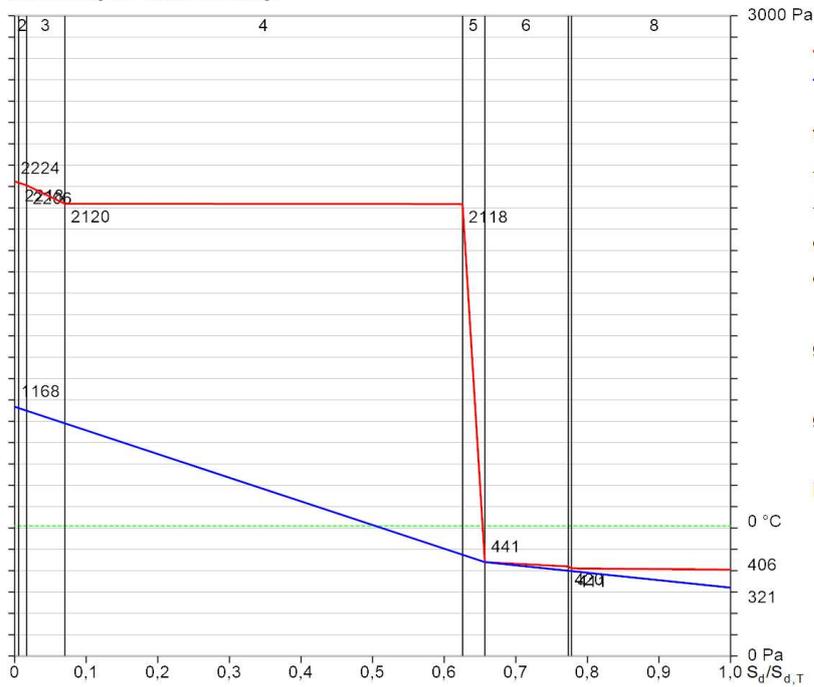
$$C_{\text{wirk},e} = 13,35 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

# Berechnung der Wasserdampf-Diffusion und des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2018-10

## Bereich 1

### Tauperiode (Winter)

Berechnung der Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$t_t = 2160 \text{ h}$$

$$\vartheta_a = -5,0 \text{ °C}$$

$$\vartheta_i = 20,0 \text{ °C}$$

$$\varphi_a = 80 \%$$

$$\varphi_i = 50 \%$$

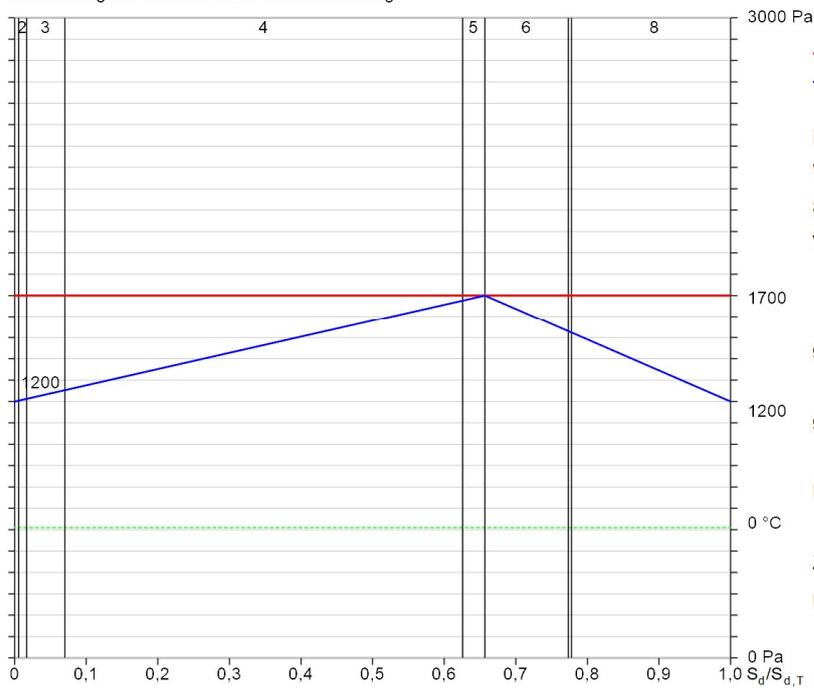
$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_c}{S_{d,i}} = 0,08867 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{S_{d,e}} = 0,02788 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_c = t_c \cdot (g_i - g_e) = 131,3 \text{ g/m}^2$$

### Verdunstungsperiode (Sommer)

Berechnung der verdunstenden Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

Dauer Verdunstungsperiode  $t_v = 2160 \text{ h}$

Wasserdampfdruck Außen: 1200 Pa

Sättigungsdampfdruck: 1700 Pa

Verdunstung von einem Punkt

$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_i}{S_{d,i}} = 0,06091 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{S_{d,e}} = 0,1165 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_{e,v} = 383,2 \text{ g/m}^2$$

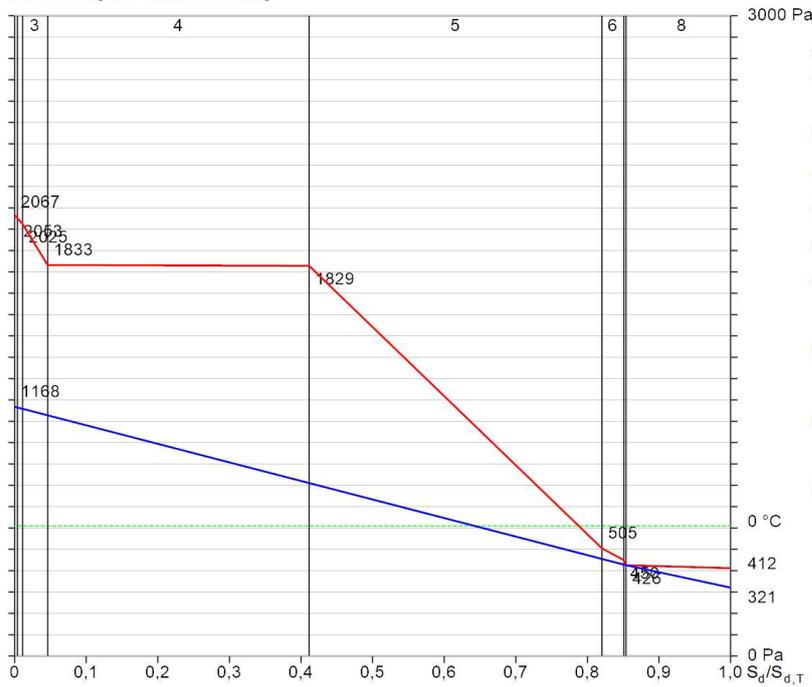
Zur Beurteilung der anfallenden Tauwasser-  
masse siehe DIN 4108-3:2018-10.

## Berechnung der Wasserdampf-Diffusion und des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2018-10

### Bereich 2

#### Tauperiode (Winter)

Berechnung der Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$t_t = 2160 \text{ h}$$

$$\vartheta_a = -5,0 \text{ °C}$$

$$\vartheta_i = 20,0 \text{ °C}$$

$$\varphi_a = 80 \%$$

$$\varphi_i = 50 \%$$

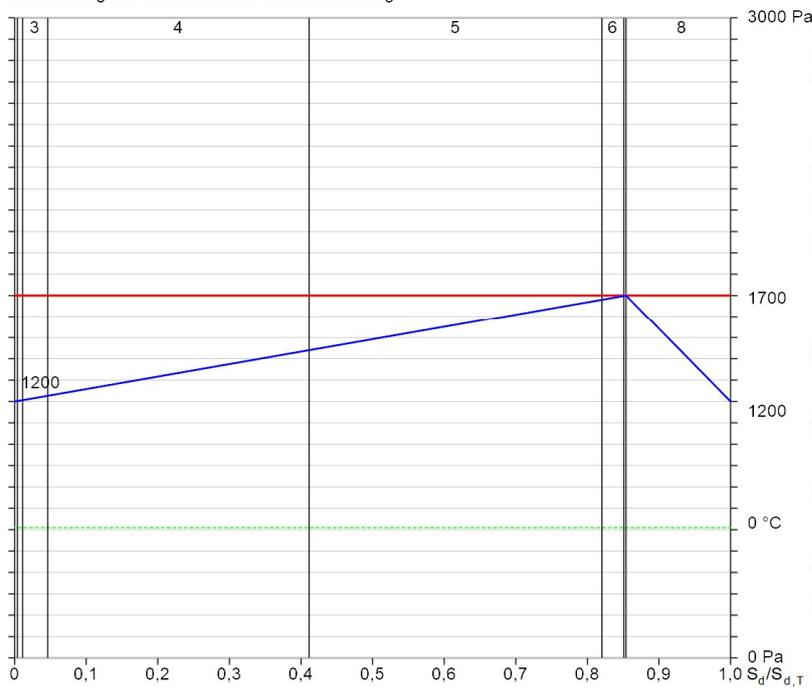
$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_i - p_c}{s_{d,i}} = 0,04572 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{s_{d,e}} = 0,03789 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$$

$$M_c = t_c \cdot (g_i - g_e) = 16,9 \text{ g}/\text{m}^2$$

#### Verdunstungsperiode (Sommer)

Berechnung der verdunstenden Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

Dauer Verdunstungsperiode  $t_v = 2160 \text{ h}$

Wasserdampfdruck Außen: 1200 Pa

Sättigungsdampfdruck: 1700 Pa

Verdunstung von einem Punkt

$$g_i = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_i}{s_{d,i}} = 0,0308 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$$

$$g_e = \delta_0 \cdot \frac{p_c - p_e}{s_{d,e}} = 0,18 \text{ g}/(\text{m}^2\text{h})$$

$$M_{e,v} = 455,3 \text{ g}/\text{m}^2$$

Zur Beurteilung der anfallenden Tauwassermasse siehe DIN 4108-3:2018-10.

## C3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Dach

Dachkonstruktion

### U-Wert-Berechnung nach DIN EN ISO 6946

#	Material	Dicke [cm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,100
1	Lehm-Unterputz	1,00	0,910	0,011
2	Lehm-Oberputz	2,00	0,910	0,022
3	Schilfrohrplatten und -matten	1,00	0,120	0,083
4	Holzschalung (Decke) mit Fugen	2,40	0,175	0,137
5	Sisalex 303	0,03	0,230	0,001
6	Thermo Hanf COMBI JUTE	28,00	0,040	7,000
	Fichte (13%)	28,00	0,130	2,154
7	Holzschalung (Decke) mit Fugen	2,10	0,175	0,120
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,100

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung aufwärts

Rse: Wärmestromrichtung aufwärts, außen: Hinterlüftungsebene

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{\text{tot;upper}} = 6,150 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{\text{tot;lower}} = 5,986 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

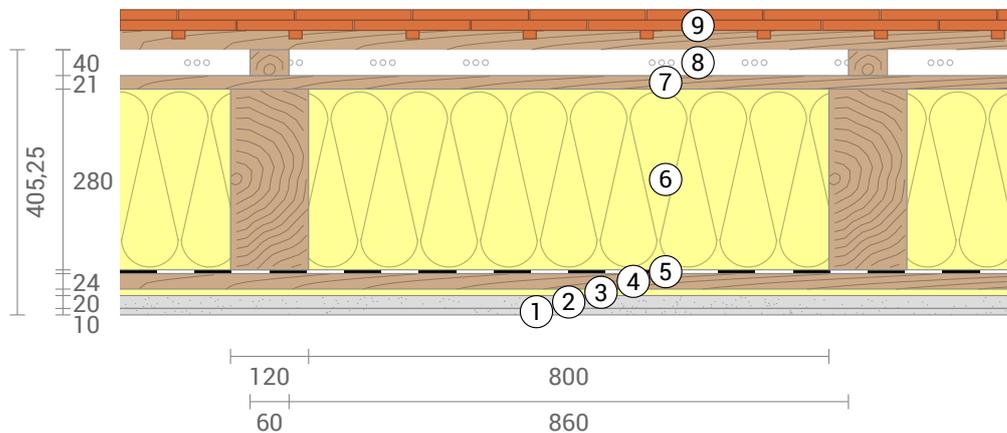
Prüfe Anwendbarkeit:  $R_{\text{tot;upper}} / R_{\text{tot;lower}} = 1,027$  (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

Wärmedurchgangswiderstand  $R_{\text{tot}} = (R_{\text{tot;upper}} + R_{\text{tot;lower}})/2 = 6,068 \text{ m}^2\text{K/W}$

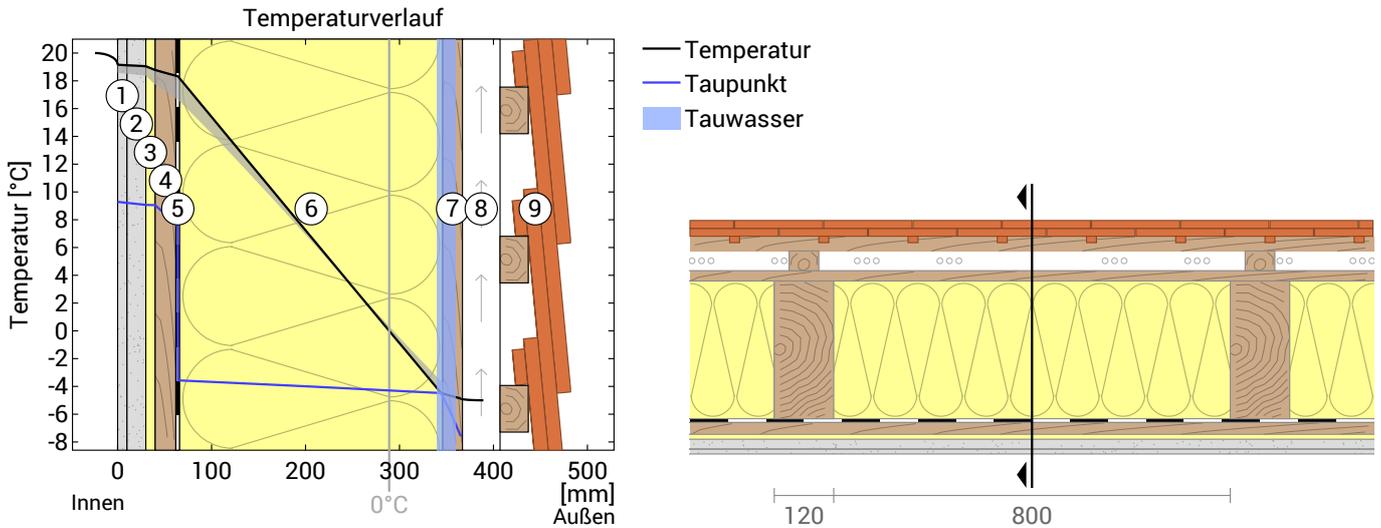
Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 1,3%

Wärmedurchgangskoeffizient  $U = 1/R_{\text{tot}} = 0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$



C3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Dach, U=0,16 W/(m²K)

## Temperaturverlauf



- ① Lehm-Unterputz (10 mm)                      ④ Holzschalung mit Fugen (24 mm)                      ⑦ Holzschalung mit Fugen (21 mm)
- ② Lehm-Oberputz (20 mm)                      ⑤ Sisalex 303    ⑧ Hinterlüftung (40 mm)
- ③ Schilfrohrplatten und -matten (10 mm) ⑥ Thermo Hanf COMBI JUTE (280 mm) ⑨ Biberschwanzziegel inkl. Lattung ...

**Links:** Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

**Rechts:** Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

### Schichten (von innen nach außen)

#	Material	λ [W/mK]	R [m²K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m²]	
				min	max		
Wärmeübergangswiderstand*				0,250	18,6	20,0	
1	1 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,011	18,5	19,2	16,0	
2	2 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,022	18,4	19,1	30,0	
3	1 cm Schilfrohrplatten und -matten	0,120	0,083	17,7	19,1	3,0	
4	2,4 cm Holzschalung (Decke) mit Fugen	0,175	0,137	16,6	18,8	16,8	
5	0,025 cm Sisalex 303	0,230	0,001	16,6	18,3	0,2	
6	28 cm Thermo Hanf COMBI JUTE	0,040	7,000	-4,5	18,3	9,0	
	28 cm Fichte (13%)	0,130	2,154	-3,7	17,1	16,4	
7	2,1 cm Holzschalung (Decke) mit Fugen	0,175	0,120	-4,9	-3,6	14,7	
Wärmeübergangswiderstand*				0,040	-5,0	-4,7	
8	4 cm Hinterlüftung (Außenluft)			-5,0	-5,0	0,0	
9	7,5 cm Biberschwanzziegel inkl. Lattung			-5,0	-5,0	70,0	
48,025 cm Gesamtes Bauteil			6,094			177,3	

\*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max):      18,6°C    19,0°C    19,2°C  
 Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max):    -4,9°C    -4,8°C    -4,7°C

C3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Dach,  $U=0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018 Anhang A

Dieser Feuchteschutznachweis ist nur bei **nicht klimatisierten** Wohn- oder wohnähnlich genutzten Gebäuden gültig.

Bei Dachkonstruktionen mit **Plattenbelägen und Holzrosten** darf diese Norm nicht angewendet werden. Ob diese Konstruktion darunter fällt, ist vom Planer zu prüfen.

Bitte beachten Sie die Hinweise am Ende dieser Feuchteschutzberechnungen.

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	sd [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	T [°C]	ps [Pa]	$\Sigma$ sd [m]
Wärmeübergangswiderstand			0,250			19,18	2222	0
1	1 cm Lehm-Unterputz	0,910	0,011	0,05	1600	19,15	2217	0,05
2	2 cm Lehm-Oberputz	0,910	0,022	0,1	1500	19,08	2207	0,15
3	1 cm Schilfrohrplatten und -matten	0,120	0,083	0,01	300	18,81	2170	0,16
4	2,4 cm Holzschalung (Decke) mit Fugen	0,175	0,137	0,96	700	18,36	2111	1,12
5	0,025 cm Sisalex 303	0,230	0,001	5	720	18,35	2110	6,12
6	28 cm Thermo Hanf COMBI JUTE	0,040	7,000	0,28	37	-4,48	420	6,4
7	2,1 cm Holzschalung (Decke) mit Fugen	0,175	0,120	0,84	700	-4,87	406	7,24
Wärmeübergangswiderstand			0,040					

Temperatur (T), Dampfsättigungsdruck (ps) und die Summe der sd-Werte ( $\Sigma$ sd) gelten jeweils an den Schichtgrenzen.

### Luftfeuchte an der Bauteiloberfläche

Die relative Luftfeuchtigkeit auf der raumseitigen Bauteiloberfläche beträgt 53%. Anforderungen zur Vermeidung von Baustoffkorrosion hängen von Material und Beschichtung ab und wurden nicht untersucht. ✔

### Tauperiode (Winter)

#### Randbedingungen

Dampfdruck innen bei 20°C und 50% Luftfeuchtigkeit

$p_i = 1168 \text{ Pa}$

Dampfdruck außen bei -5°C und 80% Luftfeuchtigkeit

$p_e = 321 \text{ Pa}$

Dauer Tauperiode (90 Tage)

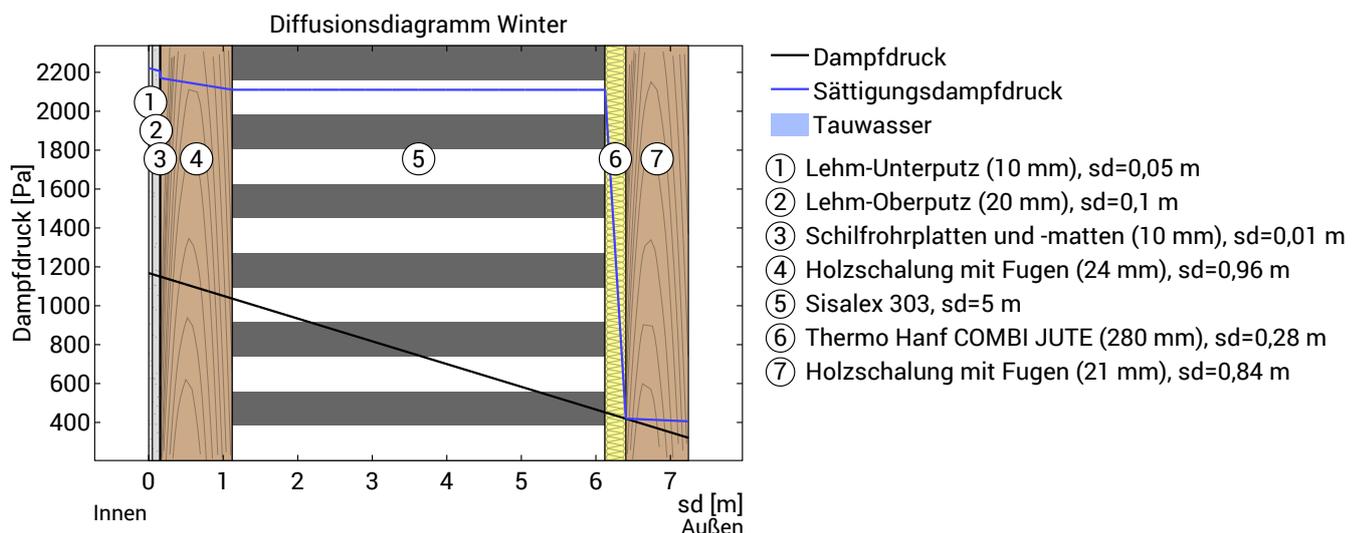
$t_c = 7776000 \text{ s}$

Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in ruhender Luft

$\delta_0 = 2.0E-10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{sPa})$

sd-Wert (gesamtes Bauteil)

$s_{de} = 7,24 \text{ m}$



Unter den angenommenen Bedingungen ist der untersuchte Querschnitt frei von Tauwasserbildung im Bauteilinneren. ✔

Berechne Verdunstungspotential für die Trocknungsreserve in der Tauperiode für die Ebene mit dem geringsten Verdunstungspotential:

$s_d=6,40 \text{ m}$ ;  $x=34,425 \text{ cm}$ ;  $p_s=420 \text{ pa}$ :

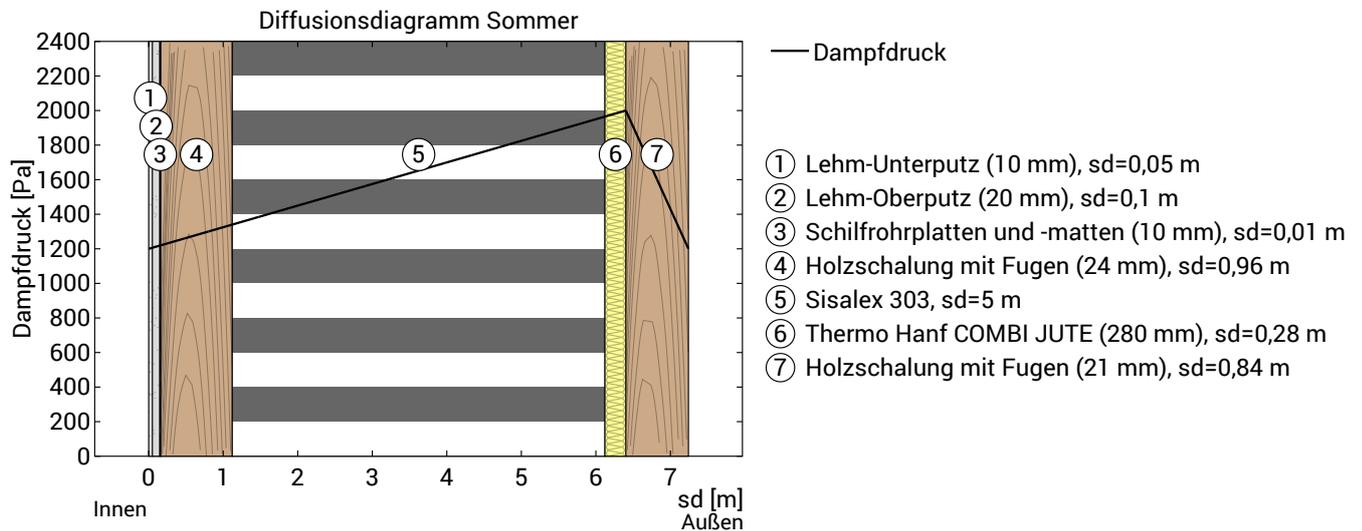
Schichtgrenze zwischen Thermo Hanf COMBI JUTE und Holzschalung (Decke) mit Fugen

$$M_{ev, \text{Tauperiode}} = t_c \cdot \delta_0 \cdot ((p_s - p_i) / s_{d_{ev}} + (p_s - p_e) / (s_{d_e} - s_{d_{ev}})) = 0,001 \text{ kg/m}^2$$

C3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Dach,  $U=0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Verdunstungsperiode (Sommer)

Randbedingungen	
Dampfdruck innen	$p_i = 1200 \text{ Pa}$
Dampfdruck außen	$p_e = 1200 \text{ Pa}$
Sättigungsdampfdruck in der Tauwasserebene	$p_s = 2000 \text{ Pa}$ (Dach gegen Außenluft)
Dauer Verdunstungsperiode (90 Tage)	$t_{ev} = 7776000 \text{ s}$
sd-Werte bleiben unverändert.	



Tauwasserfreies Bauteil: Es wird die maximal mögliche Verdunstungsmasse für die Trocknungsreserve berechnet. Betrachtet wird die Ebene, die in der Tauperiode das geringste Verdunstungspotential aufweist bei  $sd=6,40 \text{ m}$ ;  $x=34,425 \text{ cm}$ : Schichtgrenze zwischen Thermo Hanf COMBI JUTE und Holzschalung (Decke) mit Fugen  
 Verdunstungsmenge:  $M_{ev} = \delta_0 \cdot t_{ev} \cdot \left[ \frac{(p_s - p_i)}{sd} + \frac{(p_s - p_e)}{(sde - sd)} \right] = 1,68 \text{ kg/m}^2$

Trocknungsreserve (DIN 68800-2)

Tauwasserfreies Bauteil: Das Verdunstungspotential der Tauperiode wird ebenfalls berücksichtigt.

Trocknungsreserve:  $M_r = (M_{ev} + M_{ev, \text{Tauperiode}}) \cdot 1000 = 1677 \text{ g/m}^2/\text{a}$

Mindestens gefordert bei Dächern:  $250 \text{ g/m}^2/\text{a}$



Bewertung gemäß DIN 4108-3

Das Bauteil ist diffusionstechnisch zulässig.

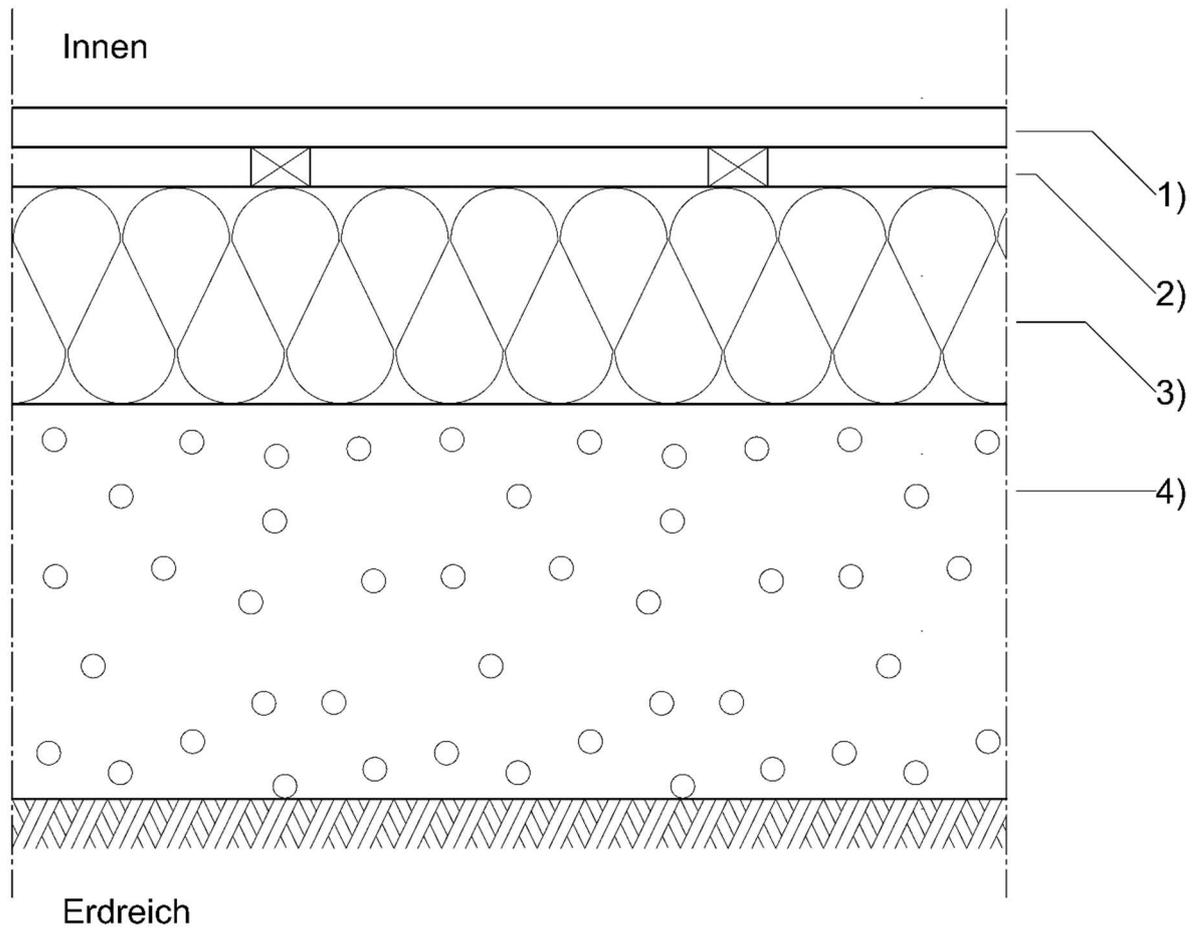
Hinweise

Bei inhomogenen Konstruktionen, wie Skelett-, Ständer- oder Rahmenbauweisen sowie bei Holzbalken-, Sparren- oder Fachwerk-Konstruktionen o.ä. sind die eindimensionalen Diffusionsberechnungen nur für den Gefachbereich nachzuweisen. Ausnahmefälle sind Sonderkonstruktionen, bei denen z.B. die diffusionshemmende Schicht auch abschnittsweise über den Außenbereich verlegt wird. In diesen Ausnahmefällen ist die hier durchgeführte Berechnung ungültig.

DIN 4108-3 beschreibt in Abschnitt 5.3 Bauteile, für die kein rechnerischer Tauwassernachweis erforderlich ist, da kein Tauwasserrisiko besteht oder das Verfahren für die Beurteilung nicht geeignet ist. Ob das hier untersuchte Bauteil darunter ist, kann mit den vorliegenden Informationen nicht beurteilt werden.

Es wird angenommen, dass das Dach nicht überwiegend verschattet ist und keine sehr helle Oberfläche hat (Benutzerangabe). Dies wirkt sich positiv auf das Trocknungsvermögen aus.

## D1: Bodenaufbau gegen Erdreich



Aufbau von innen nach Erdreich:

- 1) 40 mm Holzdielen Kiefer
- 2) 40 mm Luftschicht
- 3) 22 cm Hanfkalk
- 4) 40 cm Schotter 16/32

## D2: BKI, Berechnung Bauteile, Bodenaufbau gegen Erdreich

### Bauteilaufbau: Bodenaufbau gegen Erdreich

#### Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten U

Baustoffe	Dicke d [cm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	maßg. $\mu$ [-]	äquiv. Dicke [m]	Temp.- Verlauf [°C]	Satt- dampf- druck [Pa]
Wärmeübergang innen R <sub>si</sub>			0,170			20,0	2337
Hanfkalk	22,0	0,068	3,235	2	0,44	18,5	2125
Schotter 16/32 (getrocknet)	40,0	0,700	0,571	3	1,2	-1,3	550
Wärmeübergang außen R <sub>se</sub>			0,000			-5,0	410
		$R_T = \Sigma(d_i/\lambda_i) =$	3,977	$\Sigma S_d =$	1,6		

Temperaturverlauf und Sattdampfdruck werden gem. DIN 4108-3 mit R<sub>si</sub> = 0,25 m<sup>2</sup>K/W und R<sub>se</sub> = 0,04 m<sup>2</sup>K/W berechnet.

$$U = 1/R_T = 0,25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Die mittlere flächenbezogene Masse des Bauteils beträgt m' = 626,0 kg/m<sup>2</sup>.

Der Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2:2013-02 beträgt min R = 0,90 m<sup>2</sup>K/W.  
Diese Anforderung ist mit vorh. R = 3,81 m<sup>2</sup>K/W erfüllt.

#### Wirksame Wärmekapazität des Bauteils (10-cm-Regel)

$$C_{\text{wirk},i} = 11,67 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

$$C_{\text{wirk},e} = 38,89 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

#### Wirksame Wärmekapazität des Bauteils für die Berechnung der Nachtabsenkung (3-cm-Regel)

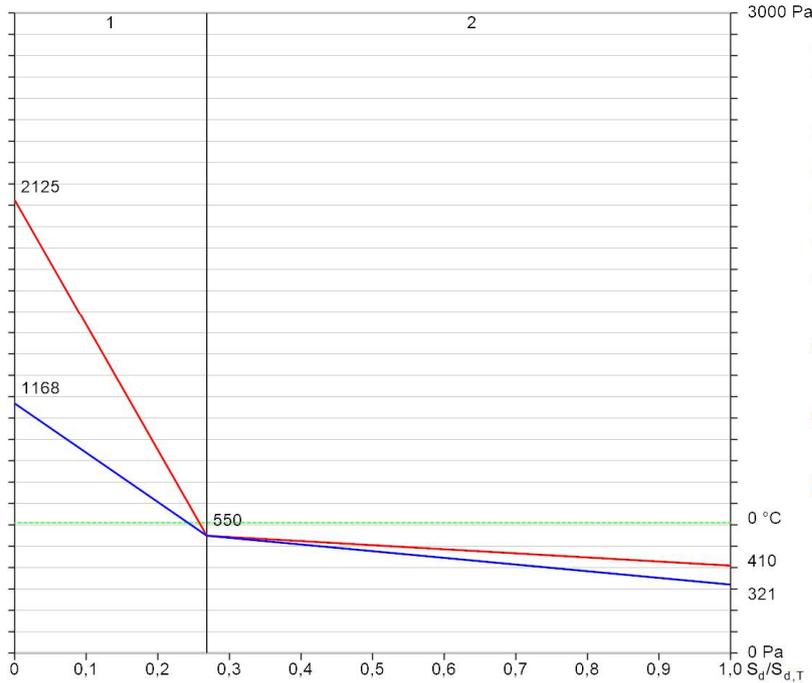
$$C_{\text{wirk},i} = 3,50 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

$$C_{\text{wirk},e} = 11,67 \text{ Wh/(m}^2\text{K)}$$

## Berechnung der Wasserdampf-Diffusion und des Tauwasseranfalls nach DIN 4108-3:2018-10

### Tauperiode (Winter)

Berechnung der Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

$$t_t = 2160 \text{ h}$$

$$\vartheta_a = -5,0 \text{ °C}$$

$$\vartheta_i = 20,0 \text{ °C}$$

$$\varphi_a = 80 \%$$

$$\varphi_i = 50 \%$$

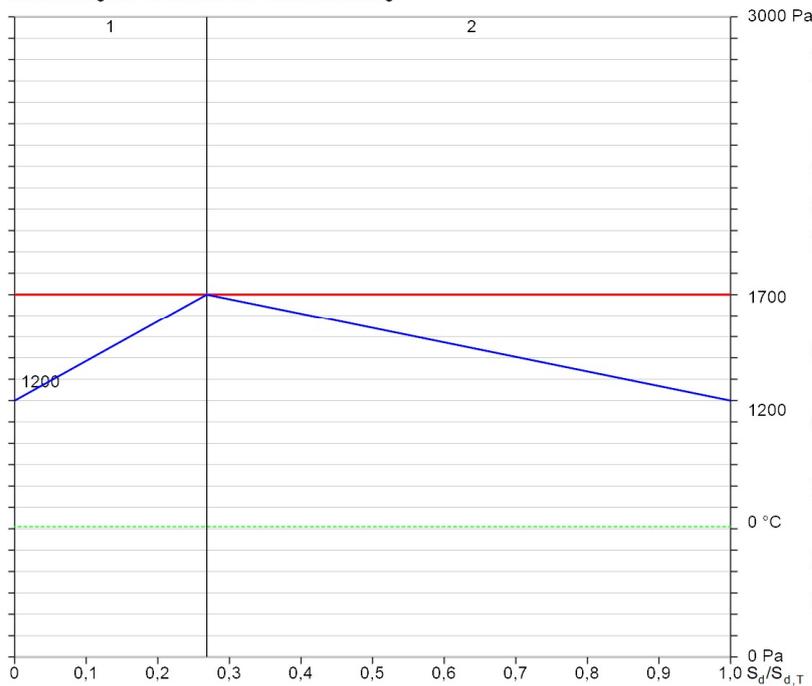
$$g_i = \delta_0 * \frac{p_i - p_c}{S_{d,i}} = 1,013 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 * \frac{p_c - p_e}{S_{d,e}} = 0,1372 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_c = t_c * (g_i - g_e) = 1891,0 \text{ g/m}^2$$

### Verdunstungsperiode (Sommer)

Berechnung der verdunstenden Tauwassermenge



— Sattdampfdruck  
— Dampfdruckverlauf

Dauer Verdunstungsperiode  $t_v = 2160 \text{ h}$

Wasserdampfdruck Außen: 1200 Pa

Sättigungsdampfdruck: 1700 Pa

Verdunstung von einem Punkt

$$g_i = \delta_0 * \frac{p_c - p_i}{S_{d,i}} = 0,8182 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$g_e = \delta_0 * \frac{p_c - p_e}{S_{d,e}} = 0,3 \text{ g/(m}^2\text{h)}$$

$$M_{eV} = 2415,3 \text{ g/m}^2$$

Zur Beurteilung der anfallenden Tauwasser-  
masse siehe DIN 4108-3:2018-10.

# D3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Bodenaufbau gegen Erdreich

## U-Wert-Berechnung

#	Material	Dicke [cm]	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]
	Wärmeübergangswiderstand innen (Rsi)			0,170
1	Dielung Kiefernholz	4,00	0,140	0,286
2	Luftschicht (ruhend)	4,00	0,198	0,202
	Fichte (9,1%)	4,00	0,130	0,308
3	IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	22,00	0,068	3,235
4	Schotter, kapillarbrechende Schicht	40,00	1,000	0,400
	Wärmeübergangswiderstand außen (Rse)			0,000

Die Wärmeübergangswiderstände wurden gemäß DIN 6946 Tabelle 7 gewählt.

Rsi: Wärmestromrichtung abwärts

Rse: Wärmestromrichtung abwärts, außen: Erdreich

Wärmedurchlasswiderstände von ruhenden Luftschichten wurden wie folgt berechnet:

Schicht 2.1: Dicke 4 cm, Breite 60 cm, DIN EN ISO 6946 Tabelle 8, Wärmestromrichtung abwärts

Oberer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{tot,upper} = 4,303 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Unterer Grenzwert des Wärmedurchgangswiderstandes  $R_{tot,lower} = 4,301 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Prüfe Anwendbarkeit:  $R_{tot,upper} / R_{tot,lower} = 1,001$  (maximal erlaubt: 1,5)

Das Verfahren darf angewendet werden.

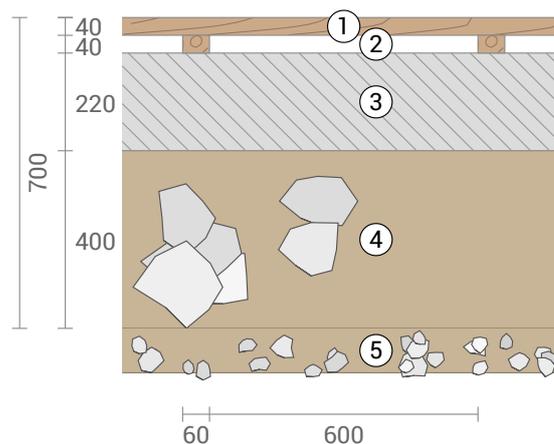
Wärmedurchgangswiderstand  $R_{tot} = (R_{tot,upper} + R_{tot,lower})/2 = 4,302 \text{ m}^2\text{K/W}$

Abschätzung des maximalen relativen Fehlers nach Absatz 6.7.2.5: 0,034%

DIN 6946 darf nicht angewendet werden weil das Bauteil an Erdreich grenzt. Für das alternative Verfahren aus DIN V 4108-6 Anhang E fehlen jedoch die benötigten Angaben zu Größe und Lage dieses Bauteils.

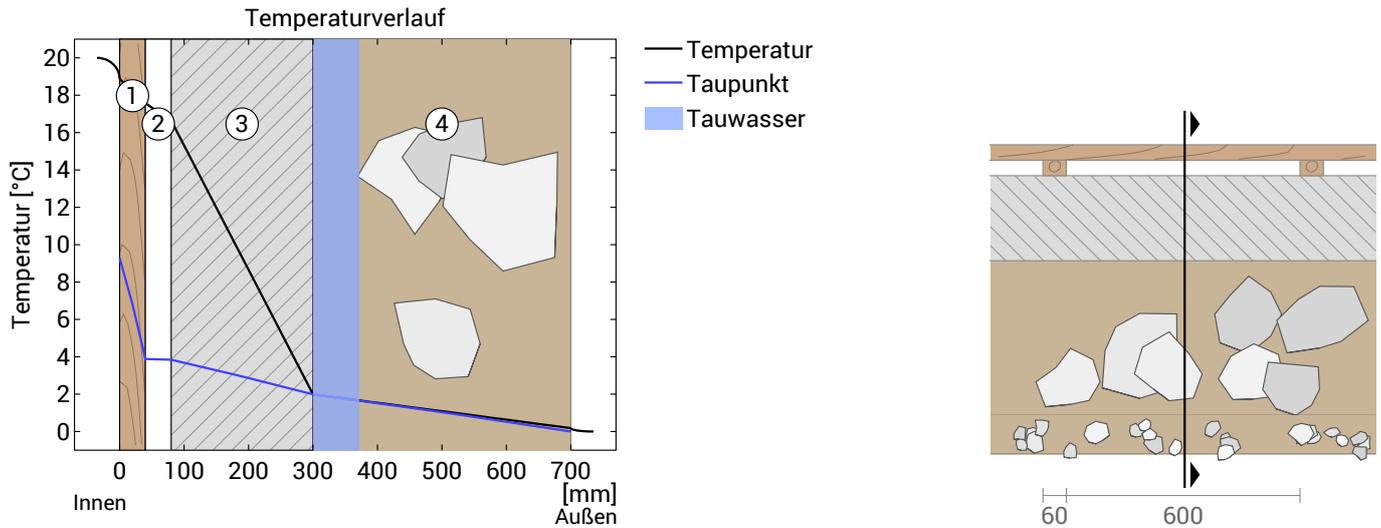
Wärmedurchgangskoeffizient  $U = 1/R_{tot} = 0,23 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Berechnet wurde der konstruktive U-Wert. Wärmeverluste über Erdreich oder Keller wurden nicht berücksichtigt weil die dazu notwendigen Angaben fehlen.



D3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Bodenaufbau gegen Erdreich,  $U=0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Temperaturverlauf



- ① Dielung Kiefernholz (40 mm)
- ② Luftschicht (40 mm)
- ③ IsoHemp Hanf Kalk Mischung an B...
- ④ Schotter, kapillarbrechende Schic...

**Links:** Verlauf von Temperatur und Taupunkt an der in der rechten Abbildung markierten Stelle. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Bauteils an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus.

**Rechts:** Maßstäbliche Zeichnung des Bauteils.

## Schichten (von innen nach außen)

#	Material	$\lambda$ [W/mK]	R [m <sup>2</sup> K/W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m <sup>2</sup> ]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,250	18,9	20,0	
1	4 cm Dielung Kiefernholz	0,140	0,286	17,6	18,9	22,0
2	4 cm Luftschicht (ruhend)	0,198	0,202	16,5	17,6	0,0
	4 cm Fichte (9,1%)	0,130	0,308	16,5	17,7	1,6
3	22 cm IsoHemp Hanf Kalk Mischung an Bauplatz	0,068	3,235	2,0	16,7	66,0
4	40 cm Schotter, kapillarbrechende Schicht	1,000	0,400	0,2	2,0	596,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,040	0,0	0,2	
5	Erdreich			0,0	0,0	119,0
	70 cm Gesamtes Bauteil		4,302			685,7

\*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 4108-3 für Feuchteschutz und Temperaturverlauf. Die Werte für die U-Wert-Berechnung finden Sie auf der Seite 'U-Wert-Berechnung'.

Oberflächentemperatur innen (min / mittel / max): 18,9°C 18,9°C 18,9°C  
Oberflächentemperatur außen (min / mittel / max): 0,2°C 0,2°C 0,2°C

D3: Ubakus, Berechnung Bauteile, Bodenaufbau gegen Erdreich,  $U=0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

## Feuchteschutz nach DIN 4108-3:2018 Anhang A

DIN 4108-3 ist bei erdberührten Bauteilen nicht anwendbar.

## E1: U-Wert Berechnung Fenster

Gemäß Produktnorm EN 14351-1

$$U_W = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l \cdot \Psi}{A_f + A_g} + \text{Zuschlag}$$
$$= \frac{0,416 \cdot 1,51 + 0,475 \cdot 1,5 + 2,79 \cdot 0,053}{0,416 + 0,475} + 0,4 = 2,07 \frac{W}{m_2K}$$

### Flächen

Gesamte Fensterfläche (Rohbaumaß):

$$A_W = 1,1 \cdot 0,81 = 0,891 m^2$$

Glasfläche:

$$A_g = 0,288 \cdot 0,275 \cdot 6 = 0,475 m^2$$

Fläche Rahmen:

$$A_f = 0,891 - 0,475 = 0,416 m^2$$

### Verhältnis der Verglasung

$$1,1 : 0,81 \rightarrow 1,358 : 1$$

Glasfläche:

$$1,358x \cdot 1x = 0,475 m^2 \rightarrow x = 0,591 m = b \rightarrow h = 1,358 \cdot 0,591 = 0,803 m$$

Probe:  $A_g = b \cdot h = 0,591 \cdot 0,803 = 0,475 m^2$

U-Werte

Glas:

$$U_g = 1,5 \frac{W}{m^2K}$$

Rahmen:

Rahmendicke 64mm

$$U_f = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{R_{si} + \sum R + R_{se}} = \frac{1}{0,13 + \frac{0,064}{0,13} + 0,04} = 1,51 \frac{W}{m^2K}$$

Länge Glasabstandshalter

$$l = 2 \cdot b_g + 2 \cdot h_g = 2 \cdot 0,591 + 2 \cdot 0,804 = 2,79 \text{ m}$$

Wärmebrückenverlustkoeffizient

$$\psi = 0,053 \frac{W}{mK}$$

Fenstersprossenzuschlag

$$+0,4 \frac{W}{m^2K}$$

## E2: U-Wert Berechnung Außentür

Gemäß Produktnorm EN 14351-1

$$U_D = \frac{A_f \cdot U_f + A_p \cdot U_p + l \cdot \Psi}{A_f + A_p} = \frac{1,01 \cdot 1,14 + 1,22 \cdot 0,96 + 0}{1,01 + 1,22} = 1,04 \frac{W}{m^2K}$$

### Flächen

Gesamte Türfläche (Rohbaumaß):

$$A_D = 2,05 \cdot 1,09 = 2,23 \text{ m}^2$$

Fläche der Füllung:

$$A_p = 1,65 \cdot 0,74 = 1,22 \text{ m}^2$$

Fläche Rahmen:

$$A_f = 2,23 - 1,22 = 1,01 \text{ m}^2$$

### U-Werte

Füllung:

$$U_p = \frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_{si} + \sum R + R_{se}} = \frac{1}{0,13 + 2 \cdot \frac{0,024}{0,13} + \frac{0,02}{0,04} + 0,04} = 0,96 \frac{W}{m^2K}$$

Rahmen:

$$U_f = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{R_{si} + \sum R + R_{se}} = \frac{1}{0,13 + 2 \cdot \frac{0,068 + 0,024}{0,13} + 0,04} = 1,14 \frac{W}{m^2K}$$

$$l \cdot \Psi = 0$$

Wenn im Randbereich kein Einfluss durch Abstandshalter

## F1: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude - Stammdaten

**Der Nachweis wird mit den ab 1. November 2020 geltenden Anforderungen des GEG geführt.**

### **Nachweis des spezifischen Transmissionswärmeverlustes**

zul.  $H_{T'} = 0,354 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

(zul.  $H_{T'}$  aus  $H_{T'}$  Referenzgebäude)

vorh.  $H_{T'} = 141,7/369,4 = 0,384 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   
(8,5 %)

**Der Nachweis wurde nicht erfüllt!**

### **Nachweis des Jahres-Primärenergiebedarfes (Monatsbilanzverfahren)**

$A_N = 136,0 \text{ m}^2$

zul.  $q_P = 0,75 \cdot 88,3 = 66,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

(75% von  $q_P$  Referenzgebäude nach GEG 2020 Anlage 1)

vorh.  $q_P = 4138/136,0 = 30,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (-54,0 %)

In vorh.  $q_P$  wurde ein regenerativer Stromertrag von 11,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) berücksichtigt.

**Der Nachweis wurde erfüllt!**

## F2: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Variante 1

**Der Nachweis wird mit den ab 1. November 2020 geltenden Anforderungen des GEG geführt.**

### **Nachweis des spezifischen Transmissionswärmeverlustes**

zul.  $H_{T'} = 0,354 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

(zul.  $H_{T'}$  aus  $H_{T'}$  Referenzgebäude)

vorh.  $H_{T'} = 116,4/369,4 = 0,315 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (-10,9 %)

**Der Nachweis wurde erfüllt!**

### **Nachweis des Jahres-Primärenergiebedarfes (Monatsbilanzverfahren)**

$A_N = 136,0 \text{ m}^2$

zul.  $q_P = 0,75 \cdot 88,3 = 66,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

(75% von  $q_P$  Referenzgebäude nach GEG 2020 Anlage 1)

vorh.  $q_P = 3664/136,0 = 26,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (-59,3 %)

In vorh.  $q_P$  wurde ein regenerativer Stromertrag von  $11,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  berücksichtigt.

**Der Nachweis wurde erfüllt!**

## F3: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Variante 2

**Der Nachweis wird mit den ab 1. November 2020 geltenden Anforderungen des GEG geführt.**

### **Nachweis des spezifischen Transmissionswärmeverlustes**

zul.  $H_{T'} = 0,354 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

(zul.  $H_{T'}$  aus  $H_{T'}$  Referenzgebäude)

vorh.  $H_{T'} = 115,9/369,4 = 0,314 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (-11,3 %)

**Der Nachweis wurde erfüllt!**

### **Nachweis des Jahres-Primärenergiebedarfes (Monatsbilanzverfahren)**

$A_N = 136,0 \text{ m}^2$

zul.  $q_P = 0,75 \cdot 88,3 = 66,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

(75% von  $q_P$  Referenzgebäude nach GEG 2020 Anlage 1)

vorh.  $q_P = 3655/136,0 = 26,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (-59,4 %)

In vorh.  $q_P$  wurde ein regenerativer Stromertrag von  $11,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  berücksichtigt.

**Der Nachweis wurde erfüllt!**

## F4: Nachweis nach GEG 2020 für Wohngebäude – Variante 3

### Variante: Externe Berechnung Wärmebrücken

Der Nachweis wird mit den ab 1. November 2020 geltenden Anforderungen des GEG geführt.

### Nachweis des spezifischen Transmissionswärmeverlustes

zul.  $H_{T'} = 0,354 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

(zul.  $H_{T'}$  aus  $H_{T'}$  Referenzgebäude)

vorh.  $H_{T'} = 115,9/369,4 = 0,314 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (-11,3 %)

**Der Nachweis wurde erfüllt!**

### Nachweis des Jahres-Primärenergiebedarfes (Monatsbilanzverfahren)

$A_N = 136,0 \text{ m}^2$

zul.  $q_P = 0,75 \cdot 88,3 = 66,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

(75% von  $q_P$  Referenzgebäude nach GEG 2020 Anlage 1)

vorh.  $q_P = 3655/136,0 = 26,9 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  (-59,4 %)

In vorh.  $q_P$  wurde ein regenerativer Stromertrag von  $11,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  berücksichtigt.

**Der Nachweis wurde erfüllt!**