



## Gebäudeerneuerung Oberwallis

Optimierung von Bauprozessen und Erarbeitung von standardisierten technischen Lösungen für die Altbausanierung in teilweise geschützten, historischen Dorfkernen und Altstädten

Teil 7

Bauphysik  
und Baukonstruktion

## Impressum

### Projektleitung

Andreas Müller, Berner Fachhochschule AHB

Thomas Näher, Berner Fachhochschule AHB

### Steuergruppe

Pascal Abgottspon, Abgottspon Werlen Architekten GmbH

Markus Aeschbach, SRP Ingenieur AG

Monika Holzegger, ARGE Dorfkernerneuerung Oberwallis

Andreas Müller, Berner Fachhochschule AHB

Thomas Näher, Berner Fachhochschule AHB

Ulrich Weger, Holzbau Weger AG

### Regionale Wirtschaftspartner

Pascal Abgottspon, Bernard Werlen, Abgottspon Werlen Architekten GmbH

Markus Aeschbach, SRP Ingenieur AG

Hannes Biffiger, Simon Summermatter, Lauber IWISA AG

Stefan Imhof, P. Imhof AG Metallbau

Willy Jossen, Farbe+ Gips AG

Kurt Karlen, Kurt Karlen AG Bau- und Möbelschreinerei

Christoph Noll, Holzbau Noll AG

Reinhard Perren, Schreinerei Perren AG

David Ritz, Thomas Summermatter, Atelier Summermatter Ritz GmbH

Philipp Truffer, Truffer Ingenieurberatung AG

Ulrich Weger, Holzbau Weger AG

Oliver Zurbriggen, Anton Imhof Ingenieurbüro GmbH

### Fördergeber

Innosuisse - Schweizerische Agentur für Innovationsförderung

Innovationsprojekt 28941.1 IP-SBM, Laufzeit Januar 2019 bis Februar 2022

### Herausgeber

Berner Fachhochschule AHB und VETA/NOVA

Editorial Franziska Hänni, Bettina Franke, Berner Fachhochschule AHB

1. Auflage, Juli 2022

### Urheberrecht

Die Leitfäden von VETA/NOVA sind urheberrechtlich geschützt. Sofern Dritte die Leitfäden oder Teile daraus nutzen wollen, muss vorgängig die Zustimmung der Geschäftsstelle VETA/NOVA eingeholt (Mail: info@vetanova.ch) und dann entsprechend referenziert werden.

### Bauphysik und Baukonstruktion

Teil 7 der 9-teiligen Schriftenreihe «Gebäudeerneuerung Oberwallis»

<https://doi.org/10.24451/ma7v-dx42>



### Nationale Wirtschaftspartner

Markus Keller, GUTEX Schweiz GmbH

Peter Ehrenbogen, Peter Kammer, JOMOS Brandschutz AG

Damian Kilchör, James Hardie Europe GmbH

Niklaus Sägesser, Fisolan AG

Jörg Wollnow, SIGA Cover AG

### Mitglieder Sounding Board

Andreas Gattlen, Naturpark Pfyn-Finges

Dionys Hallenbarter, Energieregion Goms

Tamar Hosennen, Roger Michlig, Regions- und Wirtschaftszentrum AG

Dominik Roos, Schweizerische Berghilfe

Norbert Russi, Dienststelle für Raumentwicklung, Kanton Wallis

Klaus Troger, Denkmalpflege Oberwallis

Adeline Zumstein, Landschaftspark Binntal

Arbeitsgemeinschaft Dorfkernerneuerung Oberwallis – VETA/NOVA

Monika Holzegger, ARGE Dorfkernerneuerung Oberwallis

# Vorwort

Die typischen historischen Holzgebäude in Oberwalliser Dörfern sollen nicht ungenutzt verfallen. Mit effizienteren Planungsprozessen und reduzierten Umbaukosten gelingt es, ihnen neues Leben einzuhauchen. Für jeden thematischen Bereich der Umbauten wurde im Rahmen des Projekts ein Leitfaden entwickelt, um mit standardisierten und abgestimmten Musterlösungen den heutigen Anforderungen gerecht zu werden. Die Prozesse und Musterlösungen wurden dabei intensiv untereinander sowie mit den Gemeinden und Behörden abgestimmt und nach Möglichkeit vereinheitlicht.

Im Namen der nationalen und regionalen Wirtschaftspartner sowie der Forschungspartnerin Berner Fachhochschule möchten wir uns ganz herzlich bei allen beteiligten Personen, Institutionen, Arbeitsgruppen, fachlichen Stellen und Gremien sowie Unternehmen für die äusserst konstruktive Zusammenarbeit bedanken, ohne die dieses Projekt nicht in diesem Rahmen umsetzbar gewesen wäre. Der Dank gilt insbesondere den Partnern des Soundingboards sowie den kantonalen Stellen und nicht zuletzt allen Eigentümerschaften und Architekturbüros der Objekte, die als Forschungsobjekte in natura oder in Bildern und Plänen verwendet werden durften und so zum Gelingen dieser umfangreichen Aufgabe beigetragen haben.

Die ausführlichen Leitfäden können im Rahmen dieses Dokuments oder auf der Homepage von VETA/NOVA unter [www.vetanova.ch](http://www.vetanova.ch) eingesehen werden. Es sind die folgende acht Leitfäden verfügbar:

- Projektdokumentation
- 1 Gestaltungslitfaden
- 2 Bewilligungsprozesse
- 3 Gebäudeanalyse und Dokumentation
- 4 Umbaukonzepte und Verstärkung
- 5 Erdbebensicherheit
- 6 Brandschutz
- 7 Bauphysik und Baukonstruktion
- 8 Detailkatalog

# Inhalt

Projektdokumentation

1 Gestaltungsleitfaden

2 Bestandsanalyse und Bewilligungsprozesse

3 Gebäudeanalyse und Gestaltung

4 Umbaukonzepte, Verstärkung

5 Erdbebensicherheit

6 Brandschutz

7 Bauphysik, Baukonstruktion

7.1 Energetische Sanierung 6

Einleitung 6

Wärmeschutz und Energieeffizienz 7

Heizwärmebedarfsberechnung mittels Systemnachweisen 9

Gebäudetechnik: Referenzgebäude 16

Effizienz Gebäudehülle und Gesamtenergieeffizienz 22

7.2 Feuchteschutz in der energetischen Sanierung 23

Einführung 23

Luftdichtheitskonzept der Gebäudehülle 23

Konstruktion der Luftdichtheitsebene 26

Massgebende Simulationsgrundlagen historische Holzgebäude 27

Aussenwand 27

Massgebende Beurteilungskriterien der sanierten Bauteile 34

7.3 Nachgewiesene Konstruktionen historischer Holzgebäude 39

Aussenwand mit Innendämmung 39

Steildach mit Zwischensparrendämmung 50

7.4 Berechnung von Wärmebrücken 52

Anforderungen 52

Untersuchte Wärmebrücken 52

Grundlagen der Berechnung 52

Ergebnisse 53

7.5 Schalltechnische Sanierung 56

Einführung 56

Anforderungen 56

Abgrenzung 56

Beschreibung der Konstruktion 58

Sanierungsmassnahmen des Schallschutzes 58

Messungen des Schallschutzes 59

Verbesserungsmaßnahmen 64

Literaturverzeichnis, Verweise 65

8 Detailkatalog



# 7 Bauphysik und Baukonstruktion

## Autoren

Barbara Wehle, Berner Fachhochschule AHB  
Christoph Geyer, Berner Fachhochschule AHB

Hannes Biffiger, Lauber IWISA AG

## Arbeitsgruppe

Pascal Abgottspon, Abgottspon Werlen Architekten GmbH  
Bernard Werlen, Abgottspon Werlen Architekten GmbH  
Markus Aeschbach, SRP Ingenieur AG  
Sébastien Bonifaccio, Berner Fachhochschule AHB  
Jan Maurer, Berner Fachhochschule AHB  
Willy Jossen, Farbe+ Gips AG  
Kurt Karlen, Kurt Karlen AG Bau- und Möbelschreinerei  
Markus Keller, GUTEX Schweiz GmbH  
Damian Kilchör, James Hardie Europe GmbH

Christoph Noll, Holzbau Noll AG  
Reinhard Perren, Schreinerei Perren AG  
David Ritz, Atelier Summermatter Ritz GmbH  
Thomas Summermatter, Atelier Summermatter Ritz GmbH  
Niklaus Sägesser, Fisolan AG  
Philipp Truffer, Truffer Ingenieurberatung AG  
Ulrich Weger, Holzbau Weger AG  
Jörg Wollnow, SIGA Cover AG

## Bauphysik

Die Verbesserung der Energieeffizienz ist zentraler Bestandteil der Sanierung historischer Holzgebäude. Neben dem Einsatz regenerativer Energiequellen ist dabei die thermischen Gebäudehülle unter Berücksichtigung des Feuchteschutzes von grosser Bedeutung.

## Schallschutz

Der Schallschutz ist ein wichtiger Bestandteil der Qualität eines sanierten Gebäudes. Der Luft- und der Trittschallschutz von zwei sanierten Geschossdecken wurde gemessen und analysiert.

# 7.1

## Energetische Sanierung



B 1  
Referenzgebäudetyp  
Mehrfamilienhaus  
«MFH Carlen»

Die bestehenden Holzgebäude weisen einen geringen Wärmeschutz auf und entsprechen daher nicht den heute geltenden Ansprüchen an die Energieeffizienz und den Komfort. Teilweise sollen die Gebäude neuen oder anderen Nutzungen zugeführt werden, welche erhöhte Anforderungen an den Wärmeschutz nach sich ziehen.

### Einleitung

Im technischen Leitfaden werden die zum Zeitpunkt der Erstellung im Kanton Wallis geltenden gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz aufgezeigt. Stehen die zu sanierenden Gebäude nicht unter Denkmalschutz, sind diese gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz des Kantons Wallis einzuhalten. Diese können entweder getrennt für jedes Bauteil durch einen Einzelbauteilnachweis oder im Rahmen einer gesamthaften Betrachtung der thermischen Gebäudehülle mittels eines Systemnachweises nachgewiesen werden.

Für zwei Referenzgebäude des Typs Mehrfamilien- bzw. Einfamilienhauses werden zudem

Systemnachweise geführt. Ziel der Systemnachweise ist es unter anderem, die Dämmstärke der innengedämmten Aussenwände zu Gunsten des Feuchteschutzes zu reduzieren. Der Einsatz regenerativer Energiequellen mit intelligenter Gebäudetechnik ist Voraussetzung für einen geringen CO<sub>2</sub>-Austoss eines Gebäudes. Für die zwei betrachteten Referenzgebäude werden daher beispielhaft innovative Gebäudetechnikkonzepte mit regenerativen Energieträgern entwickelt. Aufgrund der fehlenden Technikräume in gewissen Sanierungsobjekten wird der Einsatz einer modular aufgebauten Gebäudetechnik angestrebt. Das Band erstreckt sich vom minimalsten Technisierungsgrad (Low-Tech) bis zur eigenstrom-optimierten Smart-Home-Lösung.

Unter Berücksichtigung der Angaben der Systemnachweise zur Dämmung der Gebäudehülle sowie des gewählten Gebäudetechnikkonzepts wird anschliessend ein sogenannter GEAK (Der Gebäudeausweis der Kantone) erstellt. Aus diesem geht der zu erreichende Standard der Effizienz der Gebäudehülle sowie die Gesamtenergieeffizienz der sanierten Referenzgebäude hervor.

Neben den Vorgaben für den Wärmeschutz der Gebäudehülle sowie der Energieeffizienz werden auch Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle sowie an den Feuchteschutz gestellt. Eine undichte Gebäudehülle führt zu einem zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten. Zum anderen besteht ein erhöhtes Risiko von Feuchteschäden vor allem durch konvektiven Feuchteintrag in die Bauteile der wärmeübertragenden Gebäudehülle. Neben Konvektion können Feuchteschäden auch durch einen unzureichenden Schlagregenschutzes sowie durch Dampfdiffusion verursacht werden. Dabei ist bei innengedämmten Aussenwänden aufgrund der veränderten Temperatur- und Feuchtebedingungen das Risiko eines Feuchteschadens besonders hoch. Hygrothermische Bauteilsimulationen sind seit vielen Jahren Stand der Technik, um den Feuchteschutz von kritischen Bauteilen unter Berücksichtigung der verschiedenen Feuchttransportmechanismen unter realistischen Randbedingungen nachweisen zu können. Im Teil Feuchteschutz des vorliegenden Leitfadens werden gesicherte Randbedingungen zur Durchführung von eindimensionalen sowie zweidimensionalen hygrothermischen Bauteilsimulationen für die historischen Holzgebäude im Oberwallis genannt. Der Fokus liegt dabei auf der innengedämmten Aussenwand sowie dem Dach. Neben den hygrothermischen Bauteilsimulationen wird zudem auf die Luftdichtheit der Gebäudehülle eingegangen.

Der Leitfaden richtet sich an Fachplaner aus den Bereichen Bauphysik, Architektur und Holzbau. Ergänzend zu diesem Dokument können die Fachplaner auch auf Forschungsberichte zugreifen, in welchen die Hintergründe der hier genannten Angaben detailliert erläutert sind. Zudem können eindimensionale sowie zweidimensionale hygrothermische Simulationsmodelle der sanierten sowie unsanierten Wandaufbauten für die Software WUFI® Pro bzw. WUFI® 2D als Vorlage für eigene Berechnungen bezogen werden. Für Forschungszwecke können zudem aufbereitete Wetterdaten der Wetterstation Ulrichen von Meteo Schweiz (Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz) der Jahre 1999-2019 über die Berner Fachhochschule angefragt werden.

## Wärmeschutz und Energieeffizienz

Die historischen Holzgebäude sollen in Zukunft nach Möglichkeit ganzjährig bewohnt werden. Um eine nachhaltige und dauerhafte Nutzung sicherzustellen, ist eine Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle sowie der Energieeffizienz notwendig. Dabei gilt es, die gesetzlichen Vorgaben zum Wärmeschutz einzuhalten, die mittels Einzelbauteilnachweis oder Systemnachweis nachgewiesen werden können.

Aus Gründen des Feuchteschutzes (z. B. bei einer innengedämmten Aussenwand) oder fehlenden Platzes (z. B. bei einer Kellerdecke) ist es nicht immer möglich, den Energienachweis mittels Einzelbauteilnachweisen zu führen. Mit Hilfe eines Systemnachweises kann das Potenzial der Einzelmassnahmen jeweils beurteilt werden. An einzelnen Bauteilen kann zu Gunsten des Feuchteschutzes oder Platzbedarfs weniger gedämmt werden, sofern dies durch einen besseren Wärmeschutz bei anderen Bauteilen ausgeglichen werden kann. Es werden Systemnachweise für die Referenzgebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH) und Einfamilienhaus (EFH) geführt. Am Beispiel dieser Referenzgebäude wird zudem jeweils ein Gebäudetechnikkonzept vorgestellt. Auf Grundlage der Systemnachweise sowie Gebäudetechnikkonzepte die Gesamtenergieeffizienzklasse der Referenzgebäude basierend auf dem GEAK ermittelt.

## Gesetzliche Vorgaben

Die historischen Oberwalliser Holzgebäude stehen grösstenteils unter Ortsbildschutz. Nur ein geringer Anteil der Gebäude ist denkmalgeschützt. Daher müssen bei energetischen Sanierungen die gesetzlichen Anforderungen an den Wärmeschutz eingehalten werden. Der im Rahmen von Umbauten und Umnutzungen zu erbringende Energienachweis kann entweder mittels Einzelbauteilnachweis oder Systemnachweis erfolgen.

Am 9. Januar 2015 wurden von der Konferenz Kantonalen Energiedirektoren die Anforderungen der Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) verabschiedet. Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) werden nun sukzessive von den einzelnen Kantonen umgesetzt und eingeführt. Seit 2016 ersetzt die Norm SIA 380/1 «Heizwärmebedarf», Ausgabe 2016 die Norm SIA 380/1 «Thermische Energie im Hochbau», Ausgabe 2009. Im Jahr 2018 wurden die MuKE auf Grund von Änderungen von Normen des Schweizerischen Ingenieur und Architektenvereins (SIA) und Änderungen an Bundesvorschriften nachgeführt. In der Nachführung wurde unter anderem die Anforderungswerte der SIA 380/1, Ausgabe 2016 übernommen.

Im Kanton Wallis ist derzeit für Einzelbauteilnachweise und Systemnachweise jedoch noch die SIA 380/1, Ausgabe 2009 gültig. Die folgenden Nachweise wurden gemäss dieser Ausgabe geführt. Im Falle der Systemnachweise der untersuchten Referenzgebäude ist der Grenzwert nach Ausgabe 2009 der Norm SIA 380/1 strenger als in Ausgabe 2016. Grund hierfür ist unter anderem, dass die Systemnachweise neu auf eine Jahresmitteltemperatur von 9.4 °C gemäss Merkblatt SIA 2028 zu beziehen sind. Ausgabe 2009 der SIA 380/1 gibt eine Jahresmitteltemperatur von 8.5 °C vor. Damit liegen die Systemnachweise auf der sicheren Seite und entsprechen zudem den aktuell noch gültigen Anforderungen im Kanton Wallis.

Die Angaben sind, falls nicht anders referenziert, den zum Zeitpunkt der Erstellung des Leitfadens gültigen Nachweisformularen und Vollzugshilfen des Kanton Wallis entnommen, welche auf der Webseite der Konferenz Kantonalen Energiedirektoren (EnDK) unter <https://www.endk.ch/de/fachleute-1/energienachweis> verfügbar sind (Stand August 2021).

#### Anforderungen gemäss Einzelbauteilnachweis

Der Einzelbauteilnachweis ist immer zulässig, ausser bei Vorhangfassaden und bei Verwendung von Gläsern mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad kleiner 0.3. Alle vom Umbau oder der Umnutzung betroffenen Bauteile müssen die Grenzwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten aus Tabelle T1 einhalten.

Für Fenster gegen Aussenklima gilt bei Verwendung einer 3-fach Wärmeschutzverglasung (mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten des Glases  $U_g \leq 0.9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und einem thermisch verbesserten Abstandshalter bei einer Raumtemperatur bis 22 °C, sofern kein Heizkörper vor dem Glas ist, der Grenzwert von 1.3 W/m<sup>2</sup>K als erfüllt.

T1 Grenzwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten in W/m<sup>2</sup>K der vom Umbau bzw. der Umnutzung betroffenen Bauteile der thermischen Gebäudehülle gemäss dem Einzelbauteilnachweis. Die Grenzwerte gelten unter anderem für die Nutzung Wohnen im MFH sowie EFH.

Bauteiltyp	Aussenklima oder weniger als 2 m im Erdreich Grenzwert in W/m <sup>2</sup> K	Unbeheizte Räume oder mehr als 2 m im Erdreich Grenzwert in W/m <sup>2</sup> K
Dach / Decke	0.25	0.28
Wand	0.25	0.30
Boden	0.25	0.30
Dach / Decke mit Flächenheizung	0.25	0.28
Wand mit Flächenheizung	0.25	0.28
Boden mit Flächenheizung	0.25	0.28
Tore (Türen grösser als 6 m <sup>2</sup> )	1.7	2.0
Storenkasten	0.5	0.5
Fenster, Fenstertüren und Türen	1.3	1.6
Fenster mit Heizkörper	1.0	1.3

#### Anforderungen gemäss Systemnachweis

Erfolgt der Nachweis der energetischen Massnahmen im Kanton Wallis mit dem Systemnachweis, so ist der Grenzwert des Heizwärmebedarfs gemäss der Norm SIA 380/1 «Thermische Energie im Hochbau» (2009) nachzuweisen.

Der Systemnachweis für Umbauten oder Umnutzungen hat im Minimum alle Räume zu umfassen, welche Bauteile aufweisen, die vom Umbau oder von der Umnutzung betroffen sind. Betreffend der Klimastation gilt in Abhängigkeit der Höhenlage des Gebäudes folgende Einteilung:

- ≤ 1'000 m Sion
- 1'000 m bis 1'800 m Montana oder Zermatt (angemessenere Station)
- ≥ 1'800 m Grosser St. Bernard

Gemäss SIA 380/1 (2009) ist der Systemnachweis mit einer im Merkblatt SIA 2028 aufgeführten Klimastation zu führen. Das Merkblatt enthält langjährige Klimamesswerte von insgesamt 40 Messstationen, die zu Referenzklimajahren für bauphysikalische Berechnungen zusammengefasst wurden. Die Standorte «Montana» oder «Zermatt» sind in diesem Merkblatt ebenfalls enthalten. In Tabelle T2 sind einige Kennwerte dieser Stationen zusammengetragen, die als Entscheidungshilfe für die Wahl der angemessenen Klimastation für Systemnachweise von Gebäuden mit Höhenlagen von 1'000 m bis 1'800 m dienen sollen. Ergänzend zu diesen sind die Kennwerte des Oberwalliser Standorts Ulrichen aufgeführt, welche ebenfalls aus Merkblatt 2028 stammen.

Auf Grundlage der Vorgaben von SIA 380/1 (2009) berechnet sich der Grenzwert des Heizwärmebedarfes  $Q_{h,li}$  in [MJ/(m<sup>2</sup>a)] eines Wohngebäudes wie nachfolgend dargestellt.

Es sind die Grenzwerte des Heizwärmebedarfes für die Nutzungsart MFH bzw. EFH gemäss Tabelle 4 der Norm einzusetzen und mit dem Faktor 1.25 zu multiplizieren, da der Grenzwert für Umbauten und Umnutzungen 125 % des Grenzwertes für Neubauten beträgt. Aus der jeweiligen Gebäudegeometrie ist die Gebäudehüllzahl « $A_{th}/A_E$ » (Verhältnis der thermischen Gebäudehüllfläche  $A_{th}$  zur Energiebezugsfläche  $A_E$ ) zu bestimmen. Aus den Grenzwerten nach Tabelle 4 der SIA 380/1 (2009) sowie der Gebäudehüllzahl berechnet sich der zulässige Jahresheizwärmebedarf bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8.5 °C nach G1:

$$Q_{h,li} = \left( Q_{h,li0} + \Delta Q_{h,li} \cdot \left( \frac{A_{th}}{A_E} \right) \right) \cdot 1.25 \quad \text{in} \quad \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{a}} \quad \text{G1}$$

Die mit den Werten aus Tabelle 4 der SIA 380/1: 2009, Abschnitt 2.3.8 errechneten Grenzwerte gelten für eine Jahresmitteltemperatur von 8.5 °C. Sie werden um 8 % pro K höhere bzw. tiefere Jahresmitteltemperatur reduziert bzw. erhöht. Es gilt die Jahresmitteltemperatur der für die Berechnung verwendeten Klimastation.

Am Standort Zermatt bspw. beträgt die Jahresmitteltemperatur 4.3 °C. Für einen Systemnachweis eines Gebäudes am Standort Zermatt ist der nach obenstehender Formel berechnete Grenzwert demnach mit einem Faktor von 1.33 zu multiplizieren.

Heizwärmebedarfsberechnung mittels Systemnachweisen  
 Im Folgenden werden für zwei Referenzgebäude Berechnungen des Heizwärmebedarfs mit Systemnachweisen nach SIA 380/1:2009 geführt. Dabei handelt es sich um das «Mehrfamilienhaus Carlen» in Reckingen sowie den «Stadel Biel» in Geschinen. Der Stadel soll künftig als Einfamilienhaus genutzt werden. Für diese Gebäude wurden im Rahmen des Projektes Vetanova durch die Berner Fachhochschule umfassende Bestandsaufnahmen erstellt. Auf diesen basieren die nachfolgenden Angaben zu Nutzung, Bauteilaufbauten und Gebäudegeometrien, sofern keine anderen Quellen genannt werden.

Hinweis zu den gesetzlichen Vorgaben bei der Umnutzung ehemals unbeheizter Stadel in beheizten Wohnraum:  
 Der Stadel Biel in Geschinen war bisher unbeheizt und soll künftig als Einfamilienhaus genutzt werden. Gemäss Energiegesetzgebung gelten bei einer Umnutzung eines ehemals unbeheizten Gebäudes in Wohnraum betreffend die Energieeffizienz der Gebäudehülle und Gebäudetechnik dieselben Anforderungen wie für Neubauten. In zweidimensionalen hygrothermischen Bauteilsimulationen konnte gezeigt werden, dass der Wärmedurchgangskoeffizient der innengedämmten Massivholzwände einen Wert von  $U = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$  nicht unterschreiten darf, um das Risiko eines Feuchteschadens minimal zu halten. Um den Grenzwert des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1:2009 für Neubauten einzuhalten, sind jedoch  $U$ -Werte im Bereich von  $0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei den innengedämmten Aussenwänden nötig. Bei Umnutzungen von Stadeln müssen folglich Ausnahmeregelungen geltend gemacht werden, um den Feuchteschutz der

innengedämmten Aussenwände gewährleisten zu können. In vorliegendem Bericht wird beim Stadel Biel in Geschinen eine Ausnahmeregelung zugrunde gelegt und der Grenzwert des Heizwärmebedarfs nach SIA 380/1:2009 für Sanierungen zugrunde gelegt.

Zunächst wird der Heizwärmebedarf der unsanierten Gebäude ermittelt. Nachfolgend werden Sanierungsvarianten aufgezeigt. Aus Denkmalschutz- bzw. Ortsbildschutzgründen ist bei der Sanierung der Aussenwände der Gebäude eine energetische Verbesserung in der Regel nur durch das Anbringen einer innenliegenden Wärmedämmung möglich. Durch das Anbringen einer Innendämmung verändern sich Wärme- und Feuchteströme und damit auch die Feuchtegehalte im Bauteil. Dadurch besteht ein erhöhtes Risiko eines Feuchteschadens. Dieses Risiko steigt mit zunehmender Dämmstärke. Ziel ist es daher, Sanierungsvarianten zu entwickeln, bei welchen möglichst wenig Innendämmung an den Aussenwänden angebracht wird und zugleich die gesetzlichen Anforderungen an den Heizwärmebedarf nach SIA 380/1:2009 eingehalten werden. Die Berechnung des Heizwärmebedarfs erfolgt mit der Software Lesosai, welche hierfür zertifiziert ist.

Nachfolgend wird eine Zusammenfassung der Berechnungen gegeben. Nähere Informationen zu Bauteilaufbauten und Heizwärmebedarf der bestehenden Gebäude sowie detaillierte Flächenermittlungen werden im Forschungsbericht «Heizwärmebedarfsermittlung zur Ermittlung der erforderlichen Dicke der innenliegenden Wärmedämmung» von Wehle & Geyer (2022a) gegeben.

T2 Vergleich der Stationen «Zermatt», «Montana» und «Ulrichen» hinsichtlich Höhe ü. M., Lage, mittlerer Jahrestemperatur, minimaler Temperatur und Jahressumme der Heizgradtage<sup>1)</sup>.

Station	Höhe m ü.M.	Lage	Mittlere Temperatur	Minimale Temperatur	HGT20/12
Montana	1'508 m	Südhang	5.9°C	-15.8°C	4'770
Zermatt	1'638 m	Westhang	4.3°C	-17.2°C	5'388
Ulrichen	1'345 m	Ebene, flaches Tal	3.7°C	-23.2°C	5'546

<sup>1)</sup> Die Grösse Heizgradtag HGT wird zur Berechnung des Heizwärmebedarfs eines Gebäudes während der Heizperiode herangezogen. Sie stellt den Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und der Aussenlufttemperatur für die Heiztage eines Bemessungszeitraums dar. Die Grösse HGT20/12 beschreibt die Summe an Heizgradtagen für 20 °C Raumtemperatur und eine Heizgrenze von 12 °C Aussen-temperatur.

## B 2

Ausschnitt aus Tabelle 4 «Grenzwerte für den Heizwärmebedarf pro Jahr von Neubauten bei 8.5 °C Jahresmitteltemperatur» der SIA 380/1 (2009), Abschnitt 2.3.8

Gebäudekategorie		Grenzwerte	
		$Q_{h,li0}$ MJ/m <sup>2</sup>	$\Delta Q_{h,li}$ MJ/m <sup>2</sup>
I	Wohnen MFH	55	65
II	Wohnen EFH	65	65
III	Verwaltung	65	85

## Referenzgebäudetyp Mehrfamilienhaus

### Beschreibung und Flächen

Im Referenzgebäude «MFH Carlen» befinden sich heute im ersten und zweiten Obergeschoss des Gebäudes jeweils eine Wohnung. Die Wohnungen sind über eine aussenliegende überdachte Treppe in einem seitlichen Anbau erschlossen. Der Anbau ist zur Strasse hin offen. Das Gebäude in Hanglage ist teilweise unterkellert. Es weist eine teilhybride Bauweise auf. So bestehen das Kellergeschoss, der Anbau, Teile des Erdgeschosses und auch einzelne Wände im ersten Obergeschoss im Bereich der Küche aus massiven Natursteinmauerwerk. Die übrigen Gebäudeteile weisen 150 mm starke Blockwände auf, die grösstenteils mit einem innenliegenden Täfer versehen sind. Der Dachboden des Gebäudes wird als Stauraum genutzt und ist unbeheizt. Das Gebäude wurde in mehreren Bauabschnitten erstellt.

Die Hauptfassade mit den meisten Fensterflächen des Gebäudes ist nach Südosten ausgerichtet. Innerhalb des Dämmperimeters befinden sich das erste und zweite Obergeschoss, die jeweils an unbeheizte Kellerräume bzw. einen unbeheizten Dachraum grenzen. Das teilunterkellerte Gebäude weist auf der Nordwestseite in Richtung eines Hanges. Etwas mehr als 19 m<sup>2</sup> des Bodens des ersten Obergeschosses sind erdberührt. Die Flächen der thermischen Gebäudehülle für «MFH Carla» sind in Tabelle T3 aufgeführt.

### Grenzwert Heizwärmebedarf

Das Gebäude befindet sich in der Nähe des Standorts Ulrichen. Ein Vergleich mit den in Tabelle T2 aufgeführten Kennwerten zeigt, dass die Abweichungen hinsichtlich mittlerer und minimaler Temperatur sowie den Heizgradtagen bei den Stationen «Zermatt» und «Ulrichen» geringer sind als bei den Stationen «Montana» und «Ulrichen». Daher wird «Zermatt» als Klimastandort für den Systemnachweis verwendet.

Aus der jeweiligen Gebäudegeometrie ist die Gebäudehüllzahl « $A_{th}/A_E$ » (Verhältnis der thermischen Gebäudehüllfläche  $A_{th}$  zur Energiebezugsfläche  $A_E$ ) zu bestimmen. Diese nimmt für das Referenzgebäude einen Wert von 1.708 an. Aus den Grenzwerten nach Tabelle 4 der SIA 380/1 (2009) sowie der Gebäudehüllzahl berechnet sich der zulässige Jahresheizwärmebedarf bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8.5 °C zu:

$$Q_{h,li} = \left( Q_{h,li0} + \Delta Q_{h,li} \cdot \left( \frac{A_{th}}{A_E} \right) \right) \cdot 1.25$$

$$Q_{h,li} = \left( 55 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{a}} + 65 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{a}} \cdot 1.71 \right) \cdot 1.25 = 208 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

Am Standort Zermatt beträgt die Jahresmitteltemperatur 4.37 °C. Der oben berechnete Grenzwert des Jahresheizwärmebedarfes gilt für eine Jahresmitteltemperatur von 8.5 °C. Diese sind gemäss SIA 380/1 (2009) um 8 % pro K tiefere Jahresmitteltemperatur zu erhöhen. Es gilt folgender Grenzwert für das Referenzgebäude:

$$Q_{h,li} = 208 \cdot 1.33 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{a}} = 277 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{a}}$$

### Wärmeschutzeigenschaften und weitere Kennwerte unsanierter Zustand

Die opaken Bauteile der thermischen Gebäudehülle weisen im unsanierten Zustand die Wärmeschutzeigenschaften laut Tabelle T5 auf. Das Gebäude weist historische Fenster mit Einscheibenverglasungen (Einfachfenster) auf. Bei einigen wenigen Fenstern ist zusätzlich ein Vorfenster installiert. Die Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_w$  im unsanierten Zustand liegt je nach Fenstergrösse im Bereich von 4.37 bis 4.94 W/(m<sup>2</sup>K) bei den Einfachfenstern und bei 2.41 W/(m<sup>2</sup>K) bei den Fenstern mit Vorfenstern.

Das unsanierte «MFH Carlen» weist folgende relevante linienförmige Wärmebrücken auf:

Fenstersturz, Fensterlaibung, Fensterbrüstung  
Gebäudesockel

Da die Wärmeverluste über Wärmebrücken bei historischen Gebäuden im unsanierten Zustand einen vergleichsweise geringen Anteil am gesamten Heizwärmebedarf ausmachen, wird auf eine detaillierte Wärmebrückenberechnung verzichtet. Für die oben genannten Wärmebrücken werden stellvertretend die zulässigen Grenzwerte nach Tabelle 3 der SIA 380/1 eingesetzt. Für die Fensteranschläge beträgt der Grenzwert 0.1 W/(mK) und für den Gebäudesockel 0.2 W/(mK). Der Anteil der Wärmebrücken an den Transmissionswärmeverlusten beträgt im unsanierten Zustand knapp 4 %.

Der Nutzereinfluss wird über die Standardnutzungskennwerte für Mehrfamilienhäuser abgebildet, welche nach SIA 380/1 (2009) für die Heizwärmebedarfsberechnung zu verwenden sind. Daneben sind in Tabelle T5 einige weitere relevante Eingabeparameter aufgeführt. Diese gelten analog auch für den sanierten Zustand des MFH.

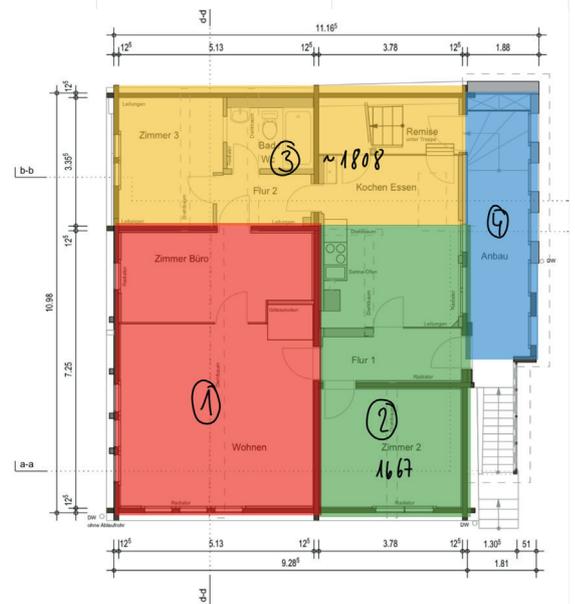
### Heizwärmebedarf unsanierter Zustand

Unter Annahme der oben beschriebenen Eingabeparameter ergeben sich die in Tabelle T7 aufgeführten Werte für den Heizwärmebedarf des untersuchten Referenzgebäudes im unsanierten Zustand. Der zulässige Grenzwert wird um mehr als das Dreifache überschritten im unsanierten Zustand.

### Wärmeschutzeigenschaften und weitere Kennwerte sanierter Zustand

Betreffend die Nutzung, die Ausrichtung sowie die Flächen besteht bei den sanierten Gebäuden keine Änderung gegenüber den unsanierten Gebäuden. Die Werte für die sanierten Zustände sind daher analog zu unsanierter Zustand.

In Tabelle T6 sind die Wärmeschutzeigenschaften der sanierten opaken Bauteile aufgeführt, die dem Systemnachweis des sanierten Zustands zu Grunde gelegt werden. Ziel ist unter anderen herauszufinden, wie viel Dämmung an den innengedämmten Aussenwänden nötig ist, um die Anforderungswerte der Systemnachweise noch einzuhalten. Die Berechnung erfolgt mit einem U-Wert der Aussenwände von 0.28 W/(m<sup>2</sup>K). Im Vergleich dazu liegt der Grenzwert des Wärmedurchgangskoeffizienten einer Aussenwand gemäss Einzelbauteilanforderungen bei  $U = 0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , wie in Tabelle T1 aufgeführt.



B 3 Referenzgebäudetyp Mehrfamilienhaus «MFH Carlen»

Oben, Links: Südostansicht

Oben, Rechts: Südansicht

Unten, Links: Nordansicht

Unten, Rechts: Übersicht der einzelnen Bauabschnitte des Gebäudes

Es wird davon ausgegangen, dass die Fenster durch neue Fenster ersetzt werden. Da die neuen Fenster aus Ortsbild- und Denkmalschutzgründen den historischen Fenstern möglichst ähnlich sein sollen, werden Glas- und Rahmenanteile analog zu den unsanierten Fenstern angenommen. Je nach Abmessung und Rahmenanteil ergeben sich für die sanierten Einfachfenster des Gebäudes Wärmedurchgangskoeffizienten ( $U_w$ -Werte) im Bereich von (0.96 bis 1.3) W/(m<sup>2</sup>K). Der Psi-Wert des Glasrandverbundes wird mit 0.04 W/(mK) angenommen. Für die Wohnungseingangstüren wird ein U-Wert von 1.3 W/(m<sup>2</sup>K) angenommen.

Das sanierte MFH weist folgende relevante linienförmige Wärmebrücken auf

- Fenstersturz, Fensterlaibung, Fensterbrüstung
- Unterbrechung der Kellerdeckendämmung durch Wände
- Unterbrechung der Innendämmung durch Innenwände

Eine detaillierte Wärmebrückenberechnung wird nicht durchgeführt. Für die oben genannten Wärmebrücken werden stellvertretend die zulässigen Grenzwerte nach Tabelle 3 der SIA 380/1 eingesetzt. Für die Fensteranschläge beträgt der Grenzwert 0.1 W/(mK) und bei Unterbrechungen der Wärmedämmschichten 0.2 W/(mK). Der Anteil der Wärmebrücken an den Transmissionswärmeverlusten beträgt im sanierten Zustand ca. 15 %.

#### Heizwärmebedarf sanierter Zustand

Unter Annahme der oben beschriebenen Eingabeparameter ergeben sich die in Tabelle T8 aufgeführten Werte für den Heizwärmebedarf des untersuchten Referenzgebäudes im sanierten Zustand.

#### Eingabegrößen «Mehrfamilienhaus Carlen»

##### T3 Flächen der thermischen Gebäudehülle des «MFH Carlen»

Vertikale Bauteilfläche m <sup>2</sup>	Nord	Süd	Ost	West
Wand gegen aussen	40.7	40.7	48	48.1
Fenster / Türen	1.7	7.8	8	8.2

Horizontale Bauteilfläche	Fläche in m <sup>2</sup>
Boden gegen unbeheizt	82.6
Boden gegen Erdreich	19.4
Decke gegen unbeheizt	102

Gebäude	Energiebezugsfläche $A_E$ in m <sup>2</sup>
MFH Carlen	203.9

#### Ergebnisse «Mehrfamilienhaus Carlen»

##### T5 Wärmedurchgangskoeffizienten $U$ der unsanierten opaken Bauteile des «MFH Carlen»

Bezeichnung	Lage	Beschreibung	U-Wert in W/(m <sup>2</sup> K)
Du-1 (Det. 5-14)	Decke gegen unbeheizt	Dielen mit Dielenbaum	1.16
Wa-1 (Det. 5-11)	Wand gegen aussen	Blockwand mit Täfer	0.62
Wa-2 (Det. 5-13)	Wand gegen aussen	Natursteinmauerwerk	1.24
Bu-1 (Det. 5-4)	Boden gegen unbeheizt	Dielen/Bohlen mit Riemenboden	0.8
Bu-2 (Det. 5-3)	Boden gegen unbeheizt	Dielen/Bohlen mit Riemenboden	0.75
Bu-3 (Det. 5-5)	Boden gegen unbeheizt	Balkendecke mit Riemenboden	0.75
Be-1 (Det. 5-14)	Boden gegen Erdreich	Dielen/Bohlen mit Riemenboden	0.73

##### T7 Zulässiger sowie berechneter Wert des Heizwärmebedarfes des unsanierten «MFH Carlen»

Gebäude	zulässiger Grenzwert Heizwärmebedarf	berechneter Heizwärmebedarf
MFH Carlen, Reckingen	276 MJ/(m <sup>2</sup> a)	870 MJ/(m <sup>2</sup> a)

##### T4 Weitere Eingabeparameter «MFH Carlen»

Gebäudeparameter	MFH Carlen, Reckingen
Anforderungen gemäss	SIA 380/1 (2009) Grenzwert
Höhe über Meer	1316 m
Gebäudehüllzahl $A_{th}/A_E$	1.7
Regelungszuschlag $\Delta\Theta_{i,g}$	0 °C
Wärmekapazität	300 kJ/m <sup>2</sup> K
Verschattungsfaktor FS (Fassade mit grösster Fensterfläche)	0.54

##### T6 Wärmedurchgangskoeffizienten $U$ der sanierten opaken Bauteile des «MFH Carlen»

Bezeichnung	Lage	U-Wert in W/(m <sup>2</sup> K)
Du-1	Decke gegen unbeheizt	0.17
Wa-1	Wand gegen aussen	0.28
Wa-2	Wand gegen aussen	0.28
Bu-1	Boden gegen unbeheizt	0.2
Bu-2	Boden gegen unbeheizt	0.2
Bu-3	Boden gegen unbeheizt	0.2
Be-1	Boden gegen Erdreich	0.2

##### T8 Zulässiger sowie berechneter Wert des Heizwärmebedarfes des sanierten «MFH Carlen»

Gebäude	zulässiger Grenzwert Heizwärmebedarf	berechneter Heizwärmebedarf
MFH Carlen, Reckingen	276 MJ/(m <sup>2</sup> a)	265 MJ/(m <sup>2</sup> a)

## Referenzgebäudetyp Einfamilienhaus

### Beschreibung und Flächen

Als zweites Referenzgebäude wird der «Stadel Biel» in Geschinen betrachtet, der künftig als EFH genutzt werden soll. Das Gebäude in Geschinen wurde 1670 erbaut und seither als Stadel genutzt. Es weist einen Unterbau auf, auf welchem die oberen Geschosse aufgesetzt sind.

Der Unterbau wird nicht als Teil des Dämmperimeters angenommen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Energiebezugsfläche im Oberbau künftig auf drei Ebenen (Erdgeschoss, Obergeschoss 1 und 2) verteilt. Um das unsanierte Gebäude mit dem sanierten Zustand vergleichen zu können, werden die Energiebezugsfläche sowie der Fensteranteil jeweils analog festgelegt, vgl. Tabelle T 9.

### Grenzwert Heizwärmebedarf

Der Stadel befindet sich ebenfalls in der Nähe des Standorts Ulrichen. Daher wird analog zum Referenzgebäude «MFH Carlen» ebenfalls «Zermatt» als Klimastandort für die weiteren Berechnungen verwendet.

Die Gebäudehüllzahl nimmt für das Referenzgebäude einen Wert von 1.809 an. Aus den Grenzwerten nach Tabelle 4 der SIA 380/1 (2009) sowie der Gebäudehüllzahl berechnet sich der zulässige Jahresheizwärmebedarf bei einer mittleren Jahrestemperatur von 8.5°C zu:

$$Q_{h,li} = \left( Q_{h,li0} + \Delta Q_{h,li} \cdot \left( \frac{A_{ih}}{A_E} \right) \right) \cdot 1.25 \quad G4$$
$$Q_{h,li} = \left( 65 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{a}} + 65 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{a}} \cdot 1.89 \right) \cdot 1.25 = 235 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{a}}$$

Wegen der Abweichung der Jahresmitteltemperatur am Standort Zermatt ist der oben genannte Grenzwert wiederum wie folgt mit einem Zuschlag von 33 % zu versehen:

$$Q_{h,li} = 235 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{a}} \cdot 1.33 = 313 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{a}} \quad G5$$

### Wärmeschutzeigenschaften und weitere Kennwerte unsanierter Zustand

Die opaken Bauteile der thermischen Gebäudehülle weisen im unsanierten Zustand die Wärmeschutzeigenschaften wie in Tabelle T 11 auf. Der bestehende Stadel weist keine Fenster auf. Um den sanierten Zustand direkt mit dem unsanierten Zustand vergleichen zu können, wird jedoch vom jeweils gleichen Fensterflächenanteil ausgegangen. Für den unsanierten Zustand werden Fenster mit Einscheibenverglasungen (Einfachfenster) mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $U_g = 5.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen. Der Wärmedurchgangskoeffizient  $U_w$  der unsanierten Fenster beträgt bei einem Rahmenanteil von 25 % und einem Wärmedurchgangskoeffizienten  $U_f$  des Rahmens von  $1.9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  gleich  $5.0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Das unsanierte EFH weist folgende relevante linienförmige Wärmebrücken auf:

Fenstersturz, Fensterlaibung, Fensterbrüstung

mit einem zulässigen Grenzwerte nach Tabelle 3 der SIA 380/1 von  $0.1 \text{ W}/(\text{mK})$ . Der Anteil der Wärmebrücken an den Transmissionswärmeverlusten beträgt im unsanierten Zustand ca. 1.5 %. In Tabelle T 10 sind einige weitere für die Berechnung relevante Eingabeparameter aufgeführt. Diese gelten analog auch für den sanierten Zustand.

### Heizwärmebedarf unsanierter Zustand

Unter Annahme der oben beschriebenen Eingabeparameter ergeben sich die in Tabelle T13 aufgeführten Werte für den Heizwärmebedarf des untersuchten Referenzgebäudes im unsanierten Zustand.

Der zulässige Grenzwert wird fast um das Fünffache überschritten im unsanierten Zustand.

### Wärmeschutzeigenschaften und weitere Kennwerte sanierter Zustand

Betreffend die Nutzung, die Ausrichtung sowie die Flächen besteht bei den sanierten Gebäuden keine Änderung gegenüber den unsanierten Gebäuden. Die Werte für die sanierten Zustände sind daher analog anzunehmen.

In Tabelle T12 sind die Wärmeschutzeigenschaften der sanierten opaken Bauteile aufgeführt, die dem Systemnachweis des sanierten Zustands zu Grunde gelegt werden. Ziel ist es wiederum, herauszufinden, wie viel Dämmung an den innengedämmten Aussenwänden nötig ist, um die Anforderungswerte der Systemnachweise noch einzuhalten. Die Berechnung erfolgt ebenfalls mit einem U-Wert der Aussenwände von  $0.28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Für die sanierten Einfachfenster des Gebäudes wird ein  $U_w$ -Wert von  $1.02 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen, ausgehend von  $U_f = 1.9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $U_g = 0.6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und einem Rahmenanteil von 25 %. Der Psi-Wert des Glasrandverbundes wird dabei mit  $0.04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angenommen. Das sanierte EFH weist folgende relevante linienförmige Wärmebrücken auf:

Fenstersturz, Fensterlaibung, Fensterbrüstung  
Unterbrechung der Innendämmung durch Innenwände

Auf eine detaillierte Wärmebrückenberechnung wird verzichtet. Für die oben genannten Wärmebrücken werden stellvertretend die zulässigen Grenzwerte nach Tabelle 3 der SIA 380/1 eingesetzt. Der Anteil der Wärmebrücken an den Transmissionswärmeverlusten beträgt im sanierten Zustand ca. 18 %.

Für die Fensteranschlüsse beträgt der Grenzwert  $0.1 \text{ W}/(\text{mK})$  und bei Unterbrechungen der Wärmedämmschichten  $0.2 \text{ W}/(\text{mK})$ .

### Heizwärmebedarf sanierter Zustand

Unter Annahme der oben beschriebenen Eingabeparameter ergeben sich die in Tabelle T 14 aufgeführten Werte für den Heizwärmebedarf des untersuchten Referenzgebäudes im sanierten Zustand.

Der zulässige Grenzwert wird eingehalten.



B 4 Referenzgebäudetyp Einfamilienhaus «Stadel Biel»

Oben, Links: Ostansicht,

Oben, Rechts: Westansicht

Unten, Links: Nordansicht

Unten, Rechts: Aufständigung des Gebäudes.

Eingabegrößen «Einfamilienhaus Stadel Biel, Geschinen»

T9 Flächen der thermischen Gebäudehülle des «EFH Stadel Biel»

Vertikale Bauteilfläche m <sup>2</sup>	Nord	Süd	Ost	West
Wand gegen aussen	41	41	42	42

Horizontale Bauteilfläche	Fläche in m <sup>2</sup>
Boden gegen aussen	49
Dach	48

Gebäude	Energiebezugsfläche A <sub>E</sub> in m <sup>2</sup>
Stadel Biel, Geschinen	139

Ergebnisse «Einfamilienhaus Stadel Biel, Geschinen»

T11 Wärmedurchgangskoeffizienten U der unsanierten opaken Bauteile des «EFH Stadel Biel, Geschinen»

Bezeichnung	Lage	Beschreibung	U-Wert in W/(m <sup>2</sup> K)
Da-1 (Det. 6-1)	Dach gegen aussen	Schindeldach	2.1
Wa-1 (Det. 6-2)	Wand gegen aussen	Blockwand	0.91
Ba-1 (Det. 6-3)	Boden gegen aussen	Kastenboden	2.1

T13 Zulässiger sowie berechneter Wert des Heizwärmebedarfes des unsanierten «EFH Stadel Biel, Geschinen»

Gebäude	zulässiger Grenzwert Heizwärmebedarf	berechneter Heizwärmebedarf
Stadel Biel, Geschinen	313 MJ/m <sup>2</sup> a	1'521 MJ/(m <sup>2</sup> a)

T10 Weitere Eingabeparameter für «EFH Stadel Biel, Geschinen»

Gebäudeparameter	MFH Carlen, Reckingen
Anforderungen gemäss	SIA 380/1 (2009) Grenzwert
Höhe über Meer	1353 m
Gebäudehüllzahl A <sub>th</sub> /A <sub>E</sub>	1.89
Regelungszuschlag ΔΘ <sub>i,g</sub>	0 °C
Wärmekapazität	300 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Verschattungsfaktor FS (Fassade mit grösster Fensterfläche)	0.56

T12 Wärmedurchgangskoeffizienten U der sanierten opaken Bauteile des «EFH Stadel Biel, Geschinen»

Bezeichnung	Lage	U-Wert in W/(m <sup>2</sup> K)
Da-1	Dach gegen aussen	0.17
Wa-1	Wand gegen aussen	0.28
Ba-1	Boden gegen aussen	0.2

T14 Zulässiger sowie berechneter Wert des Heizwärmebedarfes des sanierten «EFH Stadel Biel, Geschinen»

Gebäude	zulässiger Grenzwert Heizwärmebedarf	berechneter Heizwärmebedarf
Stadel Biel, Geschinen	313 MJ/(m <sup>2</sup> a)	294 MJ/(m <sup>2</sup> a)

## Gebäudetechnik: Referenzgebäude

Für die zwei betrachteten Referenzgebäude «EFH Stadel Biel» und «MFH Carlen» werden exemplarisch innovative Gebäudetechnik-konzepte mit regenerativen Systemen aufgezeigt. Durch den Einsatz regenerativer Energiequellen und aufeinander abgestimmter Gebäudetechnik kann der CO<sub>2</sub>-Austoss der sanierten Gebäude auf ein Minimum reduziert werden. Es wird ein modularer Ansatz gewählt, um den verschiedenen Gegebenheiten durch die Gebäudetypen und den variierenden Komfortansprüchen Rechnung tragen zu können. Zuerst werden die vier Archetypen identifiziert, welche Grundsätzlich zur Sanierung anstehen können, vgl. Bild B 5.

Die Archetypen unterscheiden sich vor allem in den Grundattributen wie z.B. Technikraum, Verteilsysteme (Heizung/Sanitär), Raumhöhen etc. Die zu wählende Gebäudetechnik wird nicht allein durch die Typenauswahl definiert, sondern massgeblich durch Komfortansprüche der Nutzer beeinflusst. Ausgehend von den Archetypen können in einem zweiten Schritt die einzelnen Module an die effektiven Nutzerwünsche angepasst werden. Der Bedarf eines Gebäudes kann vereinfacht wie folgt eingeteilt werden: Wärme für Heizung, Wärme für Warmwasser, Frischluft und Strom.

### Heizung

Zur Deckung der Wärme ist eine Pelletfeuerung vorgesehen. Bei Vorhandensein eines Technikraums kann ein Pelletkessel verwendet werden, ansonsten muss auf einen Pelletofen ausgewichen werden. Erstere geben sämtliche Wärme an einen wassergeführten Kreislauf ab, welcher die Wärme zu den Räumlichkeiten transportiert und über die Abgabesysteme (z.B. Heizkörper, Fussbodenheizung, etc.) an die Raumluft abgeben. Letztere geben einen Grossteil der freigesetzten Wärme über Strahlung direkt an den Raum und über Konvektion an die Raumluft ab. Es gibt

Pelletöfen auch mit zusätzlich wassergeführtem Kreislauf, welcher Wärme ans Warmwasser oder in entfernte Räumlichkeiten transportieren kann. Genau diese Flexibilität wird im modularen Ansatz ausgenutzt.

Früher wurden Giltsteinöfen mittig im Grundriss eingesetzt. Die Raumaufteilung wurde so gewählt, dass alle Räumlichkeiten teilweise am Ofen angrenzend waren und von der Abstrahlung profitieren konnten. Ein Wärmeverteilsystem war dadurch obsolet. Dieses Prinzip ist mit einem Pelletofen ebenfalls möglich, jedoch wird die architektonische Flexibilität und Raumanordnung eingeschränkt.

### Pelletkessel

- + ganzjährige Warmwasseraufbereitung möglich
- + grosse Pellet-Lagermengen
- + gleichmässige Temperaturen in allen Räumlichkeiten / gute Regulierbarkeit
- erhöhter Platzbedarf, eigener Raum notwendig
- höherer Technikanteil, höhere Kosten

### Pelletofen

- + geringer Platzbedarf, kann direkt in zentral gelegenen Raum positioniert werden
- + Low-Tech Variante kostengünstig
- Warmwasser im Sommer führt zu hohen Raumtemperaturen
- mehrheitlich kleinere Lagermengen (kürzeres Nachfüllintervall)
- Regulierbarkeit eingeschränkt, Temperaturunterschiede zwischen Räumen möglich



Mehrfamilienhaus



Einfamilienhaus



Stall/Scheune



Stadel

B 5  
Archetypen-Einteilung



B 6  
Heizgeräte und  
Warmwasserauf-  
bereitung

Links: Pelletkessel,  
Quelle: Ökofen/Pelle-  
matic Condens)  
Mitte: Pelletofen,  
Quelle: Freepoint/  
Indigo Weiss  
Rechts: Wärme-  
pumpenboiler mit  
Zusatzregister, Quelle:  
Styleboiler/Interline

## Warmwasser

Die Warmwasseraufbereitung mit Hilfe eines Pelletofens kann im Sommer aufgrund der Wärmeabgabe an die direkte Umgebung zu erhöhten Raumtemperaturen führen. Der Einsatz eines Wärmepumpenboilers mit Zusatzregister bietet sich hier an. Er entnimmt Wärme aus der Luft, hebt das Temperaturniveau und gibt die Wärme an das Warmwasser ab. Für das Warmwasser gibt es daher zwei Wärmequellen: Luft und/oder Pelletofen. Für die Quelle Luft gibt es zwei Möglichkeiten den Wärmepumpenboiler zu betreiben: Entweder ist dieser an der Aussenwand angrenzend und kann Aussenluft beziehen, oder man entnimmt der Raumluft ihre Wärme. Letztere Variante kann kombiniert auch als Lüftungsanlage eingesetzt werden.

## Lüftung / Frischluftzufuhr

Die heutigen Gebäudehüllen weisen aus Energieeinspargründen eine sehr geringe natürliche Infiltration auf ( $< 0.1$  1/h). D. h. es braucht über 10 Stunden, bis der Rauminhalt einmal mit frischer Luft ausgetauscht wurde. Um trotzdem ein angenehmes Raumklima zu schaffen, muss zusätzlich ein Luftaustausch induziert werden.

Die einfachste Lösung ist mit Hilfe einer Fensterlüftung. Hierbei kann durch falsche Handhabung (z.B. dauerhaft gekippte Fenster) viel Wärme verloren gehen, da keine Wärmerückgewinnung stattfindet.

Die aufwändigste Lösung ist eine kontrollierte Wohnraumlüftung. In die Aufenthaltsräume wird Zuluft eingebracht und in den Nasszellen und Küche wird Abluft abgesogen. Die fortgeführte Luft gibt im Lüftungsgeräte über einen Wärmetauscher ihre Wärme an die frische Zuluft ab (Wärmerückgewinnung). Es wird ein umfangreiches Zuluft- und Abluftnetz mit Schläuchen und zusätzlicher Platz in den Installationsschächten benötigt.

Um diesen Platzbedarf zu reduzieren, gibt es dezentrale Wohnraumlüftungen. Bei dieser Variante wird die komplette Zuluft in einem Raum

zugeführt. Für die Verteilung in die weiteren Räume werden Verbundlüfter eingesetzt. Diese werden in die Türen oder Wände eingesetzt und sorgen für einen Luftaustausch zwischen belüftetem und unbelüftetem Raum. Das Lüftungsgerät sollte in der Nähe der Nasszellen liegen, da die Abluftleitung bis zum Gerät geführt werden muss. Als letzte Variante gibt es die Abluft-Wärmepumpe. Wie vorher beschrieben, benötigt ein Wärmepumpenboiler als Quelle Luft. Es bietet sich an, die warme Raumluft aus z. B. Nasszellen und Küche zu verwenden. Dadurch können gleichzeitig Gerüche und Feuchtigkeit beseitigt werden. Es muss kontrolliert über Nachströmöffnungen in der Gebäudehülle für Luftnachschieb gesorgt werden, damit kein Unterdruck entsteht.

## Strombedarf

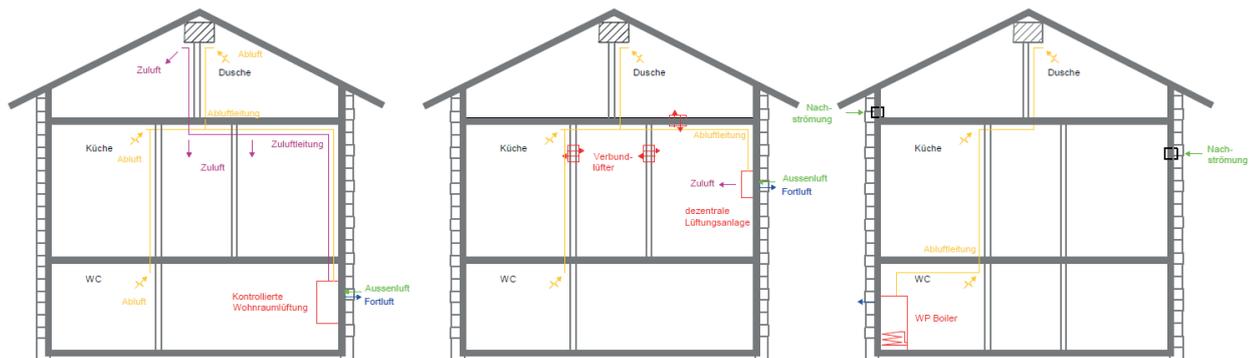
Der Strombedarf bei einer Standard-Geräteausstattung setzt sich zusammen aus: Geschirrspüler (kalt angeschlossen), Waschmaschine und Trockner, Gebäudetechnik (Umwälzpumpen, Ventilatoren, Aussenbeleuchtung), Innenbeleuchtung, Unterhaltungs- und Heimbüroelektronik. Ein Teil des Strombedarfs kann mit Hilfe einer PV-Anlage gedeckt werden. PV-Anlagen sind in schneereichen Gebieten aktuell noch selten, da die Erträge in den Wintermonaten gering sind. Eine schneebedeckte PV-Anlage produziert keinen Strom. Zudem bedeuten tiefe Sonnenstände und eine hohe Horizontlinie in den Wintermonaten geringe Erträge. Der Verlust durch Schnee auf dem Dach liegt im einstelligen Prozentbereich. Eine PV-Anlage ist daher auch in schneereichen Gebieten empfehlenswert. Im Zusammenhang mit einem Wärmepumpen-Boiler kann der Eigenverbrauchsanteil verbessert werden. Elektrische Energie ist eine wertvolle Energieform und sollte nur bedingt in Wärme umgewandelt werden.

### B 7 Lüftung und Frischluftzufuhr

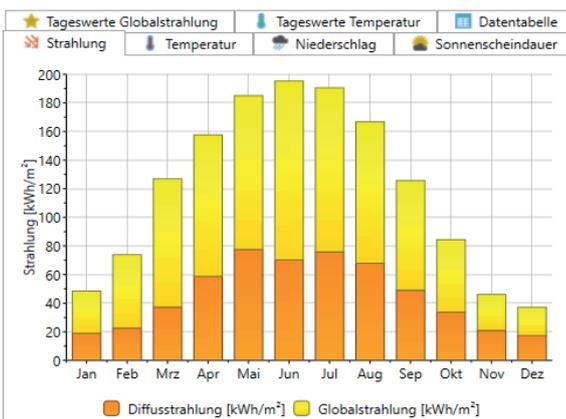
Links: kontrollierte  
Wohnraumlüftung

Mitte: dezentrale  
Lüftung

Rechts: Abluft-WP



## Ulrichen



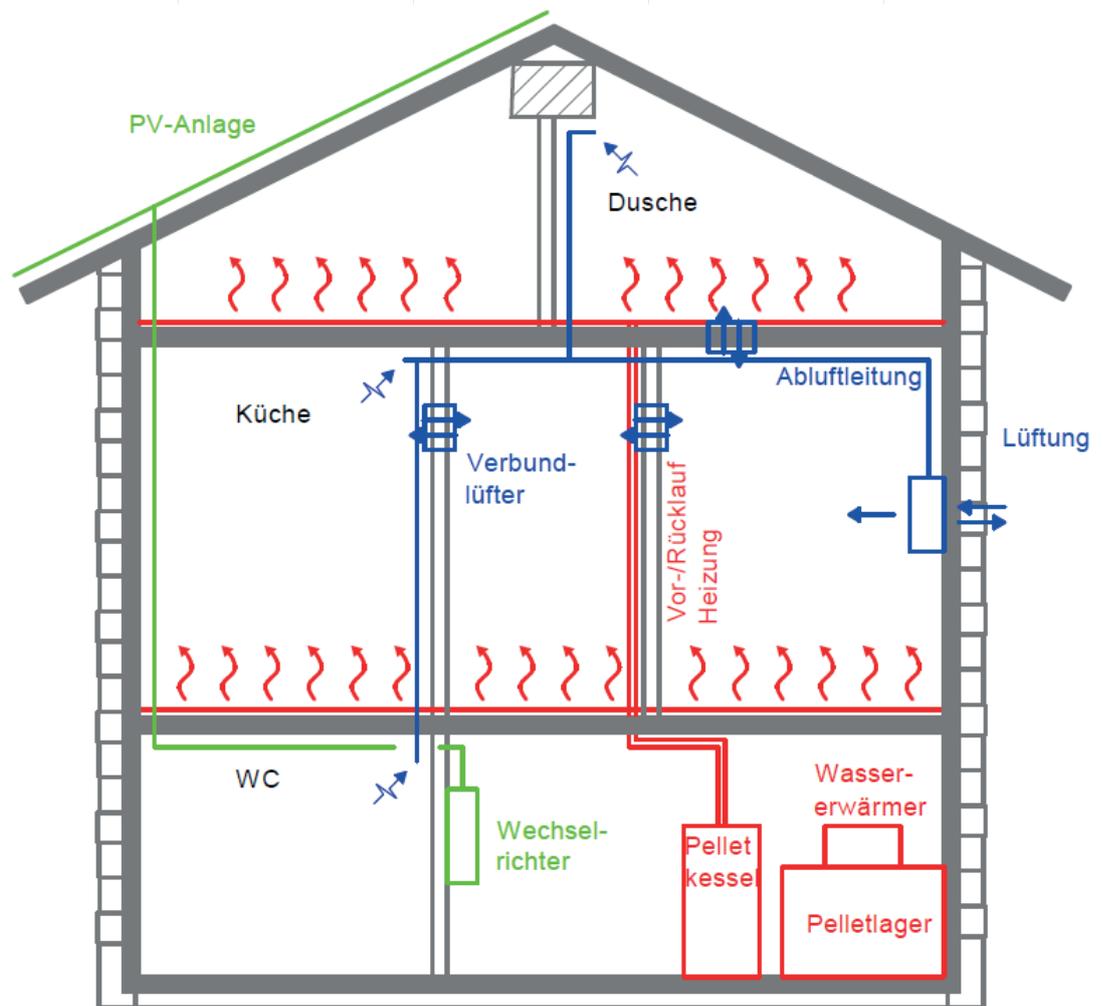
### B 8 Tageswerte Globelestrahlung

Globalstrahlung und Anteil Diffusstrahlung für Ulrichen auf horizontale Fläche, Quelle: Meteonorm Software/Version 8

## Gebäudetechnik Mehrfamilienhaus «MFH Carlen»

Das Mehrfamilienhaus hat grundsätzlich Platz für einen Technikraum für eine zentrale Wärmeenerzeugung und Warmwasserversorgung. Das Nachfüllintervall soll so lange wie möglich sein, was einen Pelletkessel inklusive Pelletlager erforderlich macht.

Durch den Einsatz eines Pelletkessels im Technikraum wird eine Wärmeverteilung und -abgabe benötigt. Zusätzlich kann ganzjährig ohne Komforteinbuße das Warmwasser aufbereitet werden. Optional kann eine Lüftungs-, wie auch eine PV-Anlage gewählt werden.



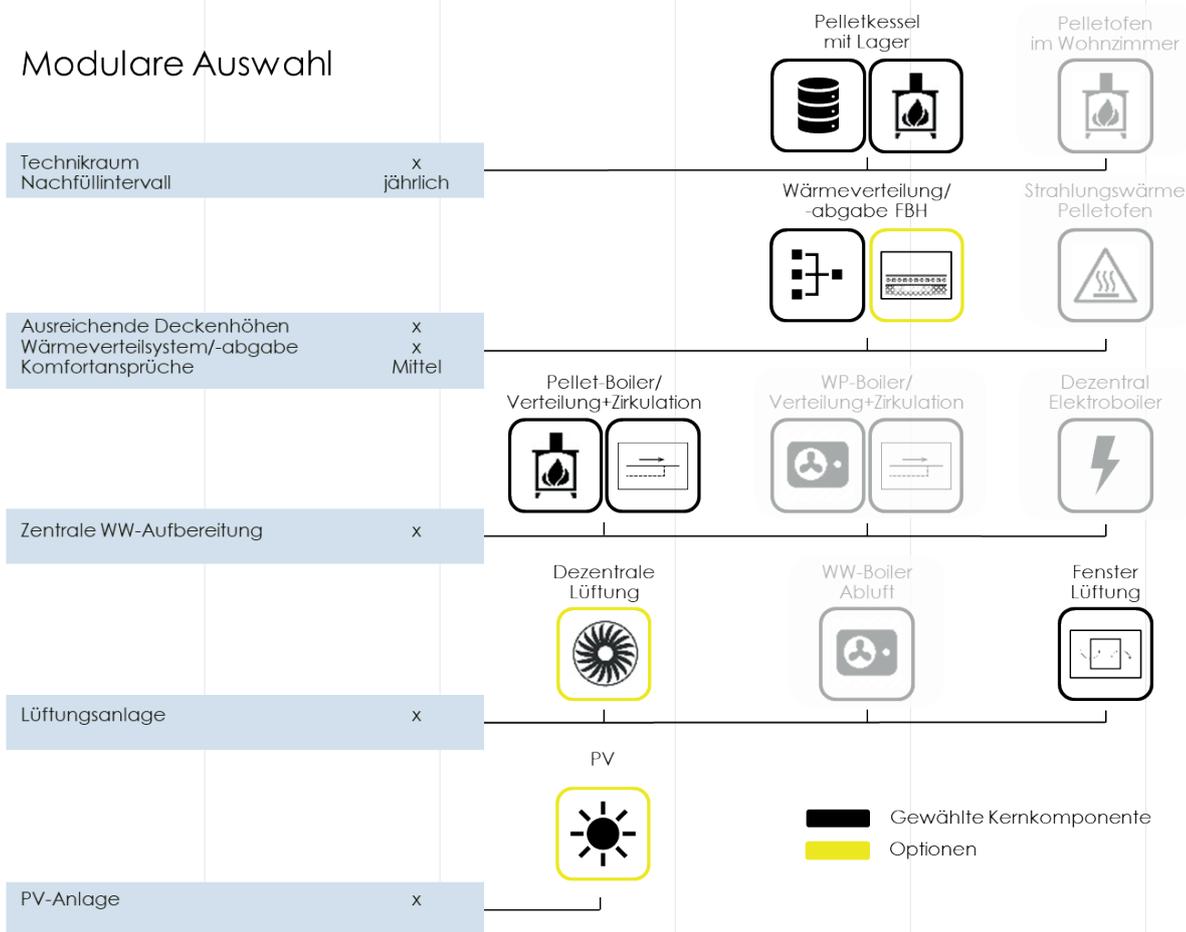
B9 Gebäudetechnik: Mehrfamilienhaus «MFH Carlen»

Links, Oben: Prinzipskizze des Archetyps MFH

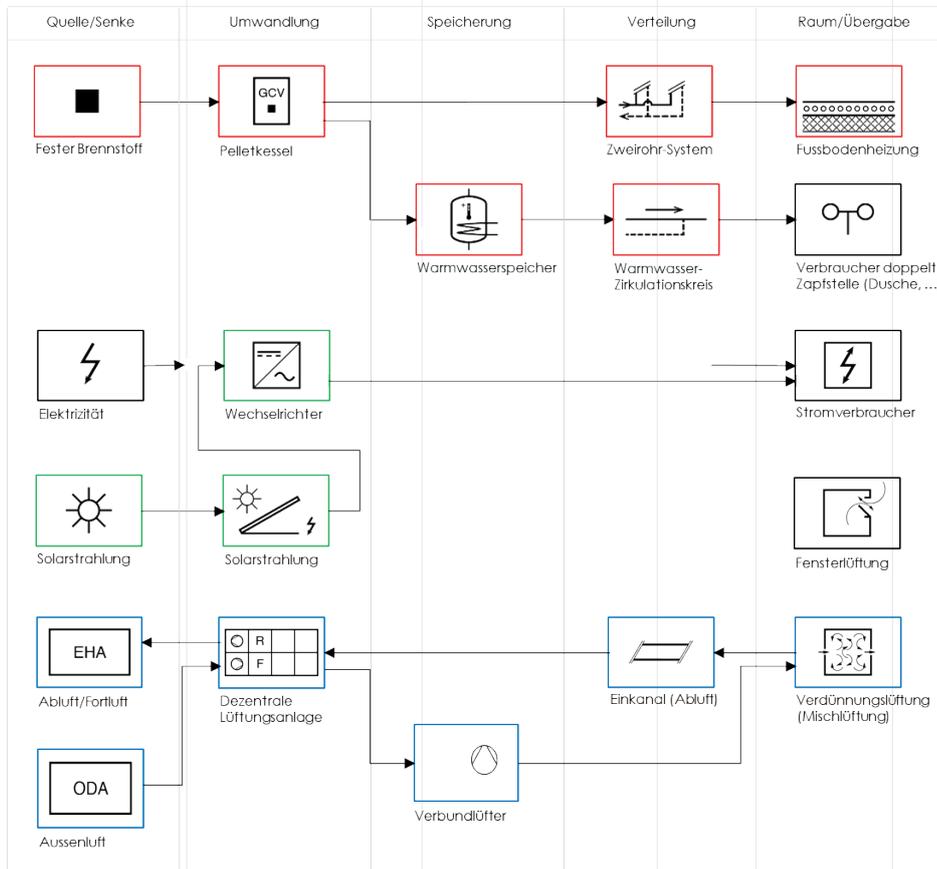
Rechts, Oben: Modulare Auswahl der Kernkomponenten (in Schwarz) für den Archetyp MFH

Rechts, Unten: Prinzipschema Modula GT (nach SIA 411) des Archetyps MFH

# Modulare Auswahl



# Prinzipschema Modula GT



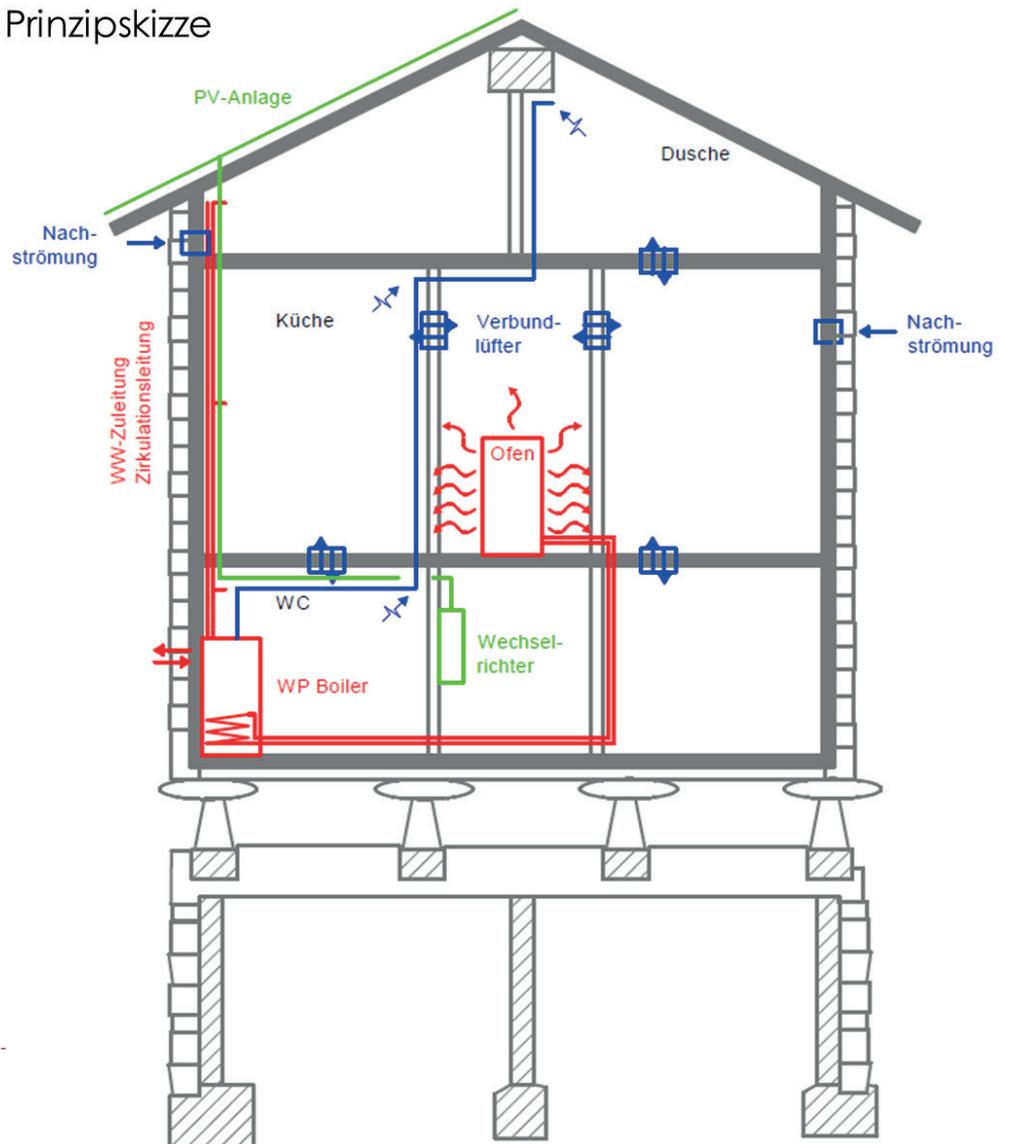
## Gebäudetechnik Einfamilienhaus «EFH Stadel Biel»

Im Stadel gibt es keinen Technikraum. Das Nachfüllintervall kann täglich sein. Es bietet sich eine Lösung mit Pelletofen an. Durch ein optimiertes Raumdesign und mit idealer Ofenplatzierung kann ein Grossteil der Räume mit Wärme versorgt werden durch direkte Abstrahlung und Konvektion des Ofens. Entfernte oder in der Regel abgeschlossene Räumlichkeiten können zusätzlich mit Verbundlüfter ausgerüstet werden (z.B. Türe oder Wand), um für einen Luftaustausch zwischen den Räumen zu sorgen. Es sind gewisse Temperaturunterschiede zwischen den Räumen zu erwarten.

Durch den Einsatz eines Pelletkessels im Technikraum wird eine Wärmeverteilung und -abgabe benötigt. Zusätzlich kann ganzjährig ohne Komforteinbusse das Warmwasser aufbereitet werden. Optional kann eine Lüftungs-, wie auch eine PV-Anlage gewählt werden.



## Prinzipskizze



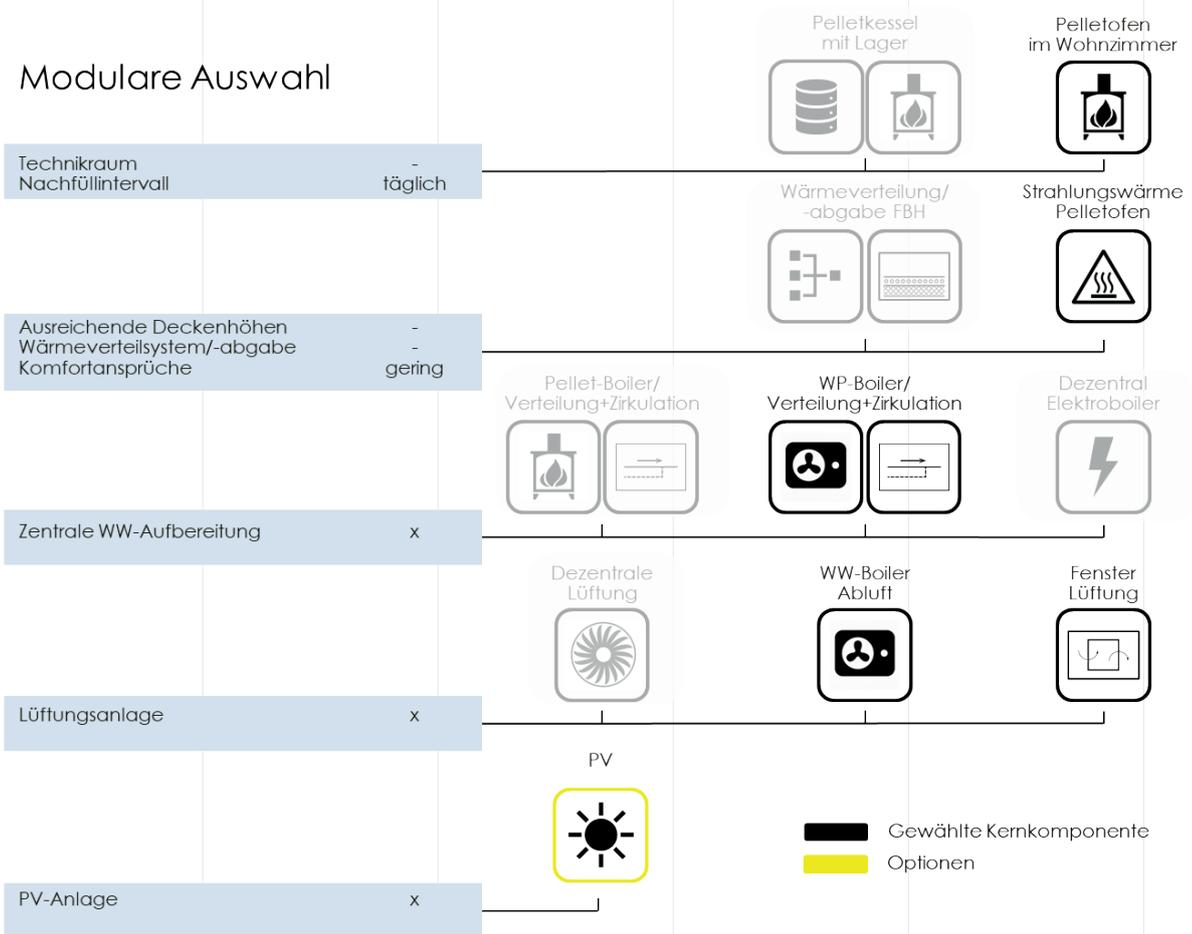
B 10 Gebäudetechnik Einfamilienhaus «EFH Stadel Biel»

Links: Prinzipskizze des Archetyps Stadel

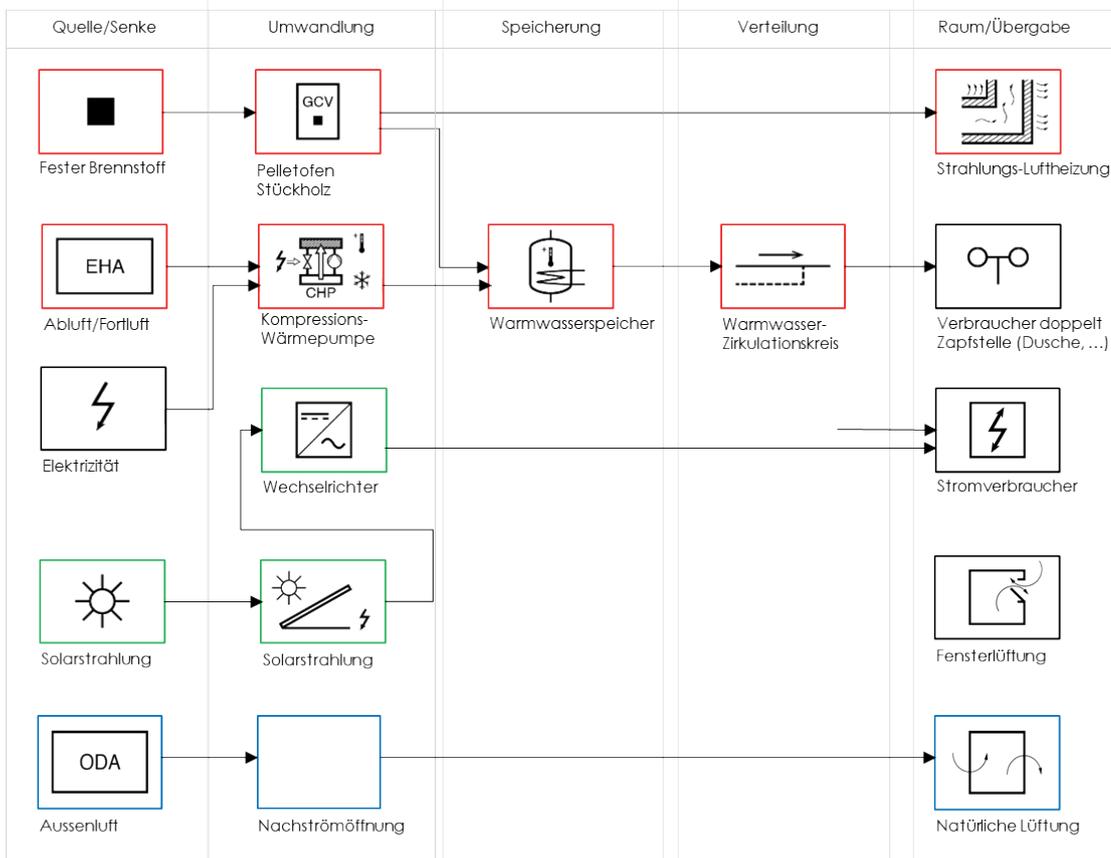
Rechts, Oben: Modulare Auswahl der Kernkomponenten (in Schwarz) für den Archetyp Stadel

Rechts, Unten: Prinzipschema Modula GT (nach SIA 411) des Archetyps Stadel

# Modulare Auswahl



# Prinzipschema Modula GT



**Effizienz Gebäudehülle und Gesamtenergieeffizienz**  
 Unter Berücksichtigung der Angaben aus den Systemnachweisen der zur Dämmung der Gebäudehülle sowie der entwickelten Gebäudetechnikkonzepte wird je ein GEAK erstellt, aus welchem der zu erreichende Standard der Effizienz der Gebäudehülle sowie die Gesamtenergieeffizienz der Referenzgebäude im unsanierten sowie sanierten Zustand hervorgeht. GEAK steht für „Gebäudeenergieausweis der Kantone“. Der GEAK ist ein einheitliches, schweizweit gültiges Bewertungs- und Beratungsinstrument, mit welchem die Energieeffizienz der Gebäudehülle sowie die Gesamtenergieeffizienz eines Gebäudes unter Berücksichtigung der jeweiligen Gebäudetechnik ermittelt werden kann. Dafür wird dem Gebäude für die Bereiche „Gebäudehülle“ sowie „Gesamtenergieeffizienz“ jeweils eine Klasse von A bis G (von sehr energieeffizient bis wenig energieeffizient) zugewiesen. Die Berechnungen werden mit dem GEAK-Online-Tool auf einer für GEAK-Experten zugänglichen Online-Plattform durchgeführt. In Bild B 11 ist eine Beschreibung der Effizienzklassen aufgeführt.

**«MFH Carlen»**

Das unsanierte MFH Carlen ist ein nicht gedämmter Altbau mit veralteter Gebäudetechnik, die keinen Einsatz regenerativer Energien aufweist. Es ist demnach sowohl hinsichtlich der Energieeffizienz der Gebäudehülle wie auch der Gesamtenergieeffizienz in «Klasse G» einzuordnen.

Nach der Sanierung weist das Gebäude eine sanierte Gebäudehülle, die den gesetzlichen Anforderungen entspricht sowie eine erneuerte Gebäudetechnik mit einem hohen Anteil an regenerativer Energie auf. Bei einer Umsetzung der beschriebenen Dämmmassnahmen sowie dem Einbau der genannten Gebäudetechnik erreicht das sanierte Referenzgebäude bei der Energieeffizienz der Gebäudehülle wie auch der Gesamtenergieeffizienz «Klasse B».

**«EFH Stadel Biel»**

Analog zum MFH Carlen weist der Stadel Biel im unsanierten Zustand hinsichtlich der Energieeffizienz der Gebäudehülle «Klasse G» auf. Nach Umsetzung der genannten Dämmmassnahmen der Gebäudehülle sowie dem Einbau der beschriebenen Gebäudetechnik erreicht das Referenzgebäude ebenfalls hinsichtlich Gebäudehülle und Gesamtenergieeffizienz «Klasse B».

**Klasse    Effizienz der Gebäudehülle    Gesamtenergieeffizienz**

<b>A</b>	Hervorragende Wärmedämmung (Dach, Fassade, Keller), Fenster mit Dreifach-Wärmeschutzverglasungen (z.B. Minergie-P).	Hocheffiziente Gebäudetechnik für Heizung und Warmwasser, effiziente Beleuchtung und Geräte, Einsatz erneuerbarer Energien und Eigenstromerzeugung (z.B. Minergie-A).
<b>B</b>	Gebäude mit einer thermischen Gebäudehülle, die den gesetzlichen Anforderungen entspricht.	Gebäudehülle und Gebäudetechnik im Neubaustandard, Einsatz erneuerbarer Energien (Beispiel Minergie-Systemerneuerung).
<b>C</b>	Altbauten mit umfassend erneuerter Gebäudehülle (Beispiel Minergie-Systemerneuerung).	Umfassende Altbausanierung (Wärmedämmung und Gebäudetechnik), meist kombiniert mit erneuerbaren Energien.
<b>D</b>	Nachträglich gut und umfassend gedämmter Altbau, jedoch mit verbleibenden Wärmebrücken.	Weitgehende Altbausanierung, jedoch mit deutlichen Lücken oder ohne den Einsatz von erneuerbaren Energien.
<b>E</b>	Altbauten mit Verbesserung der Wärmedämmung, inkl. neuer Wärmeschutzverglasung.	Teilsanierte Altbauten, z.B. neue Wärmeerzeugung und evtl. neue Geräte und Beleuchtung.
<b>F</b>	Gebäude, die teilweise gedämmt sind.	Bauten mit einzelnen neuen Komponenten (Gebäudehülle, Gebäudetechnik, Beleuchtung etc.)
<b>G</b>	Altbauten ohne oder mit mangelhafter nachträglicher Dämmung und grossem Sanierungspotenzial.	Altbauten mit veralteter Gebäudetechnik und ohne Einsatz erneuerbarer Energien, die ein grosses Verbesserungspotenzial aufweisen.

B 11  
 Beschreibung  
 der Effizienzklassen

Quelle: Broschüre «Der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK)», Ist-Zustand beurteilen und Sanierung planen)

## 7.2 Feuchteschutz in der energetischen Sanierung

In der energetischen Sanierung historischer Gebäude ist eine sorgfältige Planung des Feuchteschutzes ebenso besonders wichtig. Die Sanierungsmassnahmen sind mit Änderungen der bestehenden Bauteilaufbauten verbunden, die eine Überprüfung des Feuchteschutzes erforderlich machen.

### Einführung

Eine geänderte oder häufigere Nutzung der Gebäude kann eine höhere Feuchtelast der Raumluft nach sich ziehen, die ein angepasstes Lüftungskonzept erforderlich macht. Bei den im Rahmen des Projekts Vetanova untersuchten Massivholzhäusern werden die Aussenwände aus Ortsbild- und Denkmalschutzgründen in der Regel innen gedämmt. Innendämmungen weisen aufgrund der veränderten Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Bauteil ein erhöhtes Feuchteschutzrisiko auf und müssen daher mit grosser Sorgfalt geplant werden. Der Nachweis des Feuchteschutzes mittels hygrothermischer Bauteilsimulation ist in diesem Zusammenhang seit mehreren Jahren Stand der Technik. Im Falle der historischen Holzgebäude ist insbesondere auch ein sorgfältig geplantes und ausgeführtes Luftdichtheitskonzept wichtig, um Feuchteschäden an den tragenden Wänden sowie erhöhte Lüftungswärmeverluste zu vermeiden. In diesem technischen Leitfaden werden die im Rahmen des Projektes Vetanova gesammelten Erkenntnisse und Überlegungen zum Thema Luftdichtheit der historischen Holzgebäude zusammengefasst.

Der technische Leitfaden zeigt zudem geeignete Simulationsprogramme, Randbedingungen, Feuchtequellen sowie Beurteilungskriterien auf, mit deren Hilfe der Feuchteschutz der für das Projekt Vetanova relevanten Bauteilaufbauten unter realistischen Randbedingungen und mit einer ausreichend hohen Sicherheit nachgewiesen werden kann. Im Fokus stehen dabei die innengedämmten Aussenwände. Um sicherzustellen, dass die gewählten Randbedingungen für die Simulation der sanierten Wandaufbauten möglichst realitätsnah sind, werden zunächst die Bestandswände mittels hygrothermischer Bauteilsimulationen untersucht. Diese funktionieren mit Ausnahme kleinerer Einschränkungen seit Jahrhunderten schadensfrei, woraus sich bestimmte Beurteilungskriterien und Holzfeuchtebereiche ableiten lassen. Die Randbedingungen werden in der Simulation der

Bestandswand so gewählt, dass diese eingehalten werden. Auf Basis der Untersuchungen der Bestandskonstruktion werden anschliessend Simulationen der innengedämmten Bauteile vorgenommen. Dabei werden Systeme der am Projekt Vetanova beteiligten Wirtschaftspartner Fisolan, Gutex und SIGA untersucht. Es werden robuste Sanierungslösungen präsentiert, die nach Möglichkeit die Einzelbauteilanforderungen erfüllen. Neben den innengedämmten Aussenwänden wird zudem eine Dachkonstruktion mittels hygrothermischer Bauteilsimulation überprüft. Kritische Bereiche der thermischen Gebäudehülle werden mit Hilfe von Wärmebrückenberechnungen untersucht.

### Luftdichtheitskonzept der Gebäudehülle

Bei den historischen Gebäuden im Oberwallis handelt es sich um Gebäude in Massivholzbauweise, also um eine leichte Bauweise. Für eine Sanierung mit geringem Schadensrisiko ist daher in allen wärmeübertragenden Bauteilen eine funktionsfähige Luftdichtheitsschicht erforderlich. Aufgrund der Wichtigkeit dieser Luftdichtheitsschicht wurden hierzu Untersuchungen durchgeführt.

### Anforderungen

Die Anforderungen an die Luftdichtheitsebene werden in der Schweiz in der Norm SIA 180: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Ausgabe 2014 in Verbindung mit Korrigenda C1, Ausgabe 2015 formuliert. Hier werden zunächst die Bauteile definiert, in denen eine Luftdichtheitsebene einzubauen sind. Dies sind sowohl die wärmeübertragenden Bauteile der Gebäudehülle, als auch die Bauteile zwischen den einzelnen Zonen im Gebäude, wie zum Beispiel die Wohnungen.

Zunächst werden die Anforderungen an die mittlere Luftdichtheit der Gebäudehülle gestellt. Diese Anforderungen finden sich in Tab. 5 der SIA 180. Diese Anforderungen richten sich an den sogenannten Leckvolumenstrom bei

50 Pa Druckdifferenz zwischen innen und aussen, der auf die Hüllfläche  $A_{\text{inf}}$  bezogen wird, den  $q_{a,50}$  Wert. Diese Anforderungen sind in Tabelle T 15 zusammengestellt. Die Einhaltung einer mittleren Luftdichtheit der Gebäudehülle gewährleistet aber noch nicht die Bauschadensfreiheit der Konstruktion, da lokale Leckagen in der Luftdichtheitsebene Bauschäden durch Wasserdampftransport durch Konvektion feuchtwarmer Raumluft in der kalten Jahreszeit verursachen können.

Daher muss das Planungsziel für die Luftdichtheitsebene eine luftdichte Gebäudehülle ohne Leckagen, welche das Gebäude lückenlos umschliesst, sein. Die Luftdichtheitsebene ist an allen Durchdringungen luftdicht anzuschließen. An den Rändern müssen die Luftdichtheitsebenen der verschiedenen Bauteile ebenfalls luftdicht miteinander verbunden werden.

#### Untersuchung Fugendurchlässigkeit

Anhand von Messungen der Fugendurchlässigkeit einer Aussenwand sowie Aussenecke konnte gezeigt werden, dass die bestehenden Aussenwände und Aussenecken aus Massivholz in der Regel nicht luftdicht sind. Um die Luftdichtheit der Aussenwände zu verbessern, wird das Anbringen einer 3mm starken, armierten Lehmputzschicht angestrebt. Messungen der Fugendurchlässigkeit einer Bestandswand mit Lehmputz zeigten, dass diese luftdicht ist. Zur Beurteilung und besseren Einordnung der Messungen wurden zudem Vergleichsmessungen an einer Sichtbetonwand durchgeführt. Nachfolgend wird zunächst das Messprinzip näher beschrieben.

Das Messsystem besteht aus einem Ventilator mit Drehzahlregler, einem Druckmessgerät, einem Schlauchset für die Druckmessung, einem Prüfraumen sowie aus einer Plastikfolie und Klebeband zur Abdichtung (vgl. Bild B 15).

Weiter besteht es aus dem Volumenstrommessgerät mit vier dazugehörigen Messblenden, zwei Verbindungsschläuchen und zwei Anschlussplatten.

Auf der zu prüfenden Wandfläche bzw. Eckverbindung wird ein Prüfraumen befestigt und an den inneren Kanten luftdicht abgeklebt. Unter dem Prüfraumen durchlaufende Risse werden mit Dichtmasse und Klebeband möglichst gut abgedichtet. Die Bauteilanschlussplatte wird in einer Folie festgeklebt, welche wiederum luftdicht mit dem Prüfraumen verklebt ist. Ein Verbindungsschlauch verbindet diese Anschlussplatte mit dem Volumenstrommessgerät und der zweite Verbindungsschlauch verbindet dieses wiederum mit dem Ventilator.

Der Ventilator erzeugt gegenüber dem atmosphärischen Druck im Gebäude einen Überdruck im Rohrsystem und somit auch im Hohlraum zwischen Wand und Folie. Sobald ein stabiler Überdruck zwischen Wand und Folie hergestellt ist, kann mit der Messung begonnen werden. Um die Referenzdrücke zu erhalten, wird zusätzlich die dazugehörige Differenz des Druckes im Hohlraum zu dem im Raum gemessen. Damit sichergestellt ist, dass diese Druckdifferenz gleich der Druckdifferenz am Bauteil, wird in diesem Raum oder in einem Nachbarraum ein Fenster geöffnet, so dass der Druck im Raum gleich dem Aussendruck ist. Die Luft strömt durch die definierte Messblende im Volumenstrommessgerät in den Hohlraum zwischen Wand und Folie und durch Undichtigkeiten der Fugen der Bestandswand nach aussen. Anhand der Grösse der Lochblendenöffnung und der Druckdifferenz vor und hinter der Blende wird der Volumenstrom bei der jeweiligen Druckdifferenz ermittelt. Dieser kann auf die Fugenlänge und/oder auf die Bauteilfläche bezogen werden, um den sogenannten Fugendurchlasskoeffizienten  $a_f$  in  $\text{m}^2/(\text{Pa}^n \text{ h})$  zu ermitteln. Es werden mindesten acht verschiedene Druckstufen angefahren.

T 15 Grenz- und Zielwerte der Luftdurchlässigkeit der Hüllfläche

	Grenzwert		Zielwert
	für natürliche Lüftung $q_{a,50,li}$ in $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$	für mechanische Lüftung $q_{a,50,li}$ in $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$	generell $q_{a,50,li}$ in $\text{m}^3/(\text{hm}^2)$
Neubauten	2.4	1.6	0.6
Umbauten, Erneuerungen	3.6	2.4	1.2

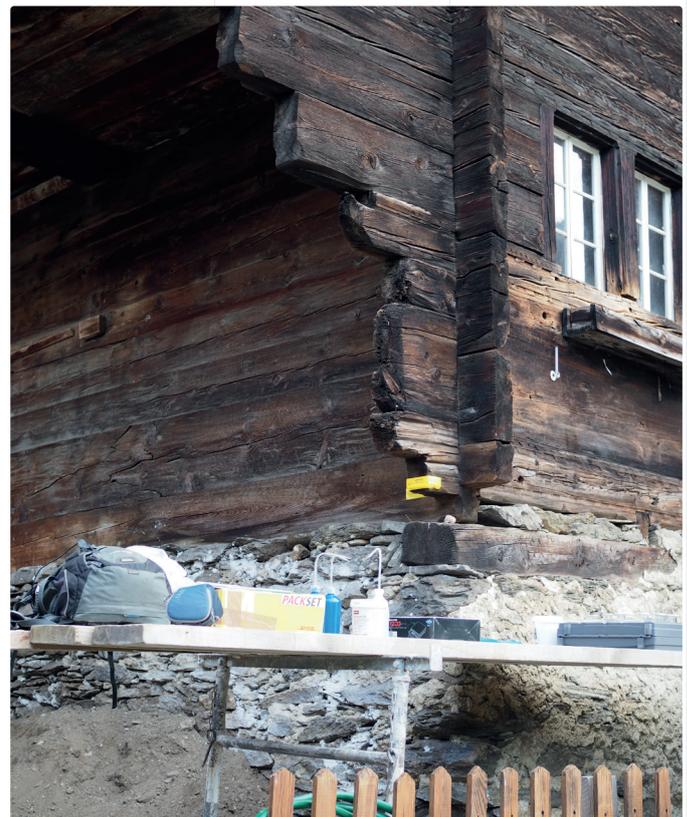
## B 12 Messung Fugendurchlässigkeit

Links, Oben:  
Auf Bestandswand  
befestigter und luft-  
dicht angeschlossener  
Prüfrahmen mit Folie,  
Bauteilanschlussplatte  
und Verbindung-  
schlauch.

Rechts, Oben:  
Prüfrahmen auf mit  
Lehmputz versehe-  
ner Bestandswand.  
Ein Verbindungs-  
schlauch verbindet die  
Anschlussplatte mit  
dem Volumenstrom-  
messgerät und der  
zweite Verbindungs-  
schlauch verbindet  
dieses wiederum mit  
dem Ventilator. Die  
Drücke werden mit  
einem Druckmessge-  
rät in der Nähe des  
Fensters über dünne  
Plastikschläuche  
abgenommen und mit  
Hilfe einer Software  
aufgezeichnet.

Links, Unten:  
Auf Bestandsecke  
befestigter und luft-  
dicht angeschlossener  
Prüfrahmen mit Folie.

Rechts, Unten:  
Aussenansicht der  
gemessenen Eckver-  
bindung.



In Bild B 13 sind für die Bestandswand, die Bestandsecke, die Bestandswand mit Lehmputz und die Betonwand die gemessenen Volumenströme über der Druckdifferenz aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass die an der mit Lehm verputzten Bestandswand gemessenen Volumenströme in demselben Bereich wie die an der Betonwand gemessenen Volumenströme liegen. Da Betonwände luftdicht sind, kann also davon ausgegangen werden, dass die mit Lehm verputzte Wand ebenfalls luftdicht ist. Die verbleibenden Volumenströme sind auf Undichtigkeiten im Messaufbau zurückzuführen. An der Bestandswand ohne Lehmputz sowie an der Ausseneckverbindung im Bestand wurden hingegen um ein Vielfaches höhere Volumenströme gemessen. Die Bestandswand und bestehende Aussenecke können daher nicht als luftdicht bezeichnet werden.

Die untersuchte Fläche der Bestandswand weist eine Fugenlänge von 2.9 m auf. Der Fugendurchlasskoeffizient liegt bei  $a_f = 0.018 \pm 0.001 \text{ m}^3/(\text{h m Pa}^n)$ . Die untersuchte Fläche der Aussenecke weist eine Fugenlänge von 4.59 m auf. Der Fugendurchlasskoeffizient liegt bei  $a_f = 0.050 \pm 0.002 \text{ m}^3/(\text{h m Pa}^n)$ . Bei den Fehlerangaben handelt es sich um das 95 % Vertrauensintervall.

#### Konstruktion der Luftdichtheitsebene

##### Aussenwände

Aufgrund des Denkmalschutzes müssen die Aussenwände mit einer innen liegenden Wärmedämmung ausgestattet werden. Durch diese innenliegende Wärmedämmung kommt der Luftdichtheitsebene eine besondere Bedeutung für die Robustheit der sanierten Aussenwand zu. Daher wurden verschiedene Untersuchungen der Luftdichtheit der Aussenwände durchgeführt.

Es wurde zunächst die Luftdurchlässigkeit der Bestandswände durch eine Fugendurchlässigkeitsmessung festgestellt, wie in vorhergehendem Abschnitt beschrieben wurde. Die Luftdurchlässigkeit der Bestandswände ist zu hoch, um mit einer innenliegenden Wärmedämmung ohne eine zusätzliche Luftdichtheitsebene eine robuste Sanierungslösung zu erreichen. Daher wurde eine neuartige Luftdichtheitsebene aus armiertem Lehmputz auf der Innenseite der Aussenwand untersucht. Die so behandelte Wand kann als luftdicht bezeichnet werden.

Allerdings konnte im Rahmen des Forschungsprojekts noch nicht geklärt werden, ob die Luftdurchlässigkeitsschicht langfristig luftdicht bleibt. Insbesondere ist unklar, ob der Lehmputz dauerhaft rissfrei bleibt. Aus diesen Gründen wurde auf eine traditionelle Luftdurchlässigkeitsschicht aus einer raumseitigen Folie für die Sanierung zurückgegriffen.

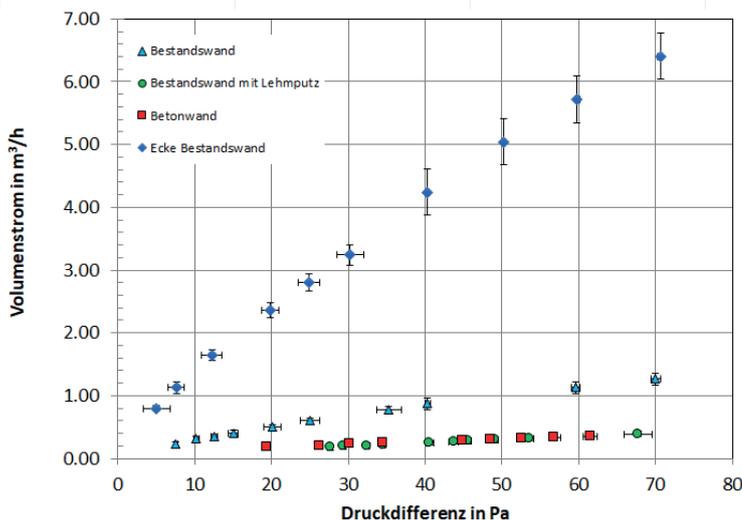
Die Luftdichtheitsebene der Aussenwand ist an allen Rändern und Durchdringungen luftdicht anzuschließen. Für den Anschluss an die einbindenden Innenwände wurden Detaillösungen mit Nut- und Federanschluss entwickelt. Die entsprechenden Details finden sich im Bauteilkatalog (Vergleich Bauteilkatalog). Auch für den Anschluss der Luftdichtheitsebene an die Dielbaudecken wurde ein Detail mit Reparaturstopfen entwickelt. Auch dieses Detail findet sich im Bauteilkatalog. Die Luftdichtheitsebene der Aussenwand ist ebenfalls luftdicht mit den Fensterrahmen zu verbinden. Die Luftdichtheitsebene dient in der Außenwand auch als Dampfbremse. Die dampfbremsende Wirkung der Luftdichtheitsebene wurde durch Simulationsberechnungen so festgelegt, dass eine robuste Sanierungslösung gefunden wurde.

##### Steildach

Auch im Steildach wird eine Luftdichtheitsebene auf der Unterseite der Sparren als Folie aufgebracht. Diese Folie wird zugleich als variable Dampfbremse ausgebildet, um den Feuchtehaushalt der Steildaches zu stabilisieren. Diese Luftdichtheitsebene ist luftdicht an der Traufe mit der Luftdichtheitsebene der Aussenwand zu verbinden. Durchdringungen sind ebenfalls luftdicht anzuschließen.

##### Kellerdecke und Decke gegen Erdreich

In den Referenzgebäuden sind diese Bestandsdecken als Bohlendecken ausgeführt. Damit die Luftdichtheitsebene der Aussenwand an die Luftdichtheitsebene dieser Geschossdecken luftdicht angeschlossen werden kann, muss auf der Oberseite der Bohlen eine Luftdichtheitsebene verlegt werden. Auch diese Folie ist luftdicht an alle Durchdringungen und Rändern anzuschließen. Ebenso muss sie an die Luftdichtheitsebenen der angrenzenden Bauteile luftdicht angeschlossen werden.



B 13  
Diagramm über die Abhängigkeit des Volumenstroms zur Druckdifferenz

Vergleich der gemessenen Volumenströme bei unterschiedlichen Differenzdrücken der Bestandswand, der Bestandswand mit Lehmputz sowie der Betonwand.

Massgebende Simulationsgrundlagen historische Holzgebäude  
Im Folgenden werden die massgebenden Simulationsgrundlagen genannt, mit deren Hilfe ein gesicherter Nachweis des Feuchteverhaltens der kritischen Bauteile der historischen Holzgebäude möglich ist. Als relevante kritische Konstruktionen werden die innengedämmten Aussenwände sowie Steildachaufbauten mit Zwischensparrendämmung ohne zusätzliche Überdämmung der Tragkonstruktion erachtet. Durch Anpassung der Materialparameter auf der Aussenseite der Bestandskonstruktion sowie die Eingabe von bestimmten Feuchtequellen werden zusätzliche Sicherheiten in den Simulationen angenommen. Es ist jedoch nicht möglich grobe Fehler, wie eine unzureichend angeschlossene Luftdichtheitsebene und in der Folge Konvektionsschäden, exakt in den Simulationsmodellen abzubilden

#### Simulationsprogramme

Als Simulationsprogramm sollte ein Programm verwendet werden, welches die gekoppelten Wärme- und Feuchteströme in Aussenbauteilen abbilden kann. Um auch den Einfluss der Fugen der Massivholzwände zu berücksichtigen, sollten Simulationsprogramme mit mindestens zwei Dimensionen, wie WUFI 2D oder Delphin verwendet werden. Die Nachweise in vorliegendem Bericht wurden mit WUFI Pro (eine Dimension) sowie WUFI 2D (zwei Dimensionen) geführt. Nähere Informationen zu der am Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelten Software finden sich unter <https://wufi.de/de/>.

#### Aussenwand

##### Geometrie und Materialkenndaten

Im Folgenden wird zunächst die Geometrie des WUFI 2D Modells der unsanierten Bestandswand beschrieben. Gemäss den im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Bauaufnahmen bestehen die Massivholzwände aus ca. 24 cm bis 30 cm hohen Holzbalken. Die Dicke der Massivholzwände beträgt zwischen ca. 12 cm bis 14 cm. Um den Einfluss der Fugen zu überschätzen und somit auf der sicheren Seite liegend, wurde die Höhe der Holzbalken mit 14 cm angenommen. Die Dicke der Wand wird mit 12 cm festgelegt. Zwischen zwei Holzbalken befindet sich eine linsenförmige Fuge, welche traditionell mit Flechten ausgefüllt wird. In Abbildung 17 ist die in WUFI 2D eingegebene Geometrie der Bestandskonstruktion aufgeführt und vermasst. Ebenfalls in Abbildung 17 dargestellt ist die Lage der Feuchtequellen, auf die in Abschnitt 3.2.2.3 näher eingegangen wird.

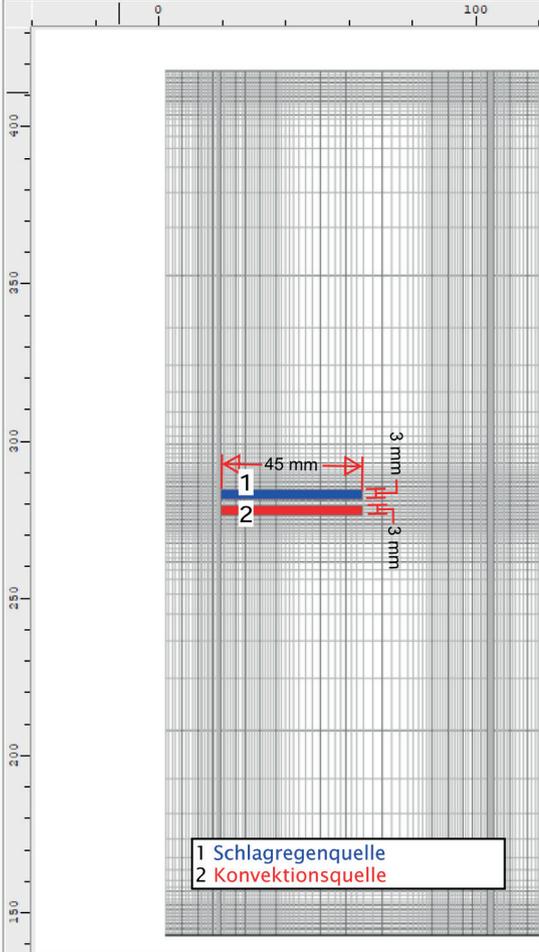
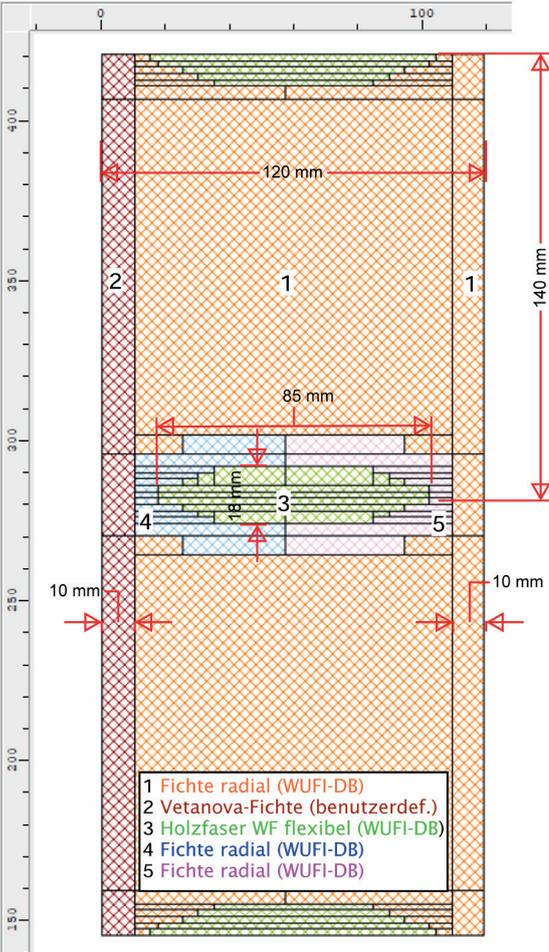
Die zu untersuchenden Gebäude bestehen in der Regel aus Lärchen- oder Fichtenholz. In der WUFI-Datenbank (WUFI-DB) ist kein Lärchenholz vorhanden. Zudem ist Fichte weniger dauerhaft gegenüber Feuchteinflüssen als Lärche und stellt daher den kritischeren Fall da. Aus diesen Gründen wird für die Simulationen das Material „Fichte radial“ aus der WUFI-DB verwendet. Für das Flechtenmaterial innerhalb der Fugen wird eine Holzfaserplatte mit geringer Rohdichte („AiF Holzfaserdämmmatte WF flexibel“) aus der WUFI-DB verwendet. Die Bereiche um die Fuge werden als besonders kritisch hinsichtlich des Feuchteschutzes betrachtet. Um diese getrennt vom übrigen Wandquerschnitt auswerten zu können, werden der innere und äussere

Fugenbereich mit den Farben Dunkelblau und Magenta versehen. Die Materialkenndaten von „Fichte radial“ bleiben jedoch unverändert.

Der Einfluss von Alterungsprozessen und Witterungseinflüssen auf die hygrischen Materialkennwerte von Holz ist bisher nur unzureichend erforscht. Die Änderungen der Holzstruktur sind vor allem auf den Wetterseiten der Gebäude teils deutlich erkennbar. Besprüht man diese Oberflächen mit Wasser, so wird dieses rasch aufgenommen. Aufgrund dieser Beobachtungen wurden einige für die Simulation relevanten Materialkenndaten an historischen Fichtenholzproben im Labor der Berner Fachhochschule gemessen. Dies waren die Rohdichte, die freie Wassersättigung sowie der Wasseraufnahmekoeffizient. Es zeigte sich, dass die historische Fichte eine um ca. 20 % niedrigere Rohdichte, eine um ca. 15 % reduzierte freie Wassersättigung sowie einen mehr als 12-mal so hohen Wasseraufnahmekoeffizient aufweist. Mit Hilfe der gemessenen Materialkenndaten wurde basierend auf dem WUFI-DB Material „Fichte radial“ über das Verhältnis der Rohdichten eine benutzerdefinierter Materialkenndatensatz („Vetanova-Fichte“) generiert. Da die Verwitterung sich auf die äusseren Schichten beschränkt, wurde das angepasste Material für den äussersten Zentimeter des Wandaufbaus verwendet mit dem Ziel eine möglichst realitätsnahes Simulationsmodell zu erzeugen. Die genauen Materialkenndaten der Vetanova-Fichte sowie aller anderen verwendeten Baustoffe finden sich in (Verweis Forschungsbericht).

Auf der Bestandswand wird das jeweilige Innendämmsystem angebracht. In Abbildung 18 sind die Geometrien der untersuchten Simulationsmodelle der sanierten Bestandswand beschrieben. Es werden sanierte Wandaufbauten mit Produkten der Wirtschaftspartner Fisolan, Gutex und SIGA untersucht.

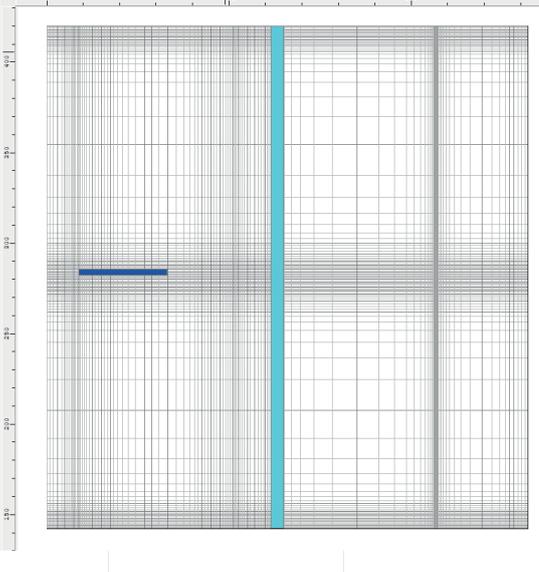
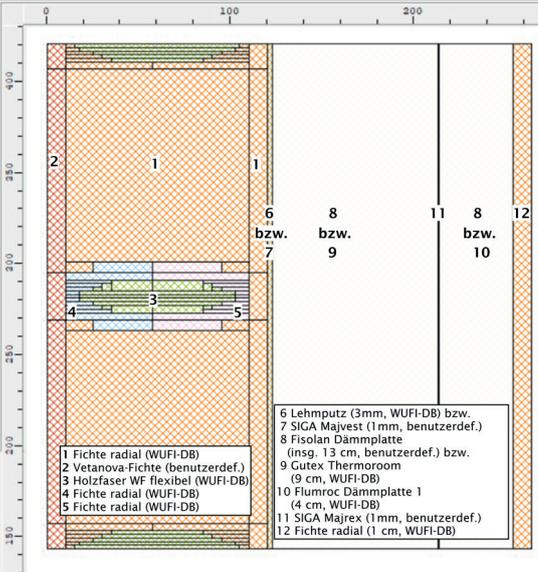
Vorgängig zu den hygrothermischen Bauteilsimulationen werden Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizienten mit der Software Lesosai durchgeführt. Die Dämmstärken werden dabei zunächst so gewählt, dass die gesetzlichen Energievorschriften des Einzelbauteilnachweises eingehalten werden. Diese liegen für eine sanierte Aussenwand bei  $U = 0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Bei einem Holzanteil von 13 % im Gefach ist bei Verwendung der Dämmstoffe «Fisolan Dämmplatte» ( $\lambda=0.036 \text{ W}/\text{mK}$ ), «Gutex Thermoroom» ( $\lambda=0.039 \text{ W}/\text{mK}$ ) und «Flumroc Dämmplatte 1» ( $\lambda=0.035 \text{ W}/\text{mK}$ ) eine Dämmstärke von ca. 13 cm zur Einhaltung der Einzelbauteilanforderungen nötig. Es werden hygrothermische Simulationen mit diesen Dämmstärken durchgeführt. Die Geometrie und Materialien der Bestandswand werden unverändert übernommen. Auf der Wandinnenseite wird dann ein Innendämmsystem bestehend aus einer Lehmputz- bzw. Luftdichtheitsschicht, der Dämmung im Gefach (Schafwolle bzw. Holzfaser), einer weiteren Luftdichtheitsschicht, einer Installationsebene (Schafwolle bzw. Steinwolle) sowie einer Holzverschalung aufgebracht.



B 14  
Aussenwand -  
Bestandswand

Links : Geometrie des  
Simulationsmodells  
der Bestandswand;

Rechts: Lage der  
Schlagregen- (blau) so-  
wie Konvektionsquelle  
(rot) in der äusseren  
Hälfte der Fuge. Die  
Quellen weisen Ab-  
messungen von 3 auf  
45 mm auf.



B 15  
Aussenwand -  
Sanierter Zustand

Links : Geometrie des  
Simulationsmo-  
dells der sanierten  
Bestandswand;

Rechts: Lage der  
Schlagregen- (dunkel-  
blau) in der äusseren  
Hälfte der Fuge bzw.  
Infiltrationsquelle  
(hellblau) in den  
äusseren 5 mm der  
Wärmedämmung.  
Die Quellen weisen  
Abmessungen von 3  
auf 45 mm auf bzw. 5  
auf 278 mm auf.

## Klimarandbedingungen und kritische Orientierung

Um die Klimarandbedingungen für die Simulationen festzulegen, werden die Klimadaten der Wetterstation Ulrichen von MeteSchweiz der Jahre 1999-2019 bezogen. Diese Wetterdaten sind teilweise lückenhaft und wurden von uns für die WUFI-Berechnungen entsprechend aufbereitet.

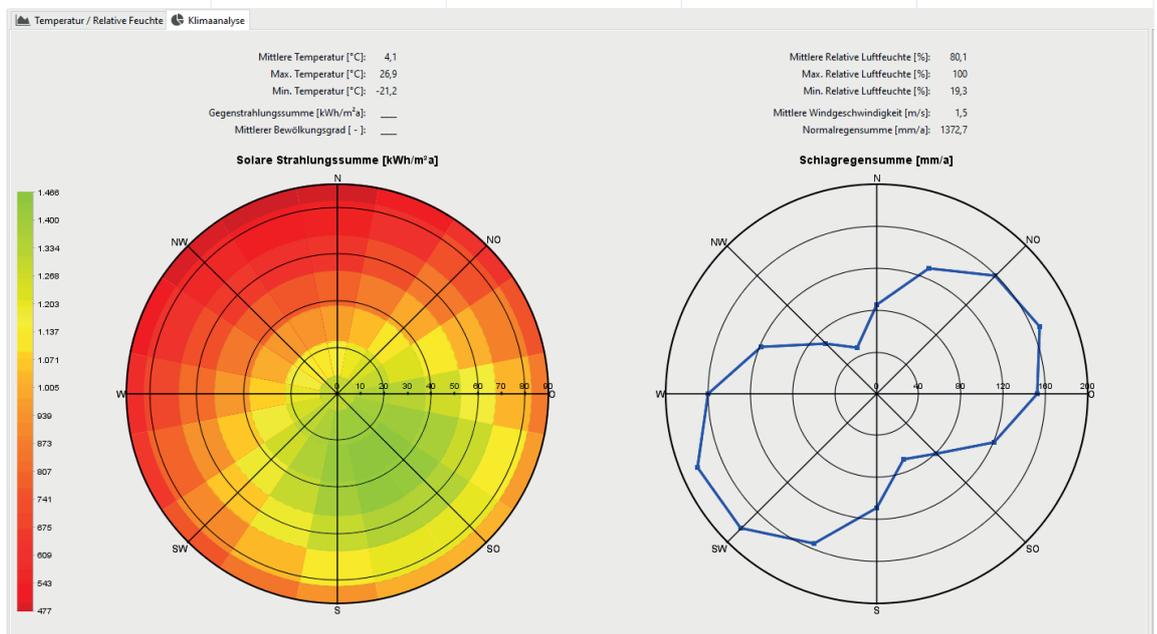
Die so ergänzten Wetterdaten können bei der Berner Fachhochschule angefragt werden und werden von dieser ausschliesslich für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt. Eine Analyse der Klimadaten ergab, dass das Jahr 2008 besonders regenreich im Vergleich zum Durchschnitt der Jahre 1999-2019 war. Daher wurde dieses Klimajahr für die Simulationen verwendet. In Bild B 16 ist die Wetterstatistik des Programms WUFI für die Wetterstation Ulrichen des Klimajahres 2008 dargestellt.

Die durch das Programm WUFI angegebene Wetterstatistik zeigt, dass Windrichtungen, welche entlang des Tals der Rotten, welches von Nordost nach Südwest läuft, zur höchsten Wasserbelastung durch Schlagregen der Wände führen. Es werden drei Wandorientierungen als kritisch angesehen:

1. Die sogenannte Wetterseite, dies ist die Wand, welche in Richtung der grössten Windgeschwindigkeit orientiert ist und die somit am meisten mit Schlagregen beaufschlagt wird. Gemäss der Wetterstatistik der Meteostation Ulrichen ist dies für das Klimajahr 2008 die Wand mit einer West-Südwestausrichtung.
2. Die Wände mit Nordorientierung erhalten die geringste Sonneneinstrahlung und sind somit als ungünstig in Bezug auf die Austrocknung der Wand anzusehen.
3. Die Wände mit Ost-Nordorientierung weisen zwar einen geringeren Schlagregenanteil auf als diejenigen mit West-Südwestausrichtung, jedoch ist auch der Strahlungsanteil und damit die Austrocknung reduziert.

B 16  
Wetterstatistik des  
Programms WUFI

Die Wetterstatistik für die Wetterstation Ulrichen des Klimajahres 2008 für die verschiedenen Wandorientierungen mit der solaren Einstrahlung links und der Schlagregenbeaufschlagung rechts.



Beispiel Bestandswand: Lastfälle der Wasserbelastung  
 Die Bestandswände als Massivholzwände werden im Wesentlichen durch flüssiges Wasser aus drei Quellen belastet:

1. Schlagregen über die Aussenfläche der Holzbalken
2. Schlagregen über die Fugen zwischen den Holzbalken
3. Tauwasser in den Fugen durch Konvektion feuchtwarmer Luft von Innen

## Schlagregenbelastung der Wandfläche

Die vom Bauteil aufgesaugte Wassermenge aus Schlagregen kann die Feuchtebilanz wesentlich beeinflussen. Daher sollte diese Wasseraufnahme aus Schlagregen bei den Simulationen berücksichtigt werden. Zur Erläuterung des Verfahrens zur Bestimmung der von der Wand aufgenommenen Schlagregenmenge wird das Verfahren beschrieben, welches in dem Programm WUFI angewandt wird.

Zunächst wird aus den stündlichen Wetterdaten die Regenmenge in Millimetern pro Stunde bzw. in Litern pro Stunde entnommen. Bei dieser Regenmenge handelt es sich um den sogenannten Normalregen, also die Regenmenge, die pro Stunde auf eine horizontale Fläche fällt. Aus dieser Regenrate wird die Menge des Regens, welche auf eine senkrechte Wand auftrifft, die sogenannte Schlagregenmenge, bestimmt. Diese Schlagregenmenge hängt hauptsächlich von der Normalregenrate, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung im Verhältnis zur Fassadenausrichtung ab. Die Schlagregenrate berechnet sich nach Gleichung G 6:

$$\dot{V}_{hor} = \dot{V}_{hor} \cdot (R_1 + R_2 \cdot v_{wind}) \quad G 6$$

Mit:

- $\dot{V}_{hor}$  die Schlagregenrate in  $m^3/(m^2h)$
- $\dot{V}_{vert}$  die Niederschlagsmenge oder Regenrate in  $m^3/(m^2h)$
- $v_{wind}$  die mittlere Windgeschwindigkeit senkrecht zur Wandfläche in  $m/s$
- $R_1$  der 1. Regenkoeffizient ist für senkrechte Wände  $R_1 = 0 \text{ s/m}$
- $R_2$  der 2. Regenkoeffizient ist für freistehende Gebäude  $R_2 = 0.20 \text{ s/m}$  für in der Mitte der Fassade  $R_2 = 0.07 \text{ s/m}$

## Fortsetzung Beispiel Bestandswand

Aus der Schlagregenrate muss nun noch die anhaftende Wassermenge  $V_{haft}$  in  $m^3/(m^2h)$  berechnet werden. Dies ist die Menge, die nicht wegspritzt und die zum Aufsaugen zur Verfügung steht. Als Näherung wird hier 70 % der auftretenden Schlagregenmenge angegeben.

### Schlagregenbelastung der Fugen

Es ist bekannt, dass flüssiges Wasser über Risse sehr effizient aufgesaugt werden kann. Im Falle der Massivholzwände ist bei Schlagregenpenetration mit einem gewissen Feuchteeintrag in die nach aussen durchlaufenden Fugen zu rechnen. Dieser wird in Anlehnung an die Vorgaben aus Anhang D der DIN 4108-3 mit 1 % des auf der Bauteiloberfläche auftretenden Schlagregens angenommen und als Quelle im Simulationsmodell eingegeben. Lage und Geometrie der Quelle in der Bestandswand bzw. den sanierten Wänden sind aus Bild B 14 und B 15 ersichtlich.

### Belastung der Fugen durch Konvektion

Aufgrund des Temperaturunterschieds im Hausinneren und der Aussenluft kommt es im Winter zu einer Luftströmung durch die oberen Fugen eines Gebäudes von innen nach aussen. Da diese Luftströmung feuchtwarme Raumluft in die Konstruktion transportiert und damit grosse Wasserdampfmengen mit sich führt, kommt es hierdurch zu einer Wasserbelastung durch Tauwasserbildung, der sogenannten Konvektion. Der Luftstrom durch eine Fuge, an der eine Druckdifferenz von  $\Delta p$  anliegt, ergibt sich gemäss Gleichung G7:

$$\dot{V} = a_F \cdot l_F \cdot \Delta p^n$$

Mit:

- $\dot{V}$  den Volumenstrom in  $m^3/h$
- $a_F$  den Fugendurchlasskoeffizienten in  $m^2/(Pa \cdot h)$
- $l_F$  die Fugenlänge in  $m$
- $\Delta p$  die Druckdifferenz in  $Pa$
- $n$  den Exponenten,  $n = 0.87$

Die Druckdifferenz, die an der Fuge anliegt, kann aus der Höhe des Gebäudes sowie der Raumluft- und Aussenlufttemperatur nach Gleichung G 8 abgeleitet werden:

$$\Delta p = g \cdot h_1 \cdot \rho_n \cdot T_n \cdot \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_e} \right)$$

Mit:

- $g$  die Erdbeschleunigung,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $h_1$  die thermische Höhe des Gebäudes, die etwa der halben Gebäudehöhe entspricht in  $m$ , die Höhe des Gebäudes wird  $8 \text{ m}$  angesetzt
- $T_n$  die absolute Temperatur bei Normalbedingungen,  $T_n = 273 \text{ K}$
- $T_i$  die absolute Raumlufttemperatur
- $T_e$  die absolute Aussenlufttemperatur
- $\rho_n$  die Dichte der Luft bei Normalbedingungen,  $\rho_n = 1.276 \text{ kg/m}^3$

Die mitgeführte Wasserdampfmenge im Winterhalbjahr wird mit Gleichung G 9 berechnet:

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{V} \cdot \phi \cdot x_s \cdot \rho_i$$

Mit:

- $\dot{m}_{H_2O}$  die Massenstromdichte des Wassers in  $kg/h$
- $\phi$  die relative Feuchte der Raumluft
- $x_s$  den Wasserdampfgehalt gesättigter Luft in  $g/kg$

Mit einer Raumlufttemperatur von  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , dem Monatsmittelwert der relativen Raumluftfeuchte und einer Dichte der trockenen Raumluft von  $\rho_i = 1.189 \text{ kg/m}^3$  ergibt sich die Wassermenge, die pro Stunde in die Konstruktion gelangt. Der Wasserdampfgehalt wird mit  $x_s = 15.28 \text{ g/kg}$  (für  $400 \text{ m ü. M.}$ ) angenommen. Die Aussenlufttemperaturen der Monate Oktober bis März werden als Monatsmittelwerte aus SIA Merkblatt 2028:2010 entnommen.

In WUFI 2D wird das Innenklima basierend auf dem Aussenklima nach einem einfachen Modell gemäss EN 15026:2007 abgeleitet. Um die mittlere relative Feuchte der Raumluft  $\Phi$  der Monate Oktober bis April zu erhalten, wird das Innenklima exportiert und anschliessend Monatsmittelwerte gebildet. In Abhängigkeit der Mittelwerte der relativen Raumluftfeuchte  $\Phi$  und ausgehend von  $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  werden die mittleren Taupunkttemperaturen  $T_d$  in  $^\circ\text{C}$  gemäss Gleichung G 10 berechnet:

$$T_d(\Phi, T_i) = \frac{241.2 \cdot \ln\left(\frac{\Phi}{100\%}\right) + \frac{4222.03716 \cdot T_i}{241.2 + T_i}}{17.5043 - \ln\left(\frac{\Phi}{100\%}\right) - \frac{17.5043 \cdot T_i}{241.2 + T_i}}$$

G 10

Beim Durchströmen der feuchtwarmen Raumluft von innen nach aussen durch die Fuge fliesst diese in der kalten Jahreszeit an immer kälteren Bauteiloberflächen vorbei. Zum Tauwasserausfall in der Fuge kommt es nur dann, wenn die Oberflächentemperaturen der Fugenwände die Taupunkttemperatur der Luft unterschreiten.

Auf Grundlage der Taupunkttemperaturen wird monatsweise die Anzahl an Stunden ermittelt, in welchen eine Taupunktunterschreitung stattfindet und somit Kondensat anfällt. Es wird davon ausgegangen, dass das Kondensat in der äusseren Hälfte der Fuge ausfällt. Daher werden die Stundenwerte der Temperaturen der äusseren Hälfte der Fuge der Monate Oktober bis März in WUFI 2D simuliert und exportiert.

Analog zur Schlagregenquelle wird auch der Feuchteeintrag durch Konvektion über Eingabe einer Quelle in der Simulation berücksichtigt (vgl. Bild B 14). Die Quellstärke wird zunächst auf Basis von Messungen der Fugendurchlässigkeit zur Ermittlung des  $a_F$ -Wertes an einer Bestandswand eines historischen Holzgebäudes in Ausserbinn festgelegt. Da sich zunächst unrealistisch hohe Holzfeuchten in der Fuge ergaben, wurde die Stärke der Konvektionsquelle sukzessive reduziert, bis die Feuchtegehalte der Bestandswand in einem realistischen Bereich lagen. Bei einem Fugendurchlasskoeffizienten von  $a_F = 0.0018 \text{ m}^2/(Pa \cdot h)$  stellen sich realistische Feuchtegehalte im Wandbauteil ein.

G 9

**Beispiel Sanierte Wände: Lastfälle der Wasserbelastung**  
Die sanierten Massivholzwände werden im Wesentlichen durch flüssiges Wasser aus drei Quellen belastet:

1. Schlagregen über die Aussenfläche der Holzbalken
2. Schlagregen über die Fugen zwischen den Holzbalken
3. Tauwasser am Übergang Bestandswand/Innendämmsystem durch Infiltration feuchtwarmer Raumluft

#### Schlagregenbelastung der Wandfläche

Bei den sanierten Bauteilen wird wie bei der Bestandskonstruktion ebenfalls mit einer Schlagregenbelastung gemäss Bauteiltyp und Neigung, wie in WUFI vorgegeben, gerechnet. Das bedeutet wie im vorhergehenden Abschnitt näher beschrieben, dass 70 % des auftreffenden Schlagregens an der Wandfläche anhaften und so von der Konstruktion aufgenommen werden können.

#### Schlagregenbelastung der Fugen

Wie bei den Bestandswänden wird auch bei den sanierten Wänden angenommen, dass 1 % des auftreffenden Schlagregens in die Fugen gelangt. Die Eingabe der Feuchtequelle erfolgt analog zu Bild B 15.

#### Tauwasserbelastung durch Infiltration

Um beurteilen zu können, ob eine dünne Lehmputzschicht als Luftdichtheitsebene fungieren kann, wurden Fugendurchlässigkeitsmessungen an einer Bestandswand mit einer 3 mm starken Lehmputzschicht durchgeführt. Es konnte messtechnisch kein Luftdurchgang durch die Wand festgestellt werden.

Auch wenn die flächige Bestandswand inklusive Lehmputz bzw. SIGA Majvest als luftdicht bezeichnet werden kann, kann ein Feuchteeintrag in die Konstruktion aufgrund von kleineren unvermeidbaren Undichtigkeiten nicht ausgeschlossen wer-

den. Um diese in der Simulation berücksichtigen zu können, wird eine sogenannte Infiltrationsquelle eingegeben. Dabei wird das sogenannte «Luftinfiltrationsmodell IBP» des Fraunhofer Instituts für Bauphysik dem «Leitfaden zur Verwendung der Infiltrationsquelle in WUFI®» des Fraunhofer Instituts für Bauphysik IBP herangezogen. Dieser basiert auf einer Forschungsarbeit von Zirkelbach et al., 2009 .

Das Modell berücksichtigt die in Abhängigkeit der Luftdichtheit der Gebäudehülle konvektiv in die Konstruktion eindringende Feuchtemenge. Die Feuchtequelle wird dabei in die äussersten 5 mm der Wärmedämmung, also direkt vor die Lehmputzschicht bzw. SIGA Majvest, gesetzt. Die Menge der im Winter eingebrachten Feuchte wird aus dem Überdruck aufgrund des thermischen Auftriebs, der Innenraumluftfeuchte und der Luftdichtheit der Gebäudehülle bestimmt. Folgende Werte werden dabei angenommen:

Luftsäule: 5 m (Annahme Innenraumhöhe für 2 Geschosse)  
Rel. Feuchte der Raumluft: «normale Feuchtelast + 5 %» nach EN 15026 / WTA 6-2  
Luftdichtheit: «Luftdichtheitsklasse C» mit  $q_{s0} = 5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  für Gebäude ohne Dichtheitsprüfung

Da das «Luftinfiltrationsmodell IBP» in WUFI 2D nicht integriert ist, wurden zunächst Berechnungen in WUFI Pro durchgeführt. Aus WUFI Pro wurde anschliessend die Quellstärke als ASCII-File exportiert. Um die für WUFI-2D richtige Einheit der Quellstärke zu erhalten, wurden die Werte mit der gewünschten Breite der Quelle der WUFI 2D-Berechnung in m multipliziert. Die so umgerechneten Daten können als Textfile in die WUFI 2D-Berechnung eingelesen werden. Wichtig dabei ist, dass die Lage der Quelle in WUFI Pro und WUFI 2D übereinstimmt. Abbildung 18 zeigt die Lage der Quelle im 2D Modell.

## Beispiel Steildachkonstruktion

Bei Steildächern mit Zwischensparrendämmung ohne Überdämmung der Sparren besteht ein erhöhtes Feuchteschadensrisiko. Daher werden Dachkonstruktionen für den Standort Ulrichen mittels eindimensionaler hygrothermischer Bauteilsimulation nachgewiesen. Dabei wird nur die Gefachebene simuliert. Ziel der Simulationen ist es herauszufinden, wieviel Überdämmung oberhalb der Sparren notwendig ist, um ein Aufweichen der oberen Schalung zu vermeiden.

### Geometrie und Materialkennwerten

Im Folgenden werden zwei Sanierungslösungen für Steildächer vorgestellt. Vorgängig zu den hygrothermischen Bauteilsimulationen werden Berechnungen der Wärmedurchgangskoeffizienten mit der Software Lesosai durchgeführt. Die Dämmstärken werden so gewählt, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich von  $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  liegen. Es wird angenommen, dass die Sparren  $10 \text{ cm}$  auf  $14 \text{ cm}$  sind und ein Sprungmass von  $60 \text{ cm}$  aufweisen. Es werden die Dämmstoffe:

- «Fisolan Dämmplatte» ( $0.036 \text{ W}/(\text{mK})$ ),
- «Gutex Thermoroom» ( $0.039 \text{ W}/(\text{mK})$ ),
- «Steico Universal» ( $0.05 \text{ W}/(\text{mK})$ ) und
- «Steico Zell» ( $0.034 \text{ W}/(\text{mK})$ )

verwendet, für welche Datensätze in der WUFI-Datenbank zur Verfügung stehen. Die Dämmstärke der Dachkonstruktionen wurde so bemessen, dass die Wärmedurchgangskoeffizienten im Bereich von  $0.17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  liegen. Dazu wurden vorgängig Berechnungen in Lesosai durchgeführt.

In Bild BXX sind die in WUFI Pro untersuchten Bauteilaufbauten aufgeführt. Es wird jeweils nur der Zwischensparrenbereich in WUFI Pro simuliert, da dieser als kritisch gilt. Die Ziegel sowie Hinterlüftungsebene dürfen weggelassen werden, sofern eine Anpassung der Oberflächenübergangskoeffizienten erfolgt (vgl. dazu «Weitere Randbedingungen und Einstellungen»).

### Klimarandbedingungen und kritische Orientierung

Die Simulation der sanierten Dachaufbauten erfolgt für den Standort Ulrichen mit dem vorherig beschriebenen Klimadatensatz des Jahres 2008. Bei der Simulation von Dachaufbauten ist die kritische Orientierung die Ausrichtung mit der geringsten Solareinstrahlung. In vorliegendem Fall ist dies die Nordausrichtung. Die Simulationen werden für diese durchgeführt.

### Lastfälle der Wasserbelastung

Bei den sanierten Dachaufbauten besteht ein Risiko, dass es aufgrund von unvermeidbaren Undichtigkeiten der Luftdichtheitsebene zur Tauwasserbelastung durch Infiltration kommt.

### Tauwasserbelastung durch Infiltration

Ein Feuchteeintrag in die Konstruktion aufgrund von kleineren unvermeidbaren Undichtigkeiten kann nicht ausgeschlossen werden. Um diese in der Simulation berücksichtigen zu können, wird, wie schon bei den Simulationsmodellen der

sanierten Aussenwände, eine sogenannte Infiltrationsquelle basierend auf dem «Luftinfiltrationsmodell IBP» eingegeben.

Das Modell berücksichtigt die in Abhängigkeit der Luftdichtheit der Gebäudehülle konvektiv in die Konstruktion eindringende Feuchtemenge. Die Feuchtequelle wird dabei in die inneren  $5 \text{ mm}$  der OSB-Platte gesetzt.

Die Menge der im Winter eingebrachten Feuchte wird aus dem Überdruck aufgrund des thermischen Auftriebs, der Innenraumluftfeuchte und der Luftdichtheit der Gebäudehülle bestimmt. Folgende Werte werden dabei angenommen:

- Luftsäule:  $5 \text{ m}$  (Annahme Innenraumhöhe für 2 Geschosse)
- Rel. Feuchte der Raumluft: «normale Feuchtelast +  $5 \%$ » nach EN w15026 / WTA 6-2
- Luftdichtheit: «Luftdichtheitsklasse C» mit  $q_{50} = 5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  für Gebäude ohne Dichtheitsprüfung

### Weitere Randbedingungen und Einstellungen

Im «Leitfaden zur Berechnung von geneigten Dächern» des Fraunhofer IBP wird das Vorgehen bei der Berechnung und Bewertung von geneigten Dächern mit flächig verlegter Dampfbremse erläutert. Die belüftete Ziegeleindeckung ist nicht Bestandteil der Simulationsmodelle. Sie wird in den Simulationen durch effektive Übergangparameter nach Kölsch direkt auf der Oberfläche des Unterdachs ersetzt. Gemäss Leitfaden bzw. Kölsch sind für vorliegende Dachkonstruktionen folgende Parameter anzuwenden:

**Wärmeübergangskoeffizient an der Aussenoberfläche**  
Üblicherweise kann von „normal belüftet“ ausgegangen werden. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $a_{k,e}$  ist mit  $19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  anzunehmen. Der Wert für die langewelligen Strahlungsanteile ist mit  $0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  anzugeben, da die Strahlung explizit berechnet wird.

### **sd-Wert an der Aussenoberfläche**

Es ist der Einbau einer saugfähigen Holzfaserplatte als Unterdeckplatte («STEICO universal») vorgesehen. Daher ist ein zusätzliche wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke ( $s_d$ -Wert) an der Aussenoberfläche von  $0.01 \text{ m}$  anzusetzen, um eine unrealistisch hohe Kondensatbildung auf der Unterdeckung zu vermeiden. Der zusätzliche  $s_d$ -Wert basiert auf Freilandmessungen des Fraunhofer IBP. Mit diesem werden verschiedene bauphysikalische Effekte kompensiert, die in Realität aufgrund der Ziegeleindeckung stattfinden. Im Simulationsmodell fehlt die Ziegeleindeckung jedoch. Nähere Informationen dazu sind in Kölsch (2017) in Abschnitt 8 zu finden.

### **Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl**

Die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl ist in Abhängigkeit von der Farbgebung der Eindeckung zu wählen und entsprechend Kölsch (2017) zu reduzieren. Es stehen Absorptionsgrade für rote, graue und dunkle Ziegel zur Verfügung. Graue Ziegel weisen einen Absorptionsgrad von  $a = 0.85$  auf. Für «normal belüftete» Dächer berechnet sich der effektive Absorptionsgrad  $a_e$  wie folgt:

$$a_e = a \cdot 0.9 = 0.85 \cdot 0.9 = 0.765$$

### Langwellige Strahlungsemissionszahl

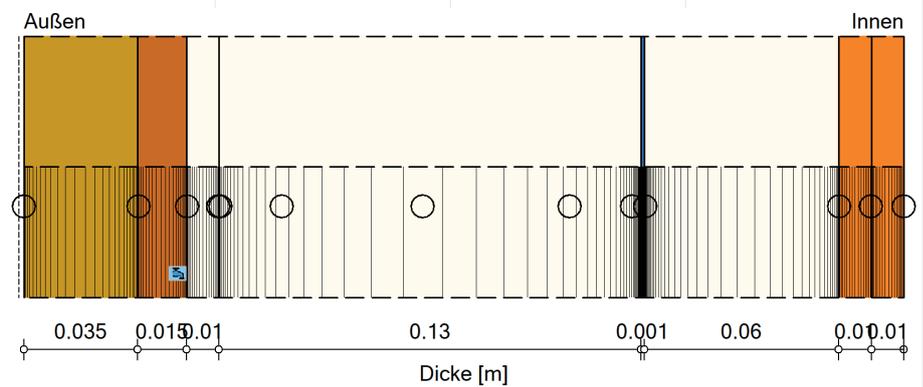
Die langwellige Strahlungsemission beträgt für eine Ziegeleindeckung 0.9. Die explizite Strahlungsbilanz ist bei Dächern aufgrund des großen Blickfeldes zum Himmel grundsätzlich einzuschalten, um die Unterkühlung infolge langwelliger Abstrahlung zu berücksichtigen.

### Anfangstemperatur und -feuchte

Als Voreinstellung sollte eine konstante relative Anfangsfeuchte von 80 % und eine Anfangstemperatur von 20 °C angesetzt werden, sofern keine erhöhte Einbaufeuchte für einzelne Schichten vorliegt.

### Anhaftender Anteil des Regens

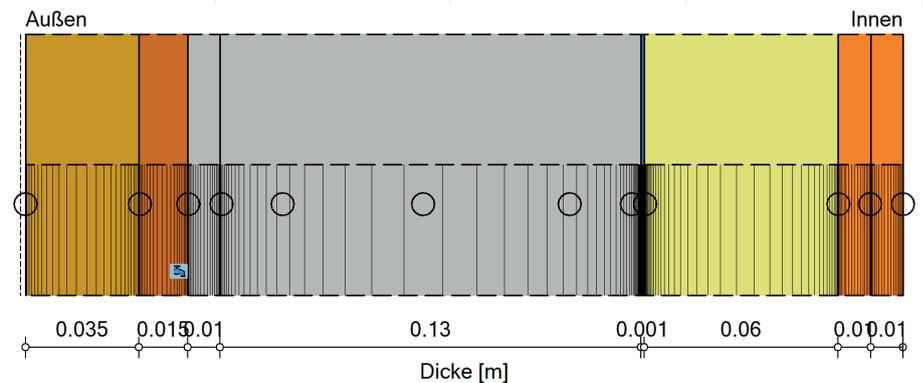
Da die Ziegeleindeckung auch den Niederschlag abhält, muss die Regenwasserabsorption ausgeschaltet werden (die Auswahl eines sd-Wertes an der Oberfläche beeinflusst ausschließlich das Diffusionsverhalten und nicht den Flüssigtransport).



○ - Monitorpositionen

💡/📡 - Position von Wärme-/Feuchte-Quellen/Senken

- STEICOuniversal
- OSB-Platte (Dichte: 630 kg/m<sup>3</sup>)
- Fisolan Dämmplatte\_Flüssigr. aus
- STEICOzell
- SIGA Majrex V1
- GUTEX Thermoroom CH
- Fichte radial



○ - Monitorpositionen

💡/📡 - Position von Wärme-/Feuchte-Quellen/Senken

### B 17 WUFI Berechnung «Sanierter Dachaufbau»

Oberes Bild : Sanierter Dachaufbau in WUFI mit Faserdämmung als Zwischensparrendämmung («Fisolan Dämmplatte») und unterhalb der Sparren («Fisolan Dämmplatte»), Holzfaserverplatte als Unterdeckplatte («STEICOuniversal», 35 mm) und feuchtevariabler Dampfbremse («SIGA Majrex»), wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke  $s_{d0} = 1.2 - 35$  m).

Unteres Bild: Sanierter Dachaufbau in WUFI mit Holzfasereinblasdämmung als Zwischensparrendämmung («STEICOzell») und Holzfaserdämmung unterhalb der Sparren («Gutex Thermoroom»), Holzfaserverplatte als Unterdeckplatte («STEICOuniversal», 35mm) und feuchtevariabler Dampfbremse («SIGA Majrex»), wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke  $s_{d0} = 1.2 - 35$  m).

Massgebende Beurteilungskriterien der sanierten Bauteile Um die hygrothermischen Simulationen auswerten zu können, werden kritische Bereiche definiert und Beurteilungskriterien für diese festgelegt. Die Simulationsergebnisse werden anschliessend anhand dieser ausgewertet. In diesem Leitfaden wird nur auf die Untersuchungsergebnisse der sanierten Wandbauteile sowie auf die Sanierungslösung des Daches eingegangen. In Wehle & Geyer (2022b) finden sich Beurteilungskriterien und Simulationsergebnisse des unsanierten Wandaufbaus.

#### Wand mit Innendämmung - IDS Schafwolle

Im folgenden werden kritische Bereiche und Beurteilungskriterien für das IDS Schafwolle aufgeführt und näher erörtert. In Bild B 19 sind die kritischen Bereiche für IDS Schafwolle aufgezeigt.

#### Kriterium 1: Anforderungen an den Wärmeschutz

Wie bereits beschrieben, liegt die Einzelbauteilanforderung bei  $U = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Diese wird zunächst als Zielwert definiert. Sofern die Wärmeschutzeigenschaften zu Gunsten des Feuchteschutzes reduziert werden müssen, so sollte versucht werden einen Wert von  $U = 0.28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  zu erreichen, damit der Systemnachweis eines Standardeinfamilien- bzw. Standardmehrfamilienhauses mit hoher Wahrscheinlichkeit erreicht werden kann. Sofern die Kriterien des Feuchteschutzes immer noch nicht eingehalten sind, muss die Dämmstoffdicke weiter reduziert werden.

Kriterium #1: Der Zielwert des Wärmeschutzes der sanierten Wand liegt bei  $U = 0.25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Falls der Feuchteschutz beim Zielwert nicht eingehalten wird, ist die Dämmstoffdicke zunächst so zu reduzieren, dass  $U = 0.28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  eingehalten wird. Falls der Feuchteschutz weiterhin nicht erfüllt wird, so ist die Dämmstoffdicke weiter zu reduzieren, bis alle Kriterien des Feuchteschutzes eingehalten werden.

#### Kriterium 2: Verlauf Gesamtwassergehalt

Der Gesamtwassergehalt des Wandaufbaus muss sich auf einen konstanten Wert einschwingen, damit ein kontinuierliches Aufweichen der Konstruktion ausgeschlossen werden kann. Der eingeschwungene Zustand sollte nach 10 oder maximal 15 Jahren erreicht werden. Der eingeschwungene Zustand gilt als erreicht, wenn der Anstieg des Gesamtwassergehalts am Ende des letzten Simulationsjahres kleiner als 1 %, bezogen auf das Ende des Vorjahres, ist.

Kriterium #2: Der Gesamtwassergehalt des Wandaufbaus muss innerhalb von maximal 15 Jahren einen eingeschwungenen Zustand erreichen. Der eingeschwungene Zustand gilt als erreicht, wenn der Anstieg des Gesamtwassergehalts am Ende des letzten Simulationsjahres kleiner als 1 %, bezogen auf das Ende des Vorjahres, ist.

#### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung äusserster Zentimeter

Im äussersten Zentimeter der Bestandswand fallen aufgrund von Meteoroneinflüssen hohe Feuchten an. Das Entstehen von holzerstörenden Pilzen soll vermieden werden. Holzzerstörende Pilze entwickeln sich bei dauerhaft hohen Holzfeuchten im Bereich der Fasersättigung. Dabei kann ein Pilzbefall auch in lokal begrenzten Bereichen auftreten.

Der Feuchtegehalt bei Fasersättigung beträgt bei den gebräuchlichen Nadelholzarten der gemässigten Klimazone lt. DIN 68800-1: 2019-06 etwa 30 %.

Gemäss WTA Merkblatt 6-8:2016 können die Bedingungen für den Abbau durch holzerstörende Pilze bei Vollholzbau- teilen für eine kritische Schicht von 10 mm über die relative Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur geprüft werden. Die relative Porenluftfeuchte im Massivholzprodukt darf 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30°C im Tagesmittel nicht überschreiten, vgl. Bild B 18. In begründeten Ausnahmefällen können einzelne kurzfristige Überschreitungen gemäss WTA Merkblatt 6-8 jedoch toleriert werden.

Kriterium #3: Die relative Porenluftfeuchte im äussersten Zentimeter darf 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C im Tagesmittel nicht überschreiten.

#### Kriterium 4: Holzabbau/Holzerstörung Fugenbereich (WUFI 2D)

Aufgrund von eindringenden Meteorwasser sowie Feuchte- eintrag über Konvektion wird das Holz im Bereich der äusseren Hälfte der Fugen als kritisch erachtet. Die Bewertung erfolgt analog zu Kriterium 3, wobei jedoch die Schicht- stärke von 10 mm um einige wenige Millimeter über- bzw. unterschritten wird.

Kriterium #4: Die relative Porenluftfeuchte im Bereich der äusseren Hälfte der Fuge darf 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C im Tagesmittel nicht überschreiten.

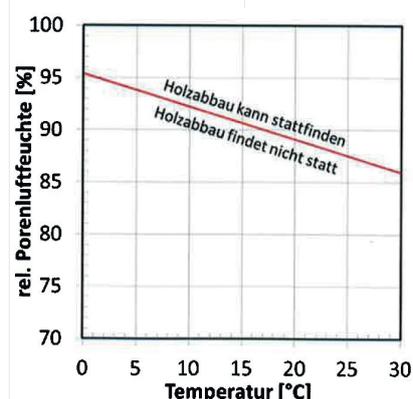
#### Kriterium 5: Holzabbau/Holzerstörung innerster Zentimeter

Aufgrund des IDS ändern sich die Temperatur- und Feuchte- verhältnisse im bestehenden Bauteil. Vor allem am Übergang zwischen Dämmung und Bestandswand besteht dadurch ein erhöhtes Feuchteschadensrisiko. Daher wird für den innersten Zentimeter der Bestandswand im sanierten Zustand ebenfalls die relative Porenluftfeuchte gemäss WTA Merkblatt 6-8 ausgewertet.

Kriterium #5: Die relative Porenluftfeuchte im innersten Zentimeter darf 95 % bei 0°C und 86 % bei 30 °C im Tagesmittel nicht überschreiten.

#### Kriterium 6: Frostscha den Lehmputz

Das WTA-Merkblatt 6-5:2014 empfiehlt, dass möglicherwei- se nicht frostbeständige Materialien einen Sättigungsgrad von 30 % (d. h. 30 % des maximalen Wassergehalts  $w_{max}$ ) nicht überschreiten sollten. Diesem Grenzwert liegt ein Si- cherheitsfaktor von 2 bezogen auf kritische Sättigungsgrade



B 18 Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte

Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur einer 10mm dicken Holzschicht, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf gemäss WTA Merkblatt 6-8:2016.

zugrunde. Höhere Sättigungsgrade sind zulässig, wenn die relative Feuchte der Porenluft unter 95 % bleibt. Damit sollen nach derzeitigem Kenntnisstand auch bei empfindlichen Materialien Frostschäden ausgeschlossen werden.

Ein kapillaraktiver Stoff in Kontakt mit Wasser kann so lange Wasser aufsaugen, bis er seine freie Sättigung  $w_f$  erreicht. Dieser Wassergehalt entspricht der Feuchtespeicherfunktion bei einer relativen Feuchte von 100 %. Wegen eingeschlossener Luftinseln ist er jedoch geringer als der durch die Porosität bestimmte maximale Wassergehalt  $w_{max}$ . Über  $w_f$  hinausgehende Wassergehalte können z. B. durch Kondensation im Temperaturgefälle erreicht werden. Der des maximalen Wassergehalts  $w_{max}$  kann aus der Porosität des zu untersuchenden Materials berechnet werden. Der in den Simulationen verwendete Lehmputz weist eine Porosität von 42 % auf. Diese wird mit  $1000 \text{ kg/m}^3$  (Dichte von Wasser) multipliziert.

$$w_{max} = 0.42 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Bei einem Sättigungsgrad (SG) von 30 % ergibt sich für den Lehmputz folgender Grenzwert des Wassergehaltes, der bei einem Frostereignis nicht überschritten werden darf:

$$SG_{30\%} = 0.30 \cdot 420 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 126 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Es wird konservativ davon ausgegangen, dass der Phasenübergang von flüssig zu fest des innerhalb der Baustoffporen gespeicherten Wassers bei  $0^\circ\text{C}$  stattfindet. In Realität kommt es aufgrund der auf das Wasser in den Poren wirkenden Saugspannung zu einer Gefrierpunktabenkung. Da jedoch keine Kenntnisse über das Porengefüge des in den Simulationen verwendeten Lehmputzes vorliegen, kann die genaue Frosttemperatur nicht berechnet werden.

Kriterium #6: Der Wassergehalt im Lehmputz darf bei Temperaturen des Lehmputzes unter  $0^\circ\text{C}$  den Grenzwert von  $126 \text{ kg/m}^3$  nicht überschreiten.

**Kriterium 7: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung**  
Um Formstabilität und Schimmelpilzfreiheit zu gewährleisten, sollte die Porenluftfeuchte im äussersten cm der Schafwollämmung einen Wert von 95% nicht übersteigen.

Kriterium #7: Die relative Feuchte darf im äussersten Zentimeter der Schafwollämmung 95 % nicht überschreiten.

**Kriterium 8: Schaden durch ablaufendes Wasser in Tauwasserebene der Dämmung**

Faserdämmstoffe aus Schafwolle, Steinwolle und Glasfasern weisen eine geringe Feuchtespeicherung auf. Daher ist Tauwasserbildung auf der Kaltseite der Dämmung bei Feuchteintrag über Diffusion möglich. Die Tauwassermenge sollte so begrenzt werden, dass kein Abfließen des Kondensats stattfindet.

Im Falle des Produktes Fisolan kann als Grenzwert, ab welchem ein Abfließen des Kondensats stattfindet, die gemessene Wasseraufnahme bei langfristigem Eintauchen nach DIN EN 12087:2013 herangezogen werden. Diese liegt bei  $8.41 \text{ Vol-\%}$  bzw.  $84.1 \text{ kg/m}^3$ .

Nachfolgend wird das Vorgehen der Tauwasserauswertung mit WUFI beschrieben:

1. Identifizierung der Tauwasserebene (relative Feuchte erreicht 100 %) mit Hilfe der WUFI-Filmdarstellung (WUFI 2D) oder WUFI-Schnellgraphiken (WUFI 1D)
2. Abtrennen einer 1 mm dicken Schicht im Bereich der Tauwasserebene
3. Neuberechnung
4. Auswertung der kritischen Schicht (Vergleich mit Grenzwert  $84.1 \text{ kg/m}^3$ )

Kriterium #8: In der Tauwasserebene der Dämmschicht darf in eine 1 mm dicke abgetrennten Schicht den Grenzwert von  $84.1 \text{ kg/m}^3$  nicht überschreiten.

**Kriterium 9: Schimmelpilzbildung Wandinnenseite**

Aus Kenntnis der Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Innenoberfläche lässt sich eine Aussage darüber treffen, wie hoch die Gefahr einer Schimmelbildung ist. Das Kriterium der Schimmelpilzfreiheit nach SIA 180:2014 verlangt, dass die Oberflächenfeuchte, d.h. die relative Feuchte der oberflächennahen Luftschicht, den Wert von 80 % nicht an mehr als während zweier aufeinanderfolgender Wochen pro Jahr übersteigt.

Damit Schimmelpilzsporen keimen können, müssen drei wesentliche Wachstumsvoraussetzungen, nämlich Temperatur, Feuchte und Nahrung, über eine bestimmte Zeitperiode simultan vorhanden sein. Dies kann durch eine instationäre Betrachtung der Schimmelpilzbildung überprüft werden. Dazu wird das Isoplethenmodell nach Sedlbauer (2001) verwendet.

Es wird zunächst ein Temperatur-Feuchte-Diagramm für die Innenoberfläche ausgegeben. In diesem sind Grenzisoplethen eingetragen, welche die minimalen Wachstumsvoraussetzungen für das auf Baumaterialien übliche Nährstoffangebot darstellen (Grenzkurven LIM I und LIM II). Bleiben die Temperatur- und Feuchteverhältnisse unterhalb dieser Kurven, so ist in der Regel nicht mit Schimmelpilzwachstum zu rechnen.

Sollten die Grenzkurven jedoch länger überschritten werden, so hängt das Risiko des Schimmelpilzwachstums von Dauer und Ausmass der Überschreitung ab. Eine Bewertung dieser komplexeren Verhältnisse ist mittels eines biohygrothermischen Modells möglich, welches den Feuchtegehalt in einer Modellspore und damit ihre Keim- und Wachstumsmöglichkeiten in Abhängigkeit von den mit WUFI ermittelten instationären Temperatur- und Feuchtebedingungen an der betreffenden Oberfläche ermittelt. Dieses Modell ist im Postprozessor WUFI-Bio in die WUFI-Software implementiert.

Simulationsvarianten, in welchen die Grenzisoplethen überschritten werden, werden demnach mit WUFI-Bio hinsichtlich Schimmelpilzwachstum überprüft.

Kriterium #9: Die Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Innenoberfläche müssen so sein, dass die Grenzisoplethen nach Möglichkeit nicht überschritten werden. Bei einem Überschreiten der Grenzisoplethen muss die Schimmelpilzfreiheit mittels WUFI-Bio nachgewiesen werden.

G 12

G 13

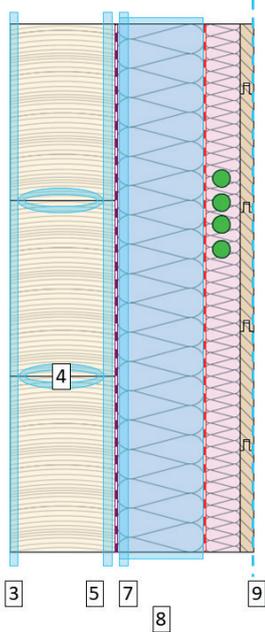
Wand mit Innendämmung - IDS Holzwole

Im folgenden werden kritische Bereiche und Beurteilungskriterien für das IDS Holzwole aufgeführt und näher erörtert. In Bild B 20 sind die kritischen Punkte für IDS Holzwole aufgezeigt. Die Kriterien zur Beurteilung des IDS mit Holzwole sind bis auf wenige Ausnahmen analog zu denen des IDS Schafwole. Kriterium 8 entfällt und Kriterium 7 ändert sich wie folgt:

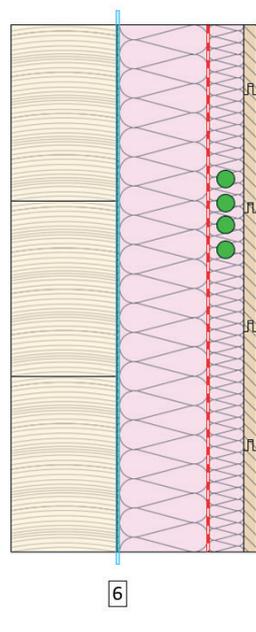
**Kriterium 7: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung**  
 Nach WTA Merkblatt 6-8 dürfen Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen in der Nutzungsklasse 2, in welcher die Holzfaserdämmung einzuordnen ist, eine maximale Materialfeuchte im Tagesmittelwert von 18 Massen-% nicht übersteigen. Eine vorübergehende Aufwechthung auf 20 Massen-% ist im ersten Jahr tolerierbar, sofern es innerhalb von 3 Monaten zu einer Rücktrocknung kommt und die entsprechenden Anforderungen der Gebrauchsklasse eingehalten werden.

Kriterium #7: Der Wassergehalt darf im äussersten Zentimeter der Holzfaserdämmung einen Wert von 18 M-% nicht übersteigen.

Aufbau Fisolan 14cm



Aufbau Fisolan Lehm 14cm



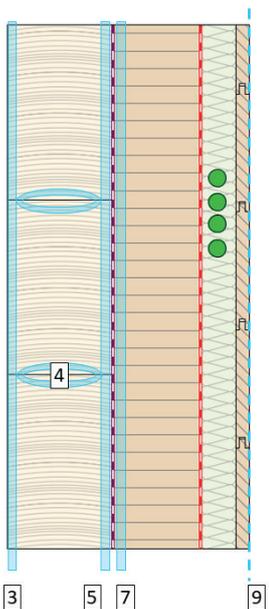
Weitere:  
 1 2

**B 19 Wand mit IDS Schafwole**

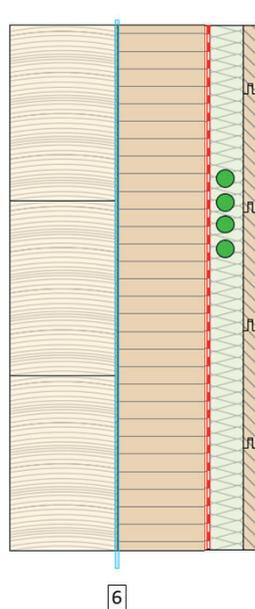
Lage der kritischen Bereiche der mit einem IDS aus Schafwole sanierten Wand. Dabei ist:

- 1 die Anforderung an den Wärmeschutz
- 2 der Verlauf des Gesamtwassergehalts
- 3 der äusserste Zentimeter der Bestandswand
- 4 der Fugenbereich
- 5 der innerste Zentimeter der Bestandswand
- 6 die Lehmputzschicht
- 7 der äusserste Zentimeter der Schafwollendämmung
- 8 der Tauwasserbereich innerhalb der Schafwollendämmung
- 9 die Wandinnenseite

Aufbau Gutex Thermoroom



Aufbau Gutex Thermoroom



Weitere:  
 1 2

**B 20 Wand mit IDS Holzwole**

Lage der kritischen Bereiche der mit einem IDS aus Holzwole sanierten Wand. Dabei ist:

- 1 die Anforderung an den Wärmeschutz
- 2 der Verlauf des Gesamtwassergehalts
- 3 der äusserste Zentimeter der Bestandswand
- 4 der Fugenbereich
- 5 der innerste Zentimeter der Bestandswand
- 6 die Lehmputzschicht
- 7 der äusserste Zentimeter der Schafwollendämmung
- 9 die Wandinnenseite.

## Steildach mit Zwischensparrendämmung - Schafwolle

Im folgenden werden kritische Bereiche und Beurteilungskriterien für die Zwischensparrendämmung mit Schafwolle aufgeführt und näher erörtert. In Bild B 21 sind die kritischen Bereiche des Dachaufbaus mit Schafwolle aufgeführt.

### **Kriterium 1: Anforderungen an den Wärmeschutz**

Es wird ein  $U = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$  angestrebt, um einen guten Wärmeschutz im Winter sowie Sommer zu erreichen. Die dazu nötige Dämmung soll möglichst zwischen und raumseitig der Sparren eingebracht werden. Die Überdämmung der Sparren wird möglichst gering gehalten, um First- und Traufhöhen möglichst wenig zu verändern durch die Sanierung.

Kriterium #1: Der Zielwert des Wärmeschutzes der sanierten Wand von  $U = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$  wird eingehalten.

### **Kriterium 2: Verlauf Gesamtwassergehalt**

Der Gesamtwassergehalt des Wandaufbaus darf nicht steigend sein, damit ein kontinuierliches Aufweichen der Konstruktion ausgeschlossen werden kann. Der eingeschwungene Zustand sollte nach 5 oder maximal 10 Jahren erreicht werden. Der eingeschwungene Zustand gilt als erreicht, wenn der Anstieg des Gesamtwassergehalts am Ende des letzten Simulationsjahres kleiner 1 % ist bezogen auf das Ende des Vorjahres.

Kriterium #2: Der Gesamtwassergehalt des Wandaufbaus muss innerhalb von maximal 10 Jahren einen eingeschwungenen Zustand erreichen. Der eingeschwungene Zustand gilt als erreicht, wenn der Anstieg des Gesamtwassergehalts am Ende des letzten Simulationsjahres kleiner 1 % ist bezogen auf das Ende des Vorjahres.

### **Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung innerer Zentimeter Holzschalung**

Nach WTA Merkblatt 6-8 dürfen Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffe eine maximale Materialfeuchte im Tagesmittelwert von 18 Massen-% nicht übersteigen. Eine vorübergehende Aufweitung auf 20 Massen-% ist im ersten Jahr tolerierbar, sofern es innerhalb von 3 Monaten zu einer Rücktrocknung kommt und die entsprechenden Anforderungen der Gebrauchsklasse eingehalten werden.

Kriterium #3: Der Wassergehalt der inneren 10 mm der Holzschalung darf 18 M-% nicht überschreiten.

### **Kriterium 4: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung**

Um Formstabilität und Schimmelpilzfreiheit zu gewährleisten, sollte die Porenluftfeuchte im äussersten cm der Schafwollämmung einen Wert von 95 % nicht übersteigen.

Kriterium #4: Die relative Feuchte darf im äussersten Zentimeter der Schafwollämmung 95 % nicht überschreiten.

### **Kriterium 5: Schaden durch ablaufendes Wasser in Tauwasserebene der Dämmung**

Faserdämmstoffe aus Schafwolle, Steinwolle und Glasfasern weisen eine geringe Feuchtespeicherung auf. Daher ist Tauwasserbildung auf der Kaltseite der Dämmung bei Feuchteintrag über Diffusion möglich. Die Tauwassermenge sollte so begrenzt werden, dass kein Abfließen des Kondensats stattfindet.

Im Falle des Produktes Fisolan kann als Grenzwert, ab welchem ein Abfließen des Kondensats stattfindet, die gemessene Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen nach DIN EN 12087:2013 herangezogen werden. Diese liegt bei 8.41 Vol-% bzw. 84.1 kg/m<sup>3</sup>.

Nachfolgend wird das Vorgehen der Tauwasserauswertung mit WUFI beschrieben:

1. Identifizierung der Tauwasserebene (relative Feuchte erreicht 100 %) mit Hilfe der WUFI-Filmdarstellung (WUFI 2D) oder WUFI-Schnellgraphiken (WUFI 1D)
2. Abtrennen einer 1 mm dicken Schicht im Bereich der Tauwasserebene
3. Neuberechnung
4. Auswertung der kritischen Schicht (Vergleich mit Grenzwert 84.1 kg/m<sup>3</sup>)

Kriterium #5: In der Tauwasserebene der Dämmschicht darf in eine 1 mm dicke abgetrennten Schicht den Grenzwert von 84.1 kg/m<sup>3</sup> nicht überschreiten.

## Steildach mit Zwischensparrendämmung - Holzfaser

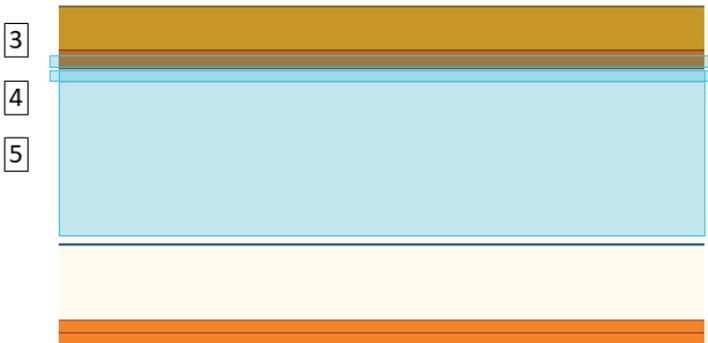
Im folgenden werden kritische Bereiche und Beurteilungskriterien für die Zwischensparrendämmung mit Holzfaser aufgeführt und näher erörtert. In Bild B 22 sind die kritischen Bereiche des Dachaufbaus mit Holzfaser aufgeführt.

Die Kriterien zur Beurteilung der Dachkonstruktion mit Holzfaser sind bis auf wenige Ausnahmen analog zu denen der Dachkonstruktion mit Schafwolle. Kriterium 5 entfällt und Kriterium 4 ändert sich.

### **Kriterium 4: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung**

Nach WTA Merkblatt 6-8 dürfen Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen eine maximale Materialfeuchte im Tagesmittelwert von 18 Massen-% nicht übersteigen. Eine vorübergehende Aufweitung auf 20 Massen-% ist im ersten Jahr tolerierbar, sofern es innerhalb von 3 Monaten zu einer Rücktrocknung kommt und die entsprechenden Anforderungen der Gebrauchsklasse eingehalten werden.

Kriterium #4: Der Wassergehalt darf im äussersten Zentimeter der Holzfaserdämmung einen Wert von 18 M-% nicht übersteigen.



**B 21 Steildach mit Schafwolle**  
 Lage der kritischen Bereiche der Dachkonstruktion mit Schafwolle. Dabei ist:

- 1 die Anforderung an den Wärmeschutz,
- 2 der Verlauf des Gesamtwassergehalts,
- 3 der äusserste Zentimeter der Holzschalung,
- 4 der äusserste Zentimeter der Schafwollendämmung
- 5 der Tauwasserbereich innerhalb der Schafwollendämmung

Weitere:

- 1
- 2



**B 22 Steildach mit Holzfaserdämmung**  
 Lage der kritischen Bereiche der Dachkonstruktion mit Holzfaserdämmung. Dabei ist:

- 1 die Anforderung an den Wärmeschutz
- 2 der Verlauf des Gesamtwassergehalts
- 3 der äusserste Zentimeter der Holzschalung
- 4 der äusserste Zentimeter der Holzfaserdämmung

Weitere:

- 1
- 2

## 7.3 Nachgewiesene Konstruktionen historischer Holzgebäude

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Simulationen der sanierten Bauteile aufgeführt, welche anhand der zuvor genannten Kriterien beurteilt wurden.

### Aussenwand mit Innendämmung

Bei den sanierten Wänden wurde ein Innendämmsystem mit Schafwolle und ein Innendämmsystem mit Holzfaser in WUFI 2D simuliert. Dabei wurden unterschiedliche Varianten berücksichtigt.

### Untersuchte Varianten

Um Schäden an den Fugen ausschliessen zu können, wurden zweidimensionale Simulationen durchgeführt. In Tabelle T16 bis Tabelle T17 sind die wichtigsten Angaben zu den gewählten Randbedingungen der zweidimensionalen Simulationen der sanierten Wände zusammengefasst. Bild B 15 zeigt den prinzipiellen Aufbau der simulierten Bauteile.

In WUFI 2D kann die Himmelsausrichtung auf das Grad genau eingegeben werden. Die sanierten Wände werden gemäss den vorherig genannten kritischen Wandausrichtungen simuliert.

Bei den Sanierungslösungen mit Holzfaser werden analog zu den jeweils kritischsten Varianten der Sanierungslösungen mit Schafwolle nur Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF1.3» und mit ONO-Ausrichtung, 5 % höherer Feuchtelast und Infiltrationsquelle simuliert.

T 16 Angaben zu Bauteilaufbau, Anfangsbedingungen, betrachteter Dimension und Anzahl der Simulationsjahre der untersuchten zweidimensionalen Varianten der sanierten Wände. «S» steht für Varianten mit Schafwolle, «HF» für Varianten mit Holzfaser.

Bezeichnung	Bauteilaufbau	Anfangsbedingungen	Dimension - Anzahl Jahre
2D_S1.0	Bestandswand / Lehmputz / 90 mm (Gefach) + 40mm (Installationsebene) Dämmung / SIGA Majrex/ Holzverschalung	20°C/70%; über Bauteil konstant	2D
2D_S1.1			
2D_S1.2			
2D_S1.3	Bestandswand / Lehmputz / 90 mm (Gefach) + 40mm (Installationsebene) Dämmung / SIGA Majrex/ Holzverschalung	20°C/73%; über Bauteil konstant	-
2D_S2.3	Bestandswand / SIGA Majvest / 90 mm (Gefach) + 40mm (Installationsebene) Dämmung / SIGA Majrex/ Holzverschalung		5 Jahre (01.10.2021– 30.09.2026)
2D_HF1.3	Bestandswand / Lehmputz / 90 mm (Gefach) + 40mm (Installationsebene) Dämmung / SIGA Majrex/ Holzverschalung		
2D_HF2.3	Bestandswand / SIGA Majvest / 90 mm (Gefach) + 40mm (Installationsebene) Dämmung / SIGA Majrex/ Holzverschalung		

T 17 Angaben zu Ausrichtung, Anzahl Simulationsjahren, Klimarandbedingungen und verwendeten Feuchtequellen der untersuchten zweidimensionalen Varianten der sanierten Wände. «S» steht für Varianten mit Schafwolle, «HF» für Varianten mit Holzfaser.

Bezeichnung	Ausrichtung	Aussenklima	Innenklima	Konvektionsquelle	Schlagregenquelle	Infiltrationsquelle
2D_S1.0	West-Südwest WSW (68°)	Ulrichen (2008)	EN 15026 / WTA 6-2 Feuchtelast normal	keine	1% des auftreffenden Schlagregens	keine
2D_S1.1	Nord N (180°)					
2D_S1.2	Ost-Nordost ONO (248°)					
2D_S1.3	Ost-Nordost ONO (248°)		EN 15026 / WTA 6-2 Feuchtelast normal + 5%			5 m Luftsäule, Luftdichtigkeits- klasse C
2D_S2.3	Ost-Nordost ONO (248°)					
2D_HF1.3	Ost-Nordost ONO (248°)					
2D_HF2.3	Ost-Nordost ONO (248°)					

Nachweis Schafwolleddämmung

**Kriterium 1: Anforderungen an den Wärmeschutz**

Die Dämmstärke der sanierten Wände werden so gewählt, dass die Einzelbauteilanforderungen des Kanton Wallis mit  $U = 0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  eingehalten werden. Der Bauteilaufbau entspricht Bild B15.

Kriterium #1: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT /  
Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

**Kriterium 2: Verlauf Gesamtwassergehalt**

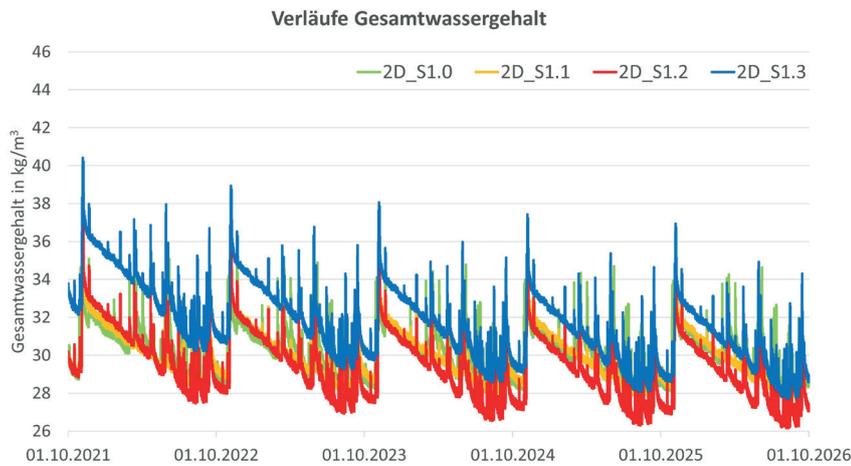
Die Verläufe der Gesamtwassergehalte sind fallend, wie in Bild B 23 und B 24 ersichtlich ist. In Tabelle T1 8 ist die Änderung der Gesamtwassergehalte am jeweils letzten Tag des letzten Simulationsjahres gegenüber denen des letzten Tages des vorletzten Simulationsjahres aufgeführt. Die Änderung der Gesamtwassergehalte ist in allen Varianten kleiner als 1 %.

Kriterium #2: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT /  
Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

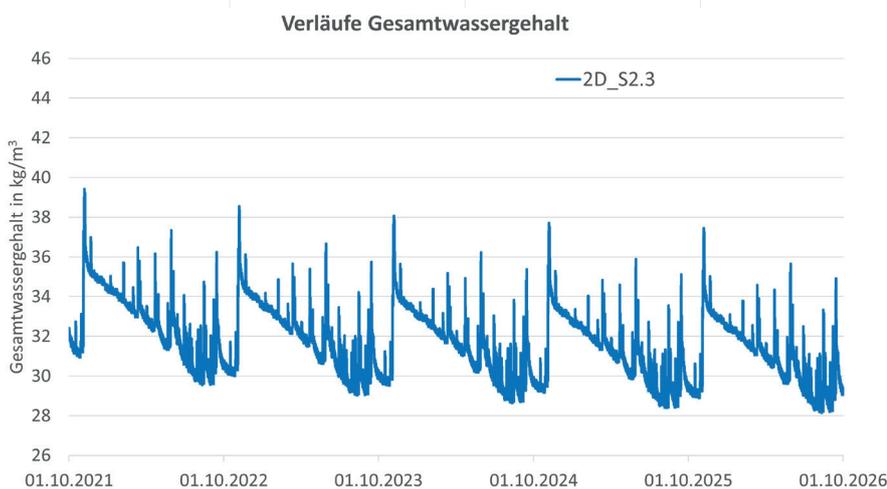
T18 Änderung des Gesamtwassergehalts in % der untersuchten Varianten der Bestandwand.

Bezeichnung	Gesamtwassergehalt 01.10.2025. 00:00:00	Gesamtwassergehalt 01.10.2026. 00:00:00	Änderung Δ
2D_S1.0	28.77 kg/m <sup>3</sup>	28.64 kg/m <sup>3</sup>	-0.43 %
2D_S1.1	29.01 kg/m <sup>3</sup>	28.83 kg/m <sup>3</sup>	-0.61 %
2D_S1.2	27.54 kg/m <sup>3</sup>	27.29 kg/m <sup>3</sup>	-0.90 %
2D_S1.3	29.4 kg/m <sup>3</sup>	29.1 kg/m <sup>3</sup>	-0.97 %
2D_S2.3	29.6 kg/m <sup>3</sup>	29.3 kg/m <sup>3</sup>	-0.95 %

40



B 23 Gesamtwassergehalt Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3»



B 24 Gesamtwassergehalt Variante «2D\_S2.3».

### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung äusserster Zentimeter

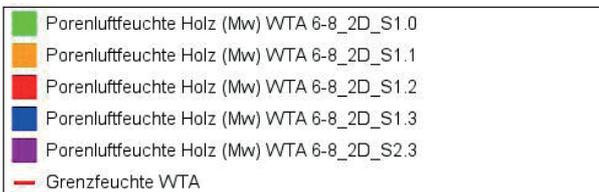
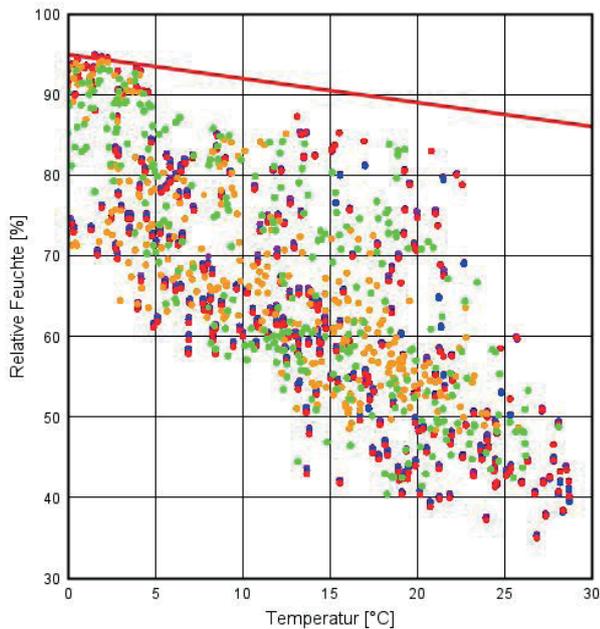
Bei der Beurteilung des äussersten Zentimeters der Bestandswand liegen nur bei Variante «2D\_S1.0» alle Tagesmittelwerte unterhalb der Grenzkurve für die relative Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur gemäss WTA Merkblatt 6-8.

Wie in Abbildung 29 ersichtlich liegen bei Variante «2D\_S1.1» 2 Tagesmittelwerte auf und bei den Varianten «2D\_S1.2», «2D\_S1.3» und «2D\_S2.3» jeweils 4 Tagesmittelwerte knapp oberhalb der Grenzkurve des Auswertebereichs von 95% bei 0°C und 86% bei 30°C. Eine Überschreitung der Grenzkurve ist nur in begründeten Fällen zulässig.

Die Überschreitungen treten bei tiefen Temperaturen unterhalb von 3°C auf. Die optimalen Temperaturbedingungen für das Wachstum von holzerstörenden Organismen liegen bei 18-31°C. Aufgrund der geringen Anzahl an Überschreitungen und zudem niedrigen Temperaturen im Holz an Tagen mit Überschreitungen, scheint das Risiko eines Holzabbaus im ersten Zentimeter der sanierten Bestandswand durch holzerstörenden Organismen gering zu sein. Aus diesem Grund wird Kriterium 3 als erfüllt betrachtet.

Kriterium #3: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT / Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

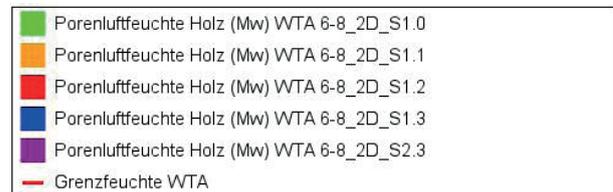
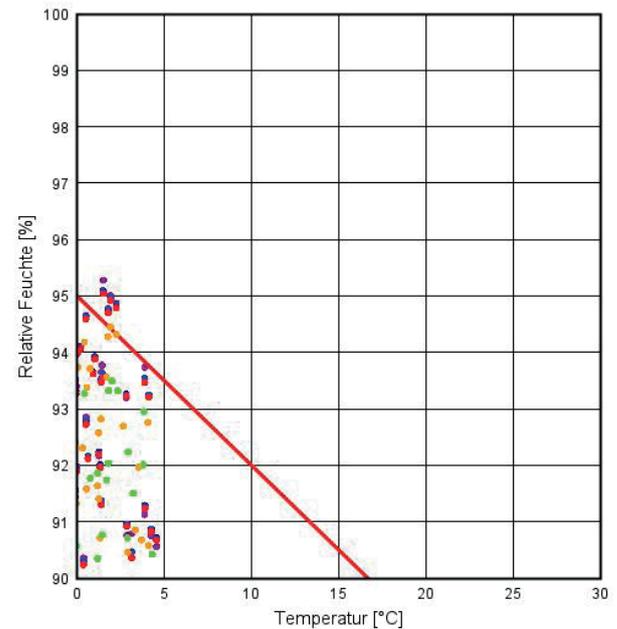
### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung\_äusserster cm Bestandswand



B 25 Auswertung aller Porenluftfeuchten der Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3» sowie der Variante «2D\_S2.3» im äussersten Zentimeter der sanierten Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung\_äusserster cm Bestandswand



B 26 Auswertung der hohen Porenluftfeuchten ab 90 % der Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3» sowie der Variante «2D\_S2.3» im äussersten Zentimeter der sanierten Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

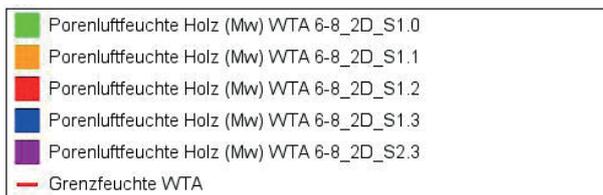
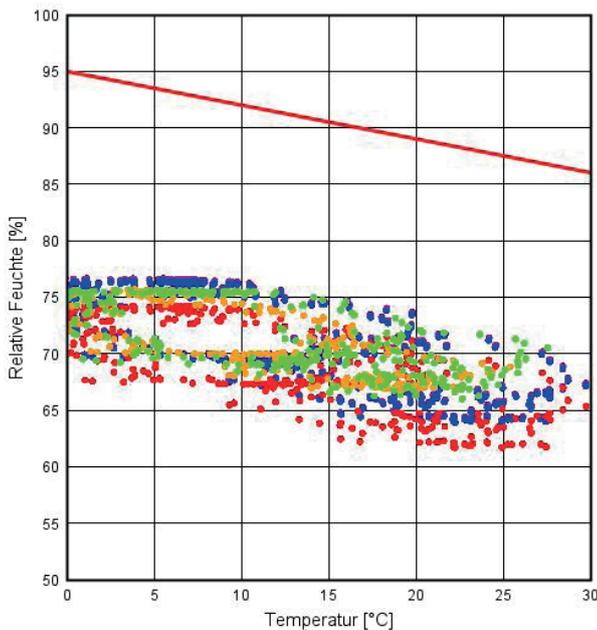
Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

#### Kriterium 4: Holzabbau/Holzerstörung Fugenbereich

Nachfolgende Abbildung zeigt die Auswertung der relativen Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur des kritischen Bereichs um die äussere Hälfte der Fuge. Alle fünf untersuchten Varianten halten die Anforderungen nach WTA Merkblatt 6-8 ein. Das Feuchteniveau ist in allen Varianten ähnlich hoch. Die nach Norden ausgerichteten Wände der Varianten «2D\_S1.3» bzw. «2D\_S2.3» weisen vermutlich aufgrund der verminderten Schlagregenbelastung vor allem bei mittleren und hohen Temperaturen etwas geringere Feuchten als die übrigen Varianten auf.

Kriterium #4: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT / Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

#### Kriterium 4: Holzabbau/Holzerstörung: \_Bereich um Fugen aussen



B 27 Auswertung der Porenluftfeuchte der Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3» sowie der Variante «2D\_S2.3» im Bereich der äusseren Hälfte der Fuge der Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

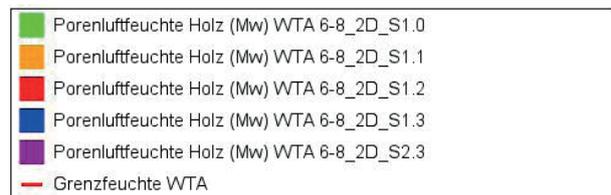
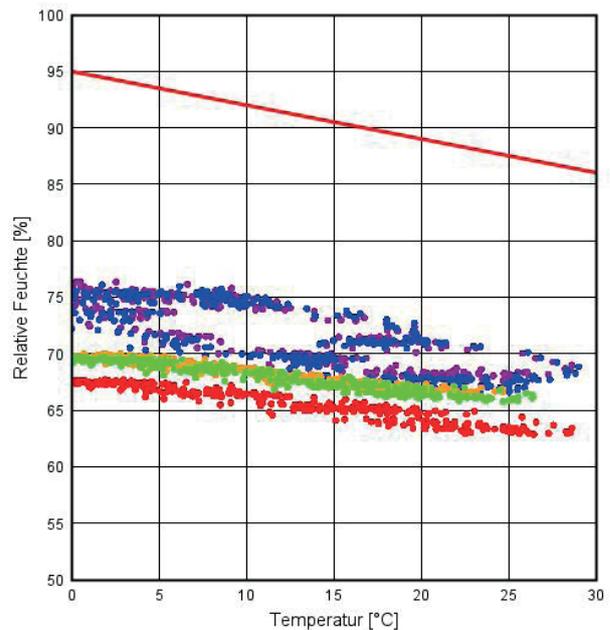
#### Kriterium 5: Holzabbau/Holzerstörung innerster Zentimeter

Nachfolgende Abbildung zeigt die Auswertung der relativen Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur des innersten Zentimeters der Bestandswand. Alle fünf untersuchten Varianten halten die Anforderungen nach WTA Merkblatt 6-8 ein. Die Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1» und «2D\_S1.2» liegen nahe bei einander, wobei die Nordausrichtung das höchste Feuchteniveau aufweist.

In Variante «2D\_S1.3» bzw. «2D\_S2.3» sieht man deutlich den Einfluss der um 5 % höheren relativen Raumlufffeuchte sowie der Infiltrationsquelle. Diese führen zu ca. 10 % höheren Porenluftfeuchten im innersten Zentimeter der Bestandswand.

Kriterium #5: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT / Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

#### Kriterium 5: Holzabbau/Holzerstörung: \_innerster cm Bestandswand



B 28 Auswertung der Porenluftfeuchte der Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3» sowie der Variante «2D\_S2.3» im innersten Zentimeter der Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

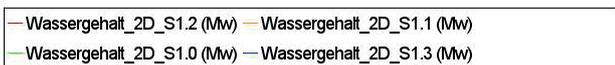
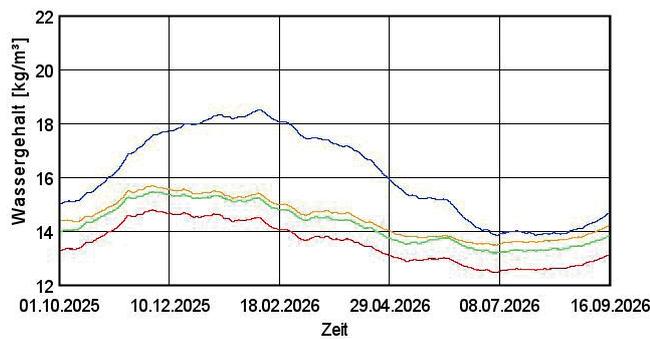
### Kriterium 6: Frostschaden Lehmputz

Aus Abbildung 32 ist ersichtlich, dass der obere Grenzwert des Wassergehaltes von 126 kg/m<sup>3</sup> stets eingehalten wird. In den Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1» und «2D\_S1.2» liegt der Wassergehalt unter 16 kg/m<sup>3</sup>. In Variante «2D\_S1.3 steigt der Wassergehalt bis ca. 19 kg/m<sup>3</sup> an.

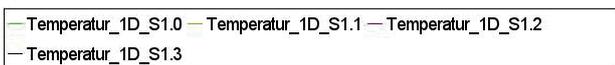
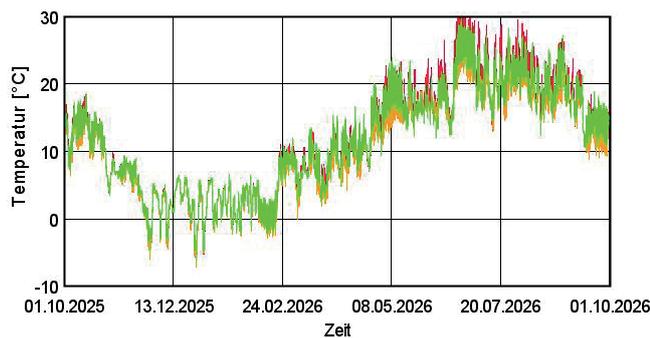
In den Monaten Dezember bis Februar liegen die Temperaturen in der Lehmputzschicht immer wieder unterhalb von 0 °C.

Kriterium #6: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT

### Kriterium 6: Frostschaden Lehmputz



### Temperatur in Lehmputzschicht



B 29 Auswertung des Wassergehalts (oben) sowie der Temperaturen der Varianten «1D\_S1.0», «1D\_S1.1», «1D\_S1.2» und «1D\_S1.3» in der Lehmputzschicht.

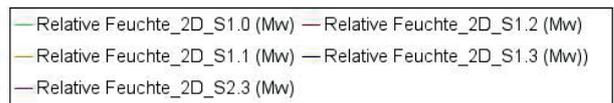
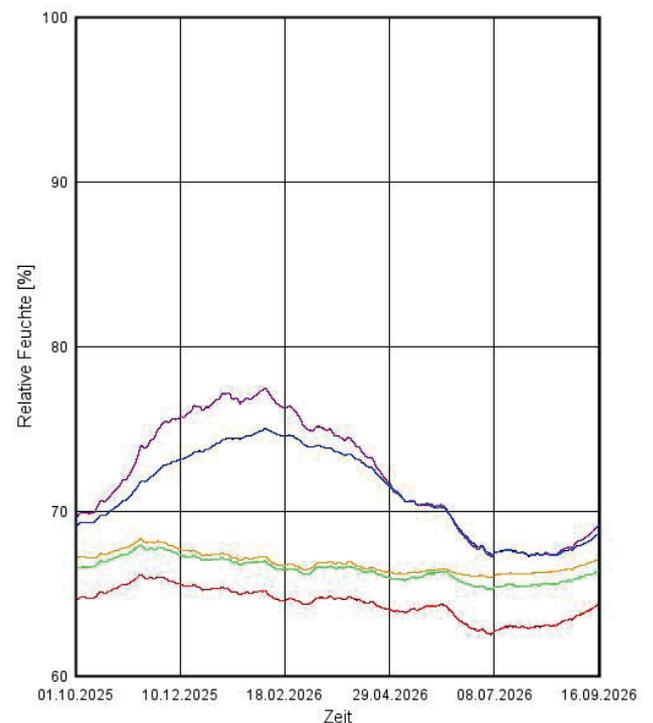
Die Wassergehalte sind als gleitendes zeitliches Mittel dargestellt. Der Auswertzeitraum ist der 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Kriterium 7: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung

Aus nachfolgender Abbildung ist ersichtlich, dass der obere Grenzwert der relativen Feuchte von 95 % stets eingehalten wird. In den Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1» und «2D\_S1.2» liegt die relative Feuchte unter 70 %. In Variante «2D\_S1.3 steigt diese bis ca. 83 % an. In Variante «2D\_S2.3 steigt relative Feuchte bis ca. 88 % an.

Kriterium #7: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT /  
Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

### Kriterium 7: Schaden an Wärmedämmung\_äusserster cm



B 30 Auswertung der relativen Feuchte der Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3» bzw. der Variante «2D\_S2.3» im äussersten Zentimeter der Wärmedämmung.

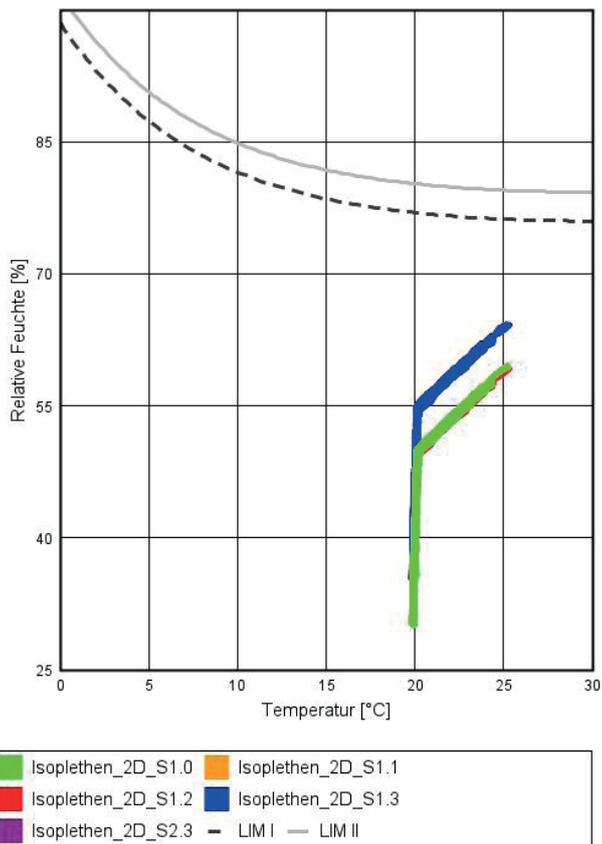
Dargestellt ist das gleitende Zeitliche Mittel des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Kriterium 9: Schimmelpilzrisiko Wandinnenseite

In allen untersuchten Varianten besteht kein Risiko hinsichtlich Schimmelpilzwachstum auf der Wandinnenseite. Das Temperatur-Feuchte-Diagramm für die Innenoberfläche in Abbildung 41 zeigt, dass die Grensisoplethen LIM I und LIM II nicht überschritten werden. Es stellen sich relative Feuchten von ca. 30 – 60 % (Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1» und «2D\_S1.2») bzw. 65 % (Varianten «2D\_S1.3» und «2D\_S2.3») und Temperaturen von ca. 18 - 26°C ein.

Kriterium #9: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT /  
Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

### Kriterium 9: Schimmelpilzfreiheit Innenoberfläche\_Variante Lehmputz



B 31 Auswertung der Isoplethen der Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3» sowie der Variante «2D\_S2.3».

Dargestellt sind die stündlichen Werte der relativen Feuchten bezogen auf die jeweilige Temperatur des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

## Nachweis Holzfaserdämmung

### Kriterium 1: Anforderungen an den Wärmeschutz

Die Dämmstärke der sanierten Wände werden so gewählt, dass die Einzelbauteilanforderungen des Kanton Wallis mit  $U = 0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingehalten werden. Der Bauteilaufbau entspricht Bild B15.

Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT /

Varianten mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

### Kriterium 2: Verlauf Gesamtwassergehalt

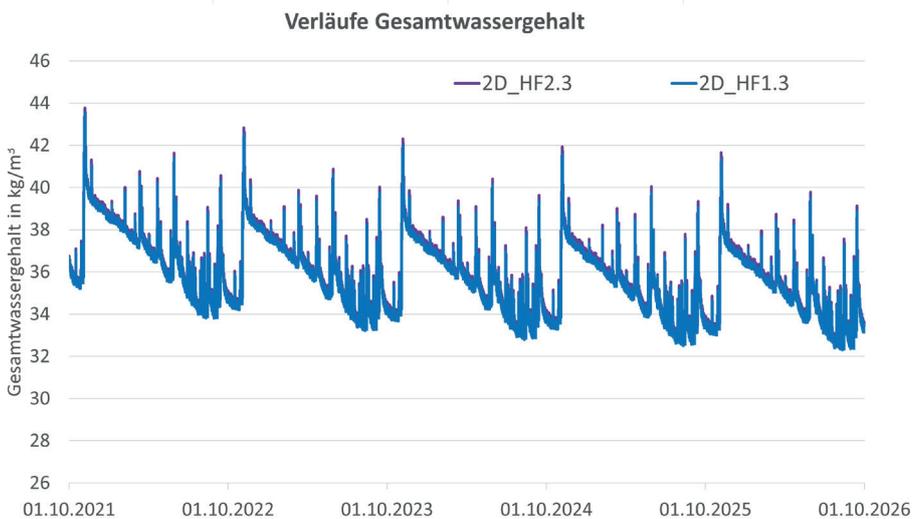
Die Verläufe der Gesamtwassergehalte sind fallend, wie in Bild B 32 ersichtlich ist. In Tabelle T 19 ist die Änderung der Gesamtwassergehalte am jeweils letzten Tag des letzten Simulationsjahres gegenüber denen des letzten Tages des vorletzten Simulationsjahres aufgeführt. Die Änderung der Gesamtwassergehalte ist in allen Varianten kleiner als 1 %.

Kriterium #2: Varianten mit Lehmputz: ERFÜLLT / Varianten mit

2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

T 19 Änderung des Gesamtwassergehalts in % der untersuchten Varianten der Bestandswand.

Bezeichnung	Gesamtwassergehalt 01.10.2025. 00:00:00	Gesamtwassergehalt 01.10.2026. 00:00:00	Änderung $\Delta$
2D_HF1.3	33.8 kg/m <sup>3</sup>	33.5 kg/m <sup>3</sup>	-0.89 %
2D_HF2.3	33.7 kg/m <sup>3</sup>	33.4 kg/m <sup>3</sup>	-0.86 %



B 32 Gesamtwassergehalt Varianten «2D\_S1.0», «2D\_S1.1», «2D\_S1.2» und «2D\_S1.3»

### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung äusserster Zentimeter

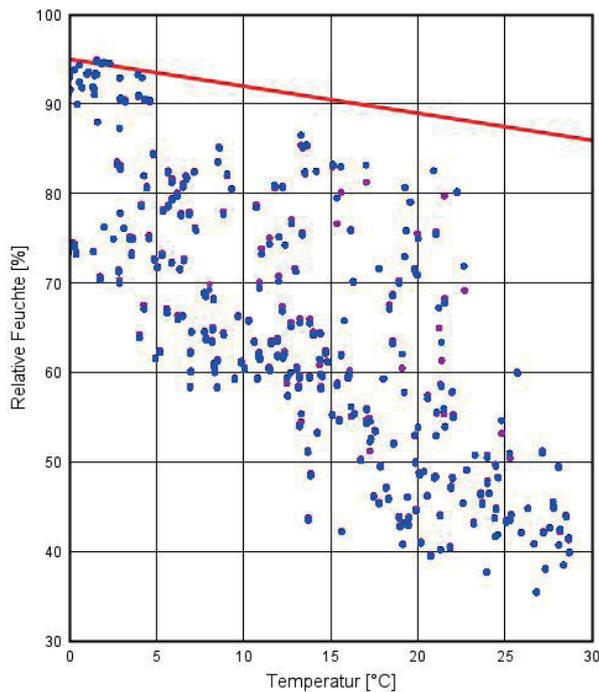
Hinsichtlich der Beurteilung des äussersten Zentimeters der bestandswand liegen, wie in Abbildung 35 ersichtlich, bei Variante «2D\_S1.1» 2 Tagesmittelwerte auf und bei den Varianten «2D\_S1.2», «2D\_S1.3» und «2D\_S2.3» jeweils 4 Tagesmittelwerte knapp oberhalb der Grenzkurve des Auswertebereichs von 95% bei 0°C und 86% bei 30°C. Eine Überschreitung der Grenzkurve ist nur in begründeten Fällen zulässig.

Die Überschreitungen treten bei tiefen Temperaturen unterhalb von 3°C auf. Wie in Abbildung 11 ersichtlich liegen die

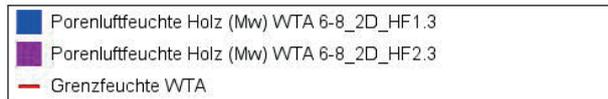
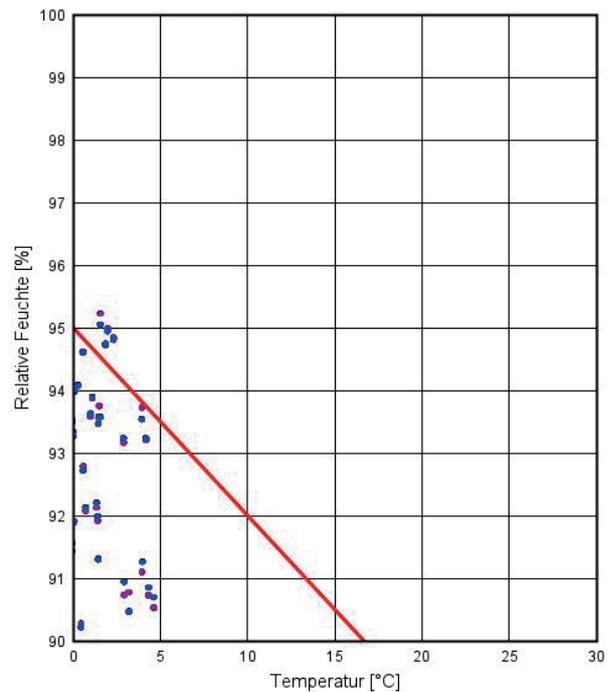
optimalen Temperaturbedingungen für das Wachstum von holzerstörenden Organismen bei 18-31°C. Aufgrund der geringen Anzahl an Überschreitungen und zudem niedrigen Temperaturen im Holz an Tagen mit Überschreitungen, scheint das Risiko eines Holzabbaus im ersten Zentimeter der sanierten Bestandswand durch holzerstörenden Organismen gering zu sein. Aus diesem Grund wird Kriterium 3 als erfüllt betrachtet.

Kriterium #3: Variante mit Lehmputz: ERFÜLLT / Variante mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

**Kriterium 3:  
Holzabbau/Holzerstörung äusserster cm  
Bestandswand**



**Kriterium 3:  
Holzabbau/Holzerstörung äusserster cm  
Bestandswand**



B 33 Auswertung aller Porenluftfeuchten der Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF2.3» im äussersten Zentimeter der sanierten Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

B 34 Auswertung der hohen Porenluftfeuchten ab 90 % der Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF2.3» im äussersten Zentimeter der sanierten Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

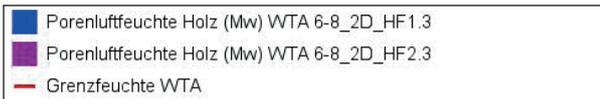
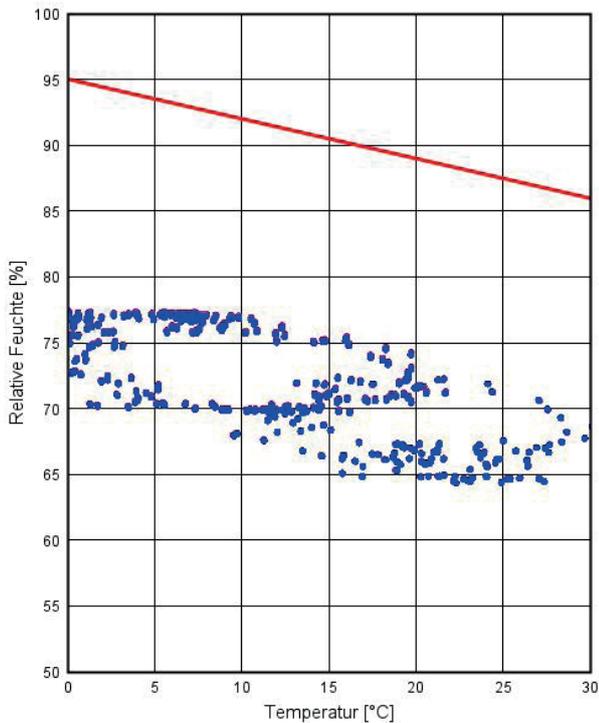
Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

#### Kriterium 4: Holzabbau/Holzerstörung Fugenbereich

Nachfolgende Abbildung zeigt die Auswertung der relativen Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur des kritischen Bereichs um die äussere Hälfte der Fuge. Die untersuchten Varianten mit Holzfaserdämmung halten die Anforderungen nach WTA Merkblatt 6-8 ein. Das Feuchteniveau ist in beiden Varianten ähnlich hoch.

Kriterium #4: Variante mit Lehmputz: ERFÜLLT / Variante mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

#### Kriterium 4: Holzabbau/Holzerstörung: Bereich um Fugen aussen



B 35 Auswertung der Porenluftfeuchte der Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF2.3» im Bereich der äusseren Hälfte der Fuge der Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

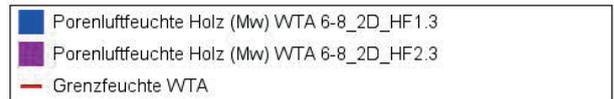
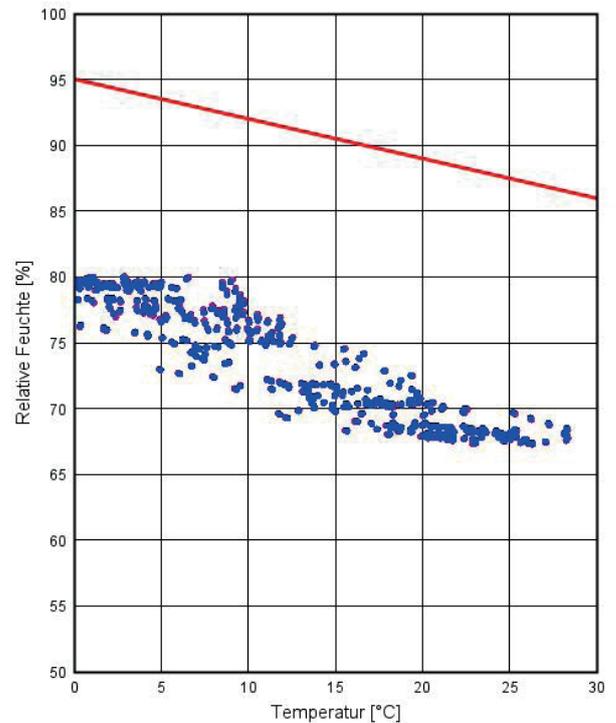
Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

#### Kriterium 5: Holzabbau/Holzerstörung innerster Zentimeter

Nachfolgende Abbildung zeigt die Auswertung der relativen Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur des innersten Zentimeters der Bestandswand. Beide untersuchten Varianten mit Holzfaserdämmung halten die Anforderungen nach WTA Merkblatt 6-8 ein. Die Feuchtegehalte liegen nahe bei einander.

Kriterium #5: Variante mit Lehmputz: ERFÜLLT / Variante mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

#### Kriterium 5: Holzabbau/Holzerstörung innerster cm Bestandswand



B 36 Auswertung der Porenluftfeuchte der der Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF2.3» im innersten Zentimeter der Bestandswand gemäss WTA Merkblatt 6-8.

Dargestellt sind Tagesmittelwerte über 24 h des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

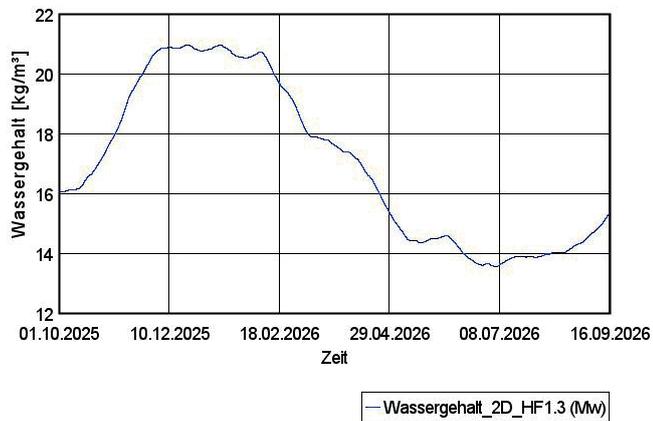
### Kriterium 6: Frostscha- den Lehmputz

Aus Abbildung 32 ist ersichtlich, dass der obere Grenzwert des Wassergehaltes von 126 kg/m<sup>3</sup> bei der Variante «2D\_HF1.3» eingehalten wird. In den Wintermonaten werden Wassergehalte bis etwa 21 kg/m<sup>3</sup> erreicht.

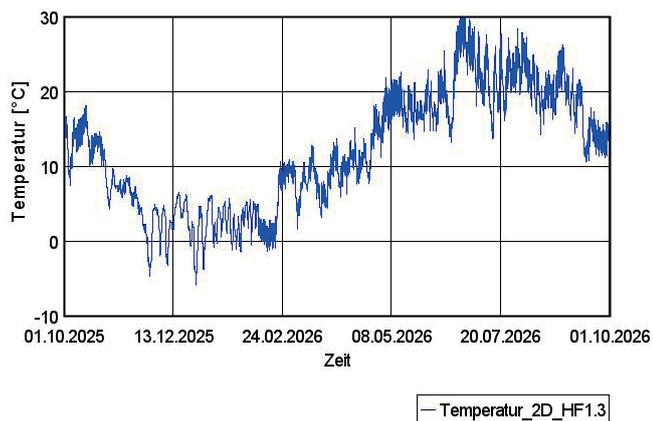
In den Monaten Dezember bis Februar liegen die Temperaturen in der Lehmputzschicht immer wieder unterhalb von 0°C.

Kriterium #6: Variante mit Lehmputz: ERFÜLLT

### Kriterium 6: Frostscha- den Lehmputz



### Temperatur in Lehmputzschicht



B 37 Auswertung des Wassergehalts (oben) sowie der Temperaturen der Variante «2D\_HF1.3» in der Lehmputzschicht.

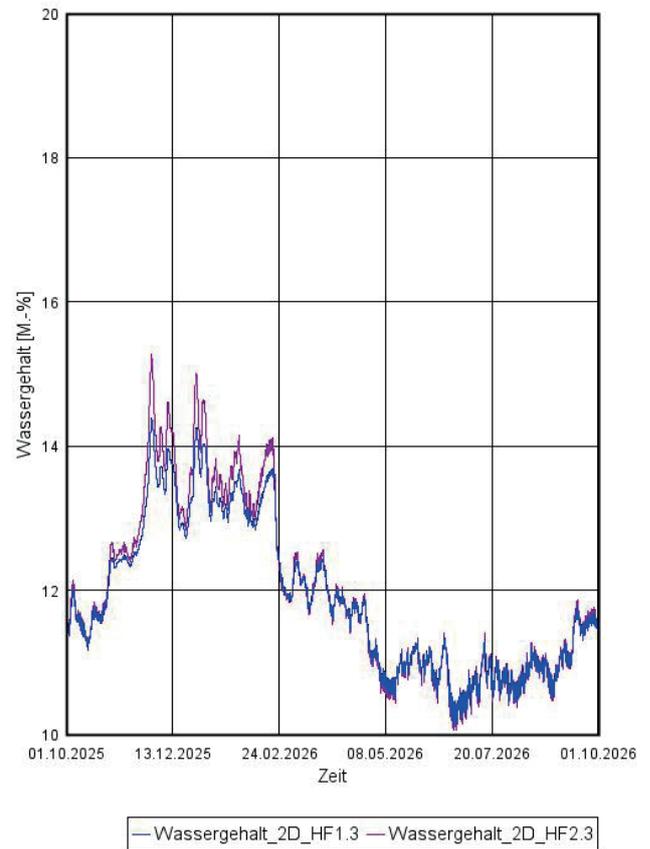
Die Wassergehalte sind als gleitendes zeitliches Mittel dargestellt. Der Auswertzeitraum ist der 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Kriterium 7: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung

Aus nachfolgender Abbildung ist ersichtlich, dass der obere Grenzwert von 18 M-% von beiden Varianten mit Holzfaserdämmung eingehalten wird. Bei der Variante mit Lehmputz werden Feuchtegehalte von etwas mehr als 14 M-% erreicht. Bei der Variante mit zweiter Luftdichtheitsebene werden Feuchtegehalte von etwas mehr als 15 M-% erreicht.

Kriterium #7: Variante mit Lehmputz: ERFÜLLT / Variante mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

### Kriterium 7: Schaden an Wärmedämmung\_ äusserster cm



B 38 Auswertung des Wassergehalts der Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF2.3».

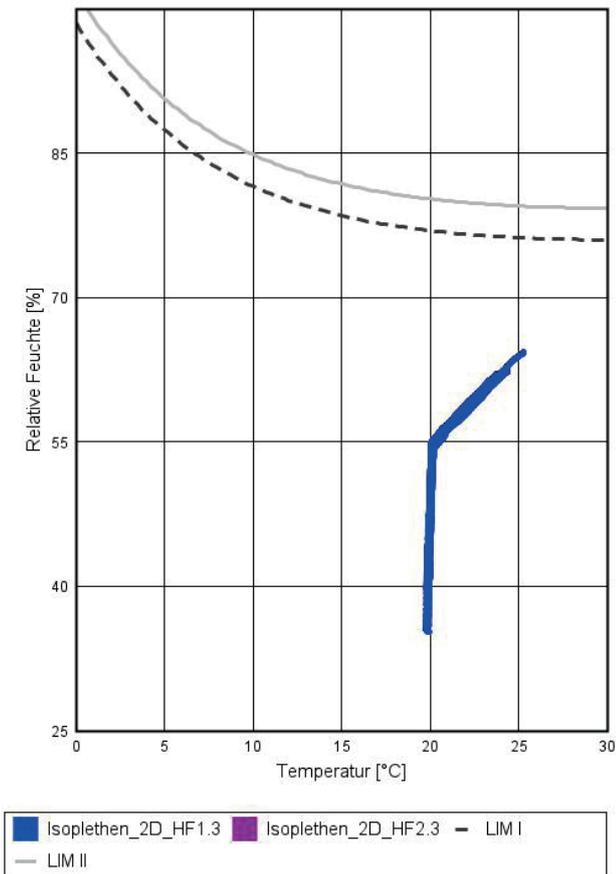
Dargestellt ist der Feuchteverlauf des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Kriterium 9: Schimmelpilzrisiko Wandinnenseite

In den untersuchten Varianten mit Holzfaserdämmung besteht kein Risiko hinsichtlich Schimmelpilzwachstum auf der Wandinnenseite. Das Temperatur-Feuchte-Diagramm für die Innenoberfläche in Abbildung 41 zeigt, dass die Grenzisoplethen LIM I und LIM II nicht überschritten werden. Es stellen sich relative Feuchten von ca. 30 – 65 % und Temperaturen von ca. 18 - 26°C ein.

Kriterium #9: Variante mit Lehmputz: ERFÜLLT / Variante mit 2. Luftdichtheitsebene: ERFÜLLT

### Kriterium 9: Schimmelpilzfreiheit Innenoberfläche



B 39 Auswertung der Isoplethen der Varianten «2D\_HF1.3» und «2D\_HF2.3». Dargestellt sind die stündlichen Werte der relativen Feuchten bezogen auf die jeweilige Temperatur des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Steildach mit Zwischensparrendämmung

Bezüglich des Daches wird ein Dachaufbau mit Schafwolle sowie ein Dachaufbau mit Holzfaserinblasdämmung im Gefach und einer Holzfaserdämmplatte unterhalb der Sparren hinsichtlich des Feuchteschutzes in WUFI Pro untersucht.

### Untersuchte Varianten

Es wurden eindimensionale Berechnungen des Feuchteschutzes der Dächer durchgeführt. In Tabelle T 20 und T 21 sind die wichtigsten Angaben zu den gewählten Randbedingungen der zweidimensionalen Simulationen der sanierten Wände zusammengefasst. Bild B 17 zeigt den prinzipiellen Aufbau der simulierten Bauteile.

### Nachweise Dachkonstruktionen

#### Kriterium 1: Anforderungen an den Wärmeschutz

Die Dämmstärken der sanierten Dächer werden so gewählt, dass ein Wärmedurchgangskoeffizient von  $U = 0.17 \text{ W/m}^2\text{K}$  eingehalten wird. Der Bauteilaufbau entspricht Bild B 17.

Kriterium #1: Dach mit Schafwolle: ERFÜLLT /  
Dach mit Holzfaser: ERFÜLLT

#### Kriterium 2: Verlauf Gesamtwassergehalt

Die Verläufe der Gesamtwassergehalte sind fallend, wie in Bild B 40 ersichtlich ist.

In Tabelle T 22 ist die Änderung der Gesamtwassergehalte am jeweils letzten Tag des letzten Simulationsjahres gegenüber denen des letzten Tages des vorletzten Simulationsjahres aufgeführt. Die Änderung der Gesamtwassergehalte ist in allen Varianten kleiner als 1 %.

Kriterium #2: Dach mit Schafwolle: ERFÜLLT /  
Dach mit Holzfaser: ERFÜLLT

T 22 Änderung des Gesamtwassergehalts in % der untersuchten Varianten der sanierten Dächer.

Bezeichnung	Gesamtwassergehalt 01.10.2025. 00:00:00	Gesamtwassergehalt 01.10.2026. 00:00:00	Änderung Δ
1D_S1.0	3.09 kg/m <sup>3</sup>	3.06 kg/m <sup>3</sup>	-0.95 %
1D_HF1.0	3.88 kg/m <sup>3</sup>	3.85 kg/m <sup>3</sup>	-0.83 %

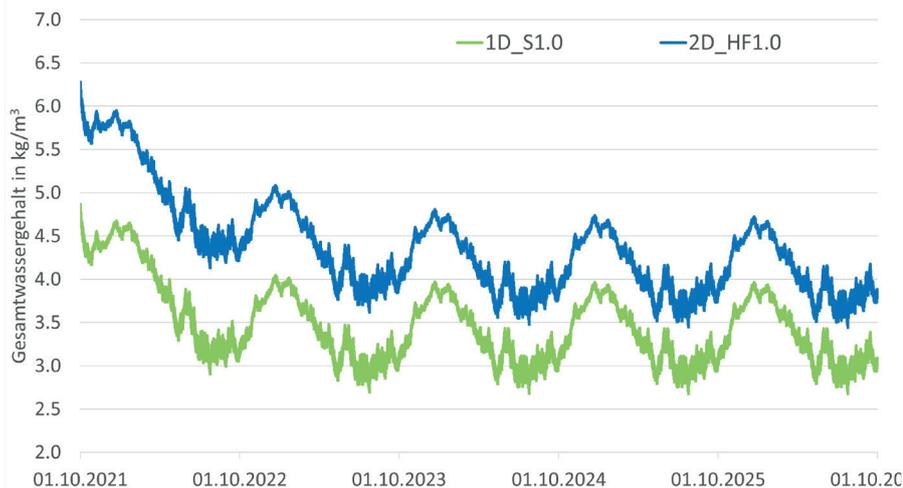
T 20 Angaben zu Bauteilaufbau, Anfangsbedingungen, betrachteter Dimension und Anzahl Simulationsjahren der untersuchten eindimensionalen Varianten der sanierten Dächer. «S» steht für Varianten mit Schafwolle, «HF» für Varianten mit Holzfaser.

Bezeichnung	Bauteilaufbau	Anfangsbedingungen	Dimension - Anzahl Jahre
1D_S1.0	Holzfaserplatte als Unterdeckplatte («STEICOuniversal», 35 mm) / Faserdämmung als Zwischensparrendämmung («Fisolan Dämmplatte», 14 cm) / feuchtevariable Dampfbremse («SIGA Majrex», sd= 1.2 – 35 m) / Faserdämmung unterhalb der Sparren («Fisolan Dämmplatte», 6cm) / Holzverschalung	20°C/80%; über Bauteil konstant	1D
1D_HF1.0	Holzfaserplatte als Unterdeckplatte («STEICOuniversal», 35 mm) / Holzfaserinblasdämmung als Zwischensparrendämmung («SteicoZell», 14 cm) / feuchtevariable Dampfbremse («SIGA Majrex», sd= 1.2 – 35 m) / Holzfaserdämmung unterhalb der Sparren («Gutex Thermoroom», 6cm) / Holzverschalung		5 Jahre (01.10.2021– 30.09.2026)

T 21 Angaben zu Ausrichtung, Klimarandbedingungen und verwendeten Feuchtequellen der untersuchten 1D Varianten der sanierten Dächer. «S» steht für Varianten mit Schafwolle, «HF» für Varianten mit Holzfaser.

Bezeichnung	Ausrichtung	Aussenklima	Innenklima	Konvektionsquelle	Schlagregenquelle	Infiltrationsquelle
2D_S1.0	Nord N (180°)	Ulrichen (2008)	EN 15026 / WTA 6-2 Feuchtelast normal + 5%	keine	keine	5 m Luftsäule, Luftdichtigkeits- klasse C
2D_HF1.0						

Verläufe Gesamtwassergehalt



B 40 Gesamtwassergehalt Varianten «1D\_S1.0» und «1D\_HF2.0».

### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung innerer Zentimeter Holzschalung

Sowohl das Dach mit Schafwolle als auch das Dach mit Holzfaser hält den Grenzwert von 18M-% in den inneren 10 mm der Holzverschalung ein. Beide Konstruktionen erreichen Feuchtegehalte im Bereich von 15 M-% in den Wintermonaten, welche über den Sommerhin wieder austrocknen.

Kriterium #3: Dach mit Schafwolle: ERFÜLLT /  
Dach mit Holzfaser: ERFÜLLT

### Kriterium 4: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung

Aus nachfolgender Abbildung ist ersichtlich, dass der obere Grenzwert der relativen Feuchte von 95 % in der Schafwollendämmung eingehalten wird. Die relative Feuchte steigt in den Wintermonaten auf bis zu 80 % an und trocknet über den Sommer aus.

Aus Bild B 42 ist ersichtlich, dass der obere Grenzwert von 18 M-% bei der Varianten mit Holzfaserdämmung eingehalten wird. Es werden Feuchtegehalte von etwas mehr als 16 M-% erreicht.

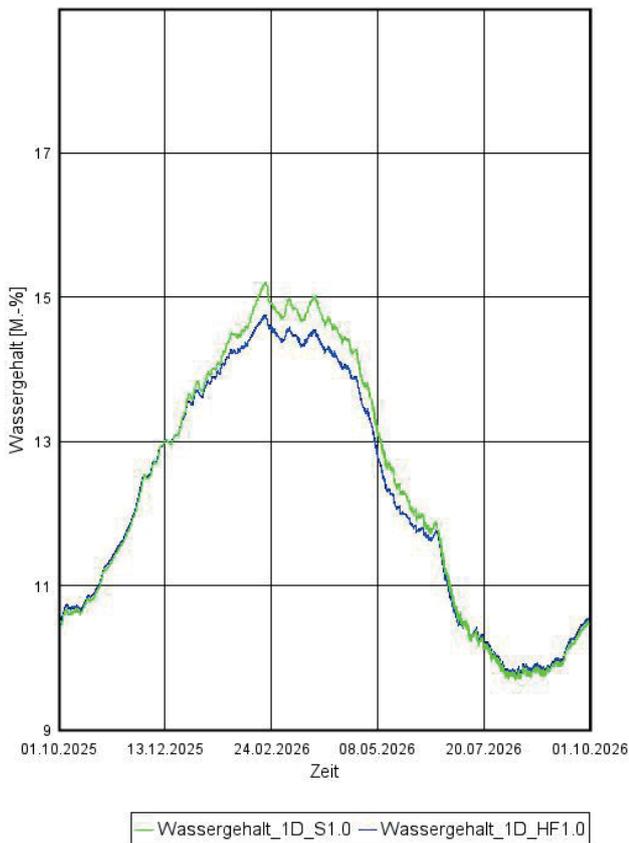
Kriterium #4: Dach mit Schafwolle: ERFÜLLT /  
Dach mit Holzfaser: ERFÜLLT

### Kriterium 5: Schaden durch ablaufendes Wasser in Tauwasserebene der Dämmung (nur Schafwolle)

Zur Identifizierung möglicher Tauwasserebenen im Dachaufbau mit der Schafwollendämmung, also Bereiche, an denen die relative Feuchte 100 % erreicht, wurde die WUFI-Filmdarstellung zur Hilfe genommen. Es treten in keiner der Varianten Bereiche mit Tauwassergefahr auf.

Kriterium #5: Dach mit Schafwolle: ERFÜLLT

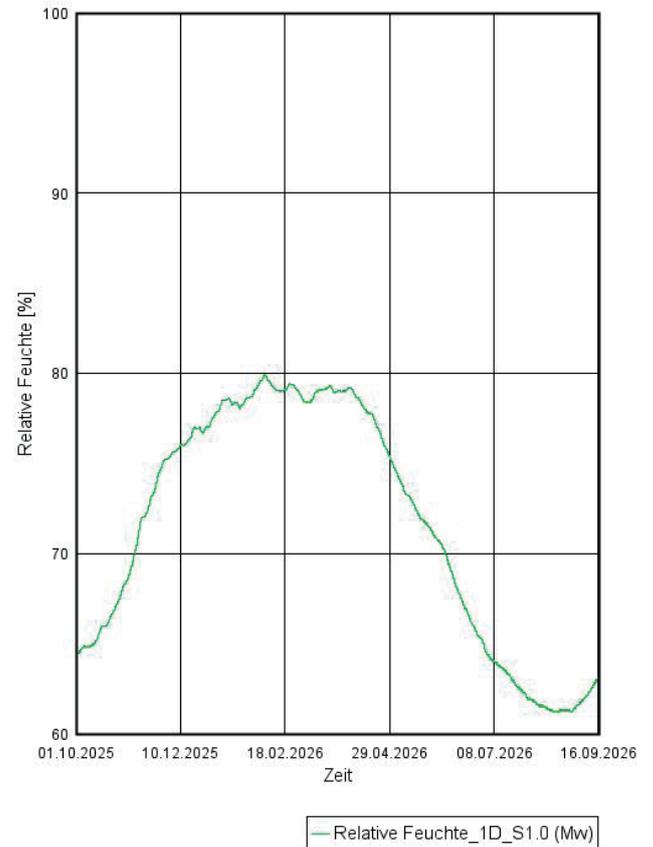
### Kriterium 3: Holzabbau/Holzerstörung innerer Zentimeter Holzschalung



B 41 Auswertung der Wassergehalte der Dachkonstruktion mit Schafwolle (Variante «1D\_S1.0») sowie Holzfaser (Variante «1D\_HF1.0»).

Der Auswertzeitraum ist der 01.10.2025 – 01.10.2026.

### Kriterium 4: Schaden äusserster Zentimeter Wärmedämmung



B 42 Auswertung der relativen Feuchte der der Variante «1D\_S1.0 im äussersten Zentimeter der Wärmedämmung.

Dargestellt ist das gleitende Zeitliche Mittel des Auswertzeitraums 01.10.2025 – 01.10.2026.

# 7.4 Berechnung von Wärmebrücken

In allen Gebäude treten Wärmebrücken auf. Daher muss die Wärmebrückenwirkung der vorhandenen Wärmebrücken untersucht und beurteilt werden. Dabei werden zwei Aspekte von Wärmebrücken betrachtet: Der Mindestwärmeschutz und der zusätzliche Wärmeverlust einer Wärmebrücke.

## Anforderungen

Der Mindestwärmeschutz wird in der Norm SIA 180 Wärmeschutz im Hochbau, Ausgabe 2014 mit Korrigendum, Ausgabe 2015 geregelt. Ein ausreichender Mindestwärmeschutz dient dazu, Tauwasserbildung und den Befall mit Schimmelpilzen bei Wärmebrücken von Außenbauteilen zu verhindern.

Die Anforderungen des Mindestwärmeschutzes zielen dabei auf den sogenannten  $f_{Rsi}$ -Wert. Dieser ist wie in Gleichung G 14 definiert:

$$f_{Rsi} = \frac{\Theta_{si} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} \quad \text{G 14}$$

Hierin bezeichnet:

- $\Theta_{si}$  die minimale, raumseitige Oberflächentemperatur im Wärmebrückenbereich in °C
- $\Theta_i$  die Raumlufttemperatur in °C
- $\Theta_e$  die Aussenlufttemperatur in °C

Die Anforderungen an den Mindestschutz von Wärmebrücken werden in der Schweiz abhängig vom Standort festgelegt. Für die Gebäude im Oberwallis wurde der Standort Ulrichen mit einem Anforderungswert von  $f_{Rsi} = 0.71$  für die Verhinderung von Schimmelpilzbefall  $f_{Rsi} = 0.62$  für die Verhinderung von Oberflächenkondensat vorgegeben.

Der zusätzliche Wärmeverlust einer Wärmebrücke wird zur Berechnung des Energieverlustes der Gebäudehülle benötigt. Die Anforderungen an den zusätzlichen Wärmeverlust werden u. a. in der SIA 380/1 Heizwärmebedarf, Ausgabe 2016 geregelt. Diese richten sich an den sogenannten  $\psi$ -Wert, der den spezifischen Wärmeverlust einer

T 23 Grenzwerte für den maximalen zusätzlichen Wärmeverlust von Wärmebrücken nach Tabelle 5, SIA 380/1

Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient $\psi$	Grenzwert $\psi_{li}$ in W/(m K)
Typ 1: Auskragungen in Form von Platten oder Riegeln	0.30
Typ 2: Unterbrechung der Wärmedämmschicht durch Wände, Böden und Decken	0.20
Typ 3: Unterbrechung der Wärmedämmschicht an horizontalen oder vertikalen Gebäudekanten	0.20
Typ 5: Fensteranschlag	0.15

längenbezogenen Wärmebrücke pro Meter Abwicklungslänge beschreibt. Die Anforderungen an den zusätzlichen Wärmeverlust werden in Tabelle 5 der Norm formuliert, vgl. Tabelle T 23.

## Untersuchte Wärmebrücken

Für die detaillierte Berechnung wurden die längenbezogenen Wärmebrücken folgender Details ausgewählt:

- Einbindende Innenwand in Aussenwand, Bild B 43
- Sockel im Kellerbereich, Bild B 47

## Grundlagen der Berechnung

Die Berechnung der Wärmebrücken wird nach EN ISO 10211:2017 Wärmebrücken im Hochbau mit den Randbedingungen der SIA 180 durchgeführt. Die Berechnung der Wärmebrücken erfolgt mit dem Programm Flixo, Version 8.1.

## Randbedingungen für $\Psi$ -Wert Berechnung

Die Randbedingungen der  $\Psi$ -Wert Berechnung sind in Tabelle T 24 zusammengefasst.

## Randbedingungen für $f_{Rsi}$ -Wert Berechnung

In Tabelle T 25 sind die Randbedingungen für die Berechnung des Mindestwärmeschutzes nach SIA 180 zusammengestellt.

T 24 Randbedingungen für die Berechnung des zusätzlichen Wärmeverlustes

$R_{se}$	Äusserer Wärmeübergangswiderstand gegen Aussenluft	0.04 m <sup>2</sup> K/W
$R_{si}$	Innerer Wärmeübergangswiderstand	0.13 m <sup>2</sup> K/W
$R_{se}$	Äusserer Wärmeübergangswiderstand gegen Erdreich	0.00 m <sup>2</sup> K/W
$\Theta_i$	Raumlufttemperatur, beheizt	20 °C
$\Theta_e$	Aussenlufttemperatur	-5 °C
$\Theta_{ir}$	Raumlufttemperatur im unbeheizten Keller	0 °C

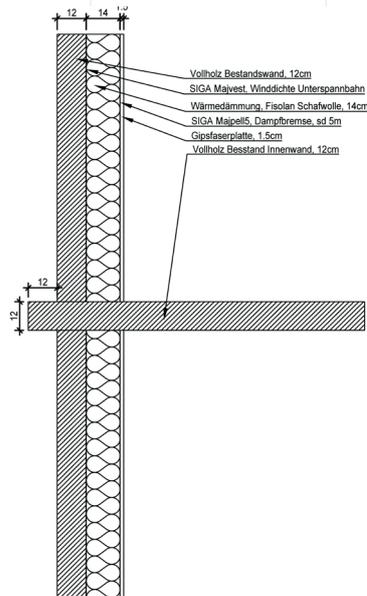
T 25 Randbedingungen für  $f_{Rsi}$  Berechnung – nach SIA 180, Ziffer 6.2.3.6

$R_{se}$	Äusserer Wärmeübergangswiderstand gegen Aussenluft	0.04 m <sup>2</sup> K/W
$R_{si}$	Innerer Wärmeübergangswiderstand an flächigen Bauteilen	0.25 m <sup>2</sup> K/W
$\Theta_i$	Raumlufttemperatur, beheizt	20 °C
$\Theta_e$	$\Theta_{a,e,min}$ Aussenlufttemperatur	-5 °C
$\Theta_{ir}$	Raumlufttemperatur im unbeheizten Keller	0 °C

## Ergebnisse

Die Wärmebrückenberechnungen werden für denselben Wärmeschutz der flächigen Bauteile durchgeführt wie beim Energienachweis für die Referenzgebäude. Damit wird die Bauteilschichtung so gewählt, dass die entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten der Aussenbauteile, wie vorgängig angegeben sind, eingehalten werden.

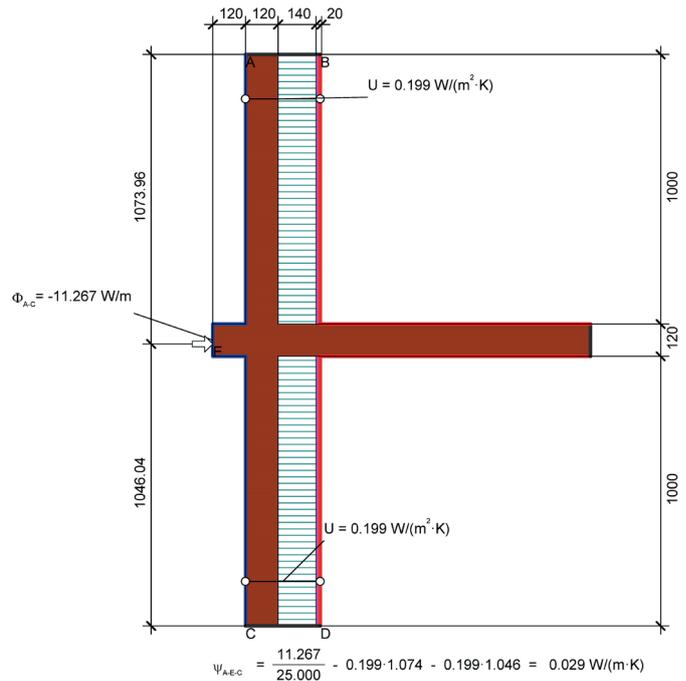
Details der Berechnungen können dem Kurzbericht Wärmebrücken **(Verweis Bericht)** entnommen werden.



## Einbindende Innenwand

Für den zusätzlichen Wärmeverlust der Wärmebrücke ergibt sich zu  $0.029 \text{ W}/(\text{mK})$ , was wesentlich geringer als die Anforderung der SIA 380/1 ist.

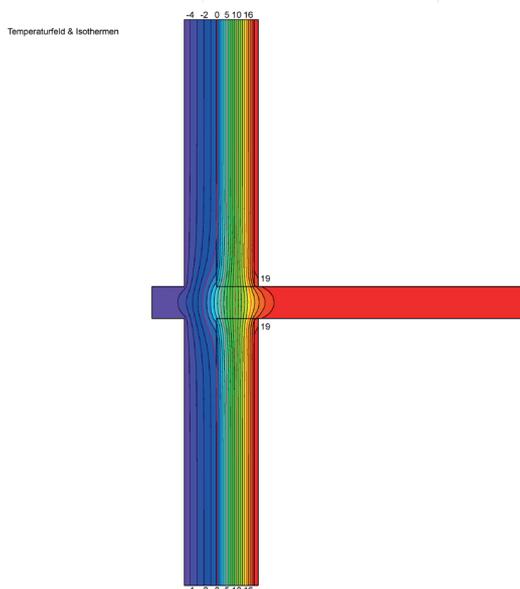
Bild B 44 bis B 46 zeigen die Wärmeströme und Wärmeleitfähigkeiten der Bauteilschichten und den Temperaturverlauf in der Wärmebrücke bei  $-5 \text{ °C}$  Aussentemperatur und  $20 \text{ °C}$  Innentemperatur in Form der Isothermen. Für den Mindestwärmeschutz der Wärmebrücke ergibt sich ein  $f_{Rsi} = 0.91$ . Dieser  $f_{Rsi}$ -Wert ist deutlich grösser als der zulässige Wert von  $f_{Rsi,min} = 0.71$ . Damit ist der Mindestwärmeschutz der Wärmebrücke erfolgreich nachgewiesen.



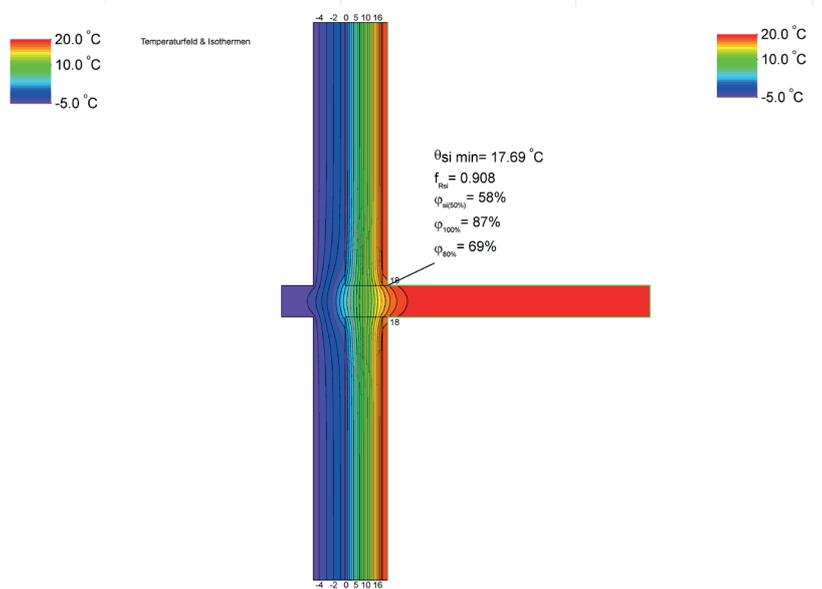
Material	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\epsilon$	Randbedingung	$q$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W]	$\epsilon$
FERMACELL Gipsfaserplatte	0.320	0.900	Aussenklima -5°C	-5.000	0.040		
Fisolan Schafwolle 0.036	0.036	0.900	Innen Standard horizontal	20.000	0.130		
Holz AW Rho=500kg/m <sup>3</sup>	0.130	0.900	Symmetrie/Bauteilschnitt	0.000			

B 43 Geometrie der in die Aussenwand einbindenden Innenwand

B 44 Wärmeströme und Wärmeleitfähigkeiten der Bauteilschichten für die Berechnung des zusätzlichen Wärmeverlustes



B 45 Temperaturverlauf in der Wärmebrücke für die Berechnung des zusätzlichen Wärmeverlustes der Wärmebrücke



B 46 Temperaturfeld in der Wärmebrücke für die Berechnung des Mindestwärmeschutzes

### Sockel

Da die Wärmebrücke am Sockel an drei unterschiedlich warme Bereiche angrenzt, muss die Wärmebrückenberechnung zur Ermittlung des zusätzlichen Wärmeverlustes mit einem wesentlich aufwändigeren Verfahren erfolgen. Sie muss in drei Schritten berechnet werden, um den Wärmestrom eindeutig bestimmen zu können. Die Berechnung des  $\Psi$ -Wertes des Sockels erfolgt über eine iterative Bestimmung der Wärmeströme bei unterschiedlichen Randbedingungen.

In Schritt 1 wird die Innenlufttemperatur für den beheizten Raum und den unbeheizten Kellerraum angesetzt ( $\theta_i$  und  $\theta_u = 20^\circ\text{C}$ ). Dabei wird für die Aussenlufttemperatur  $\theta_e = -5^\circ\text{C}$  angesetzt. Im zweiten Schritt wird die Innentemperatur ( $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ ) nur für den beheizten Wohnraum angesetzt. Für den unbeheizten Keller und den Aussenraum werden jeweils mit der Aussenlufttemperatur angenommen ( $\theta_e$  und  $\theta_u = -5^\circ\text{C}$ ). Als letzter Schritt wird wieder für den beheizten Wohnraum und den Aussenraum die Innenlufttemperatur von  $\theta_i$  und  $\theta_e = 20^\circ\text{C}$  angenommen. Die Temperatur des unbeheizten Kellers wird dabei nur mit  $\theta_u = 0^\circ\text{C}$  angenommen.

Nun können die errechneten Wärmeströme analysiert werden und der effektive Wärmestrom der Sockelwärmebrücke kann eindeutig bestimmt werden. Dazu werden für die einzelnen Schritten den Wärmeströmen thermische Leitwerte  $L$  zugeordnet. Siehe dazu auch «Anhang A2: Wärmebrückenkatalog, AP5: Innendämmsysteme» des BFE in der Ausgabe 2013. In Tabelle T 26 sind die Randbedingungen der Berechnungen ersichtlich. Die Tabelle T 27 stellt die Ergebnisse der Berechnung des  $\Psi$ -Wertes der Wärmebrücke zusammen.

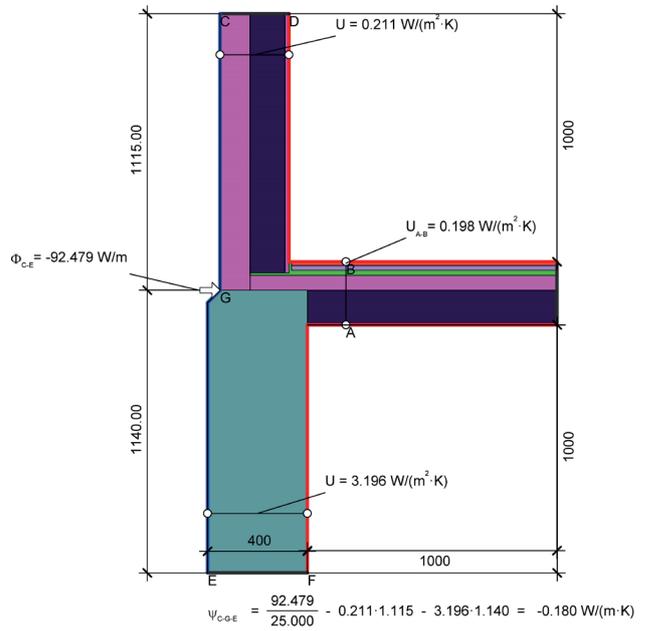
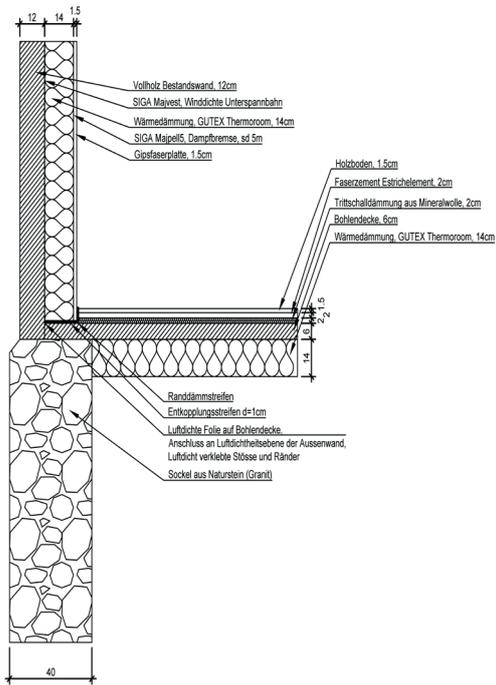
Für den zusätzlichen Wärmeverlust der Wärmebrücke des Sockels ergibt sich ein  $\Psi$ -Wert von  $0.030\text{ W}/(\text{mK})$ . Damit sind die Anforderungen der SIA 380/1 erfolgreich nachgewiesen. Bild B 47 zeigt das Wärmebrückenmodell mit den Wärmeleitfähigkeiten der Bauteilschichten. Für den Mindestwärmeschutz des Sockels ergibt sich ein  $f_{Rsi} = 0.78$ . Damit ist der Mindestwärmeschutz nach SIA 180 für den Standort Ulrichen erfolgreich nachgewiesen. Bild B 49 zeigt das Temperaturfeld für die Berechnung des Mindestwärmeschutzes des Sockels.

T26 Randbedingungen für die Berechnung des zusätzlichen Wärmeverlustes

Temperatur Bedingung	$\Theta_i$ in $^\circ\text{C}$	$\Theta_e$ in $^\circ\text{C}$	$\Theta_u$ in $^\circ\text{C}$		
1	20	-5	20	$\Phi_1 = \Phi_{AW} + \Phi_{ue}$	-92.479 W/m
2	20	-5	-5	$\Phi_2 = \Phi_{AW} + \Phi_{IW}$	13.517 W/m
3	20	20	0	$\Phi_3 = \Phi_{IW} + \Phi_{ue}$	-72.421 W/m
	$L_1 = L_{AW} + L_{ue} =$			$\Phi_1 / (\Theta_i - \Theta_e)$	-3.699 W/(mK)
	$L_2 = L_{AW} + L_{IW} =$			$\Phi_2 / (\Theta_i - \Theta_e)$	0.541 W/(mK)
	$L_3 = L_{IW} + L_{ue} =$			$\Phi_3 / (\Theta_i - \Theta_u)$	-3.621 W/(mK)

T27 Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen für die Berechnungsschritte:  $L$  bezeichnet die spezifischen Wärmeverluste und  $\Phi$  die Wärmeströme

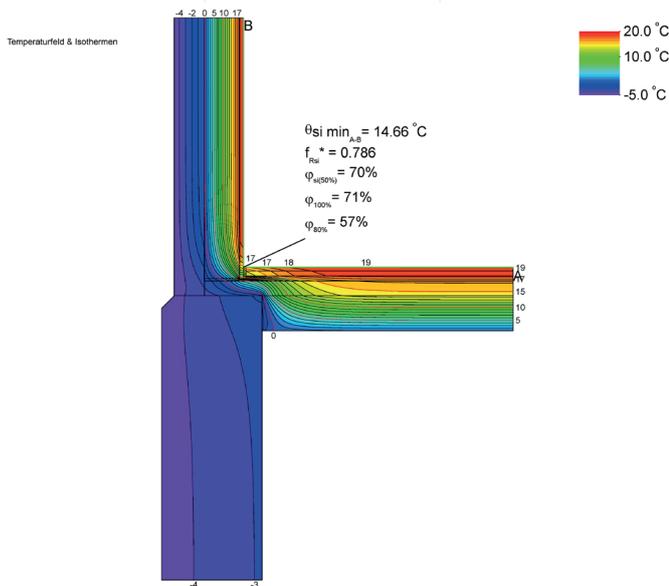
$L_{AW} = 0.5 \cdot (L_1 + L_2 - L_3)$	$L_{AW}$	0.231 W/(mK)
$L_{IW} = 0.5 \cdot (-L_1 + L_2 + L_3)$	$L_{IW}$	0.309 W/(mK)
$L_{ue} = 0.5 \cdot (L_1 - L_2 + L_3)$	$L_{ue}$	-3.930 W/(mK)
	$\Phi$	11.970 W/m
	$L_{2D}$	0.479 W/(mK)
	$\Psi$	0.030 W/(mK)



Material	$\lambda$ [W/(m·K)]	$\epsilon$	Randbedingung	$q$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$R$ [(m <sup>2</sup> ·K)/W]	$\epsilon$
FERMACELL Estrichelement	0.320	0.900	Aussen Standard -5°C	-5.000		0.040	
FERMACELL Gipsfaserplatte	0.320	0.900	Innen Standard horizontal	20.000		0.130	
GUTEX Thermoroom	0.039	0.900	Symmetrie/Bauteilschnitt	0.000			
Granit	2.800	0.900					
Holzboden (Kiefer)	0.140	0.900					
SIGA Majpell 5	0.170	0.900					
SIGA Majvest	0.170	0.900					
Sperrholz 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	0.900					
Trittschall-Dämmplatte TPE	0.035	0.900					

B47 Geometrie der längenbezogenen Wärmebrücke am Sockel

B48 Wärmeströme und Wärmeleitfähigkeiten der Bauteilschichten für die Berechnung des zusätzlichen Wärmeverlustes für den 1. Schritt.



B49 Temperaturfeld in Form der Isothermen für den Nachweis des Mindestwärmeschutzes

## 7.5 Schalltechnische Sanierung

Bei der Sanierung bestehender Gebäude ist der Schallschutz so weit wie möglich zu verbessern. Dabei stellt der Schallschutz eines sanierten Gebäudes einen Kompromiss zwischen bestehenden Randbedingungen und der Herstellung der aktuellen Anforderungen der einschlägigen Schallschutzrichtlinien zum Zeitpunkt der Sanierung dar.

### Einführung

Für historische Gebäuden ist ausserdem auch die Bewahrung der historischen Substanz so weit wie möglich zu berücksichtigen. Es ist aber auch zu bedenken, dass der Schallschutz ein wesentliches Qualitätsmerkmal eines Gebäudes darstellt. Dies gilt insbesondere für den Trittschallschutz, da ein zu geringer Trittschallschutz von den Bewohnern als sehr störend empfunden wird. Damit sollte sich die Sanierung des Schallschutzes vor allem auf die Geschossdecken zwischen fremden Wohnungen fokussieren.

Im vorliegenden Leitfaden werden ausschließlich Dielbaumdecken behandelt, da diese eine spezielle Bauart der betrachteten Gebäude darstellen.

### Anforderungen

Die Anforderungen an den Schallschutz in Gebäuden werden in der Schweiz in der SIA 181 Schallschutz im Hochbau, Ausgabe 2020 festgelegt. Die Anforderungen an den Luft- und Trittschallschutz von Geschossdecken hängen dabei von der Nutzung eines Gebäudes ab. Während es für die Geschossdecken in Mehrfamilienhäusern Mindestanforderungen und erhöhte Anforderungen gibt, bestehen in Einfamilienhäuser keine verbindlichen Anforderungen, sondern lediglich Empfehlungen für den Luft- und den Trittschallschutz.

Die Anforderungen des Luftschallschutzes werden an die spektral angepasste, bewertete Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{i,tot} = D_{nT,w} + C$  gestellt. Die Anforderungen für Geschossdecken zwischen fremden Wohn- und Arbeitsräumen betragen für den Luftschallschutz zwischen  $D_i \geq 47$  dB und  $D_i \geq 52$  dB als Mindestanforderungen. Das erhöhte Qualitätsniveau des Luftschallschutzes wird mit jeweils 4 dB höheren Werten erreicht.

In der Tabelle T 28 sind die einschlägigen Anforderungen für den Luftschallschutz nach SIA 181 für Trennbauteile zwischen Wohnungen zusammengestellt.

Die Anforderungen des Trittschallschutzes werden an den spektral angepasste, bewerteten Standard-Trittschallpegel nach G1 gestellt.

$$L'_{tot} = \begin{cases} L'_{nT,w} + C_1 & \text{für } C_1 \geq 0 \text{ dB} \\ L'_{nT,w} & \text{für } C_1 < 0 \text{ dB} \end{cases}$$

G 15

Die Mindestanforderungen des Trittschallschutzes zwischen Wohnungen betragen zwischen  $L'_{tot} \leq 58$  dB und  $\leq 53$  dB, je nach Lärmempfindlichkeit der Wohnräume.

Durch Reduzierung der Werte um jeweils 4 dB wird das erhöhte Qualitätsniveau des Trittschallschutzes erreicht. In Bestandsbauten sind um 2 dB höhere Werte zulässig.

In der Tabelle T 29 sind die einschlägigen Anforderungen des Trittschallschutzes zusammengestellt.

### Abgrenzung

Zur Berechnung des Luft- und Trittschallschutzes von üblichen Holzbaukonstruktionen gibt es eine Reihe von internationalen Normen, wie zum die DIN 4109 Schallschutz im Hochbau, Ausgabe 2016, Beuth Verlag Berlin und weitere Veröffentlichungen wie das Holzbauhandbuch Schallschutz im Hochbau-Grundlagen und Vorbemessung, Holzbau Deutschland-Institut e.V., Berlin.

In diesem Bericht wird ausschließlich die schalltechnische Sanierung von Dielbaumdecken behandelt, da diese eine typische Konstruktion in historischen Gebäuden im Oberwallis darstellen.

T28 Schallschutzanforderungen an den Luftschallschutz von Trennbauteilen nach SIA 181:2020, Tabelle 3

Lärmbelastung	klein	mässig	stark	sehr stark
Nutzung	geräuscharm	normal	lärmig	lärmintensiv
Beispiele für emissionsseitige Raumart und Nutzung (Senderaum)	Lese-, Warteraum, Archiv, Abstellraum, Lager- und Kellerraum, Veloraum	Wohn-, Schlafrum, Küche, Bad, Dusche, WC, Korridor, Aufzugsschacht, Aufzugsmaschinenraum, Treppenhaus, Wintergarten, Einstellhalle, Büroraum, Sitzungszimmer, Labor, Verkaufsraum ohne Beschallung	Saal, Schulzimmer, Kinderkrippe, Kindergarten, Technikraum, Restaurant ohne Beschallung, Verkaufsraum mit Beschallung und dazu gehörende Erschliessungsräume, Einstellhalle mit gewerblicher Nutzung	Gewerbebetrieb, Werkstatt, Musikübungsraum, Sporthalle, Restaurant mit Beschallung und dazu gehörende Erschliessungsräume
Lärmempfindlichkeit	Anforderungswerte $D_f$			
gering	42 dB	47 dB	52 dB	57 dB
mittel	47 dB	52 dB	57 dB	62 dB
hoch	52 dB	57 dB	62 dB	67 dB

T29 Schallschutzanforderungen an den Trittschallschutz von Trennbauteilen für den Übertragungsweg in fremde Räume nach SIA 181:2020, Tabelle 5

Lärmbelastung	klein	mässig	stark	sehr stark
Beispiele für emissionsseitige Raumart und Nutzung (Senderaum)	Archiv, Warte-, Leseraum, Balkone	Wohn-, Schlafrum, Küche, Bad, Dusche, WC, Büroraum, Korridor, Treppe, Laubengang, Passage, Terrasse, Einstellhalle	Verkaufsraum, Restaurant, Saal, Schulzimmer, Kinderkrippe, Kindergarten, Sporthalle, Werkstatt, Musikübungsraum	Die in der Stufe «stark» festgehaltenen Nutzungen, wenn diese auch in der Nacht von 19.00 h bis 07.00 h vorkommen.
Lärmempfindlichkeit	Anforderungswerte $D_f$			
gering	63 dB	58 dB	53 dB	48 dB
mittel	58 dB	53 dB	48 dB	43 dB
hoch	53 dB	48 dB	43 dB	38 dB

### Beschreibung der Konstruktion

Eine Dielbaumdecke besteht aus einem Holzbalken, welcher dazu quer verlaufende Dielbaumbretter trägt. Im Gegensatz zu Holzbalkendecken gibt es in der Regel pro Raum aber nur einen Tragbalken. In Bild 1 ist ein Querschnitt durch eine typische Dielbaumdecke dargestellt.

### Sanierungsmaßnahmen des Schallschutzes

Zur Verbesserung des Trittschallschutzes ist die effizienteste Maßnahme der Einbau eines schwimmenden Unterlagsbodens. Um die Trittschallverbesserung des schwimmenden Unterlagsbodens zu optimieren,

- sollte die Platte des Unterlagsbodens möglichst schwer sein
- die darunterliegende Trittschalldämmung eine möglichst geringe dynamische Steifigkeit aufweisen, also möglichst weich sein
- die Dielbaumdecke möglichst schwer sein

Ein einfacher Test, mit dem die Qualität des Unterlagsbodens nachgewiesen werden kann, ist die Berechnung der Resonanzfrequenz des schwimmenden Unterlagsbodens. Die Resonanzfrequenz gibt die Frequenz an, oberhalb welcher der Unterlagsboden den Trittschallschutz verbessert. Diese Resonanzfrequenz sollte daher möglichst tief liegen. Sie ergibt sich für das System Dielbaumdecke mit Unterlagsboden nach Gleichung G 16.

$$f_0 = 160 \text{ Hz} \sqrt{s' \cdot \left( \frac{1}{m'_{UB}} + \frac{1}{m'_{DBD}} \right)}$$

G 16

Hierin bezeichnet:

- $s'$  die dynamische Steifigkeit der Trittschalldämmung in MN/m<sup>3</sup>
- $m'_{UB}$  die flächenbezogene Masse der Platte des Unterlagsbodens in kg/m<sup>2</sup>
- $m'_{DBD}$  die flächenbezogene Masse der Dielbaumdecke in kg/m<sup>2</sup>

Die Resonanzfrequenz ist also umso geringer, je weicher die Trittschalldämmung und je schwerer die Unterlagsbodenplatte und die Dielbaumdecke ist. Wenn die so abgeschätzte Resonanzfrequenz des schwimmenden Unterlagsbodens kleiner als 50 Hz ist, kann davon ausgegangen werden, dass der schwimmende Unterlagsboden eine hohe Verbesserung des Trittschallschutzes erbringt.

Durch zusätzliches Anbringen einer abgehängten Decke unter der Dielbaumdecke kann der Trittschallschutz der Geschossdecke weiter verbessert werden.

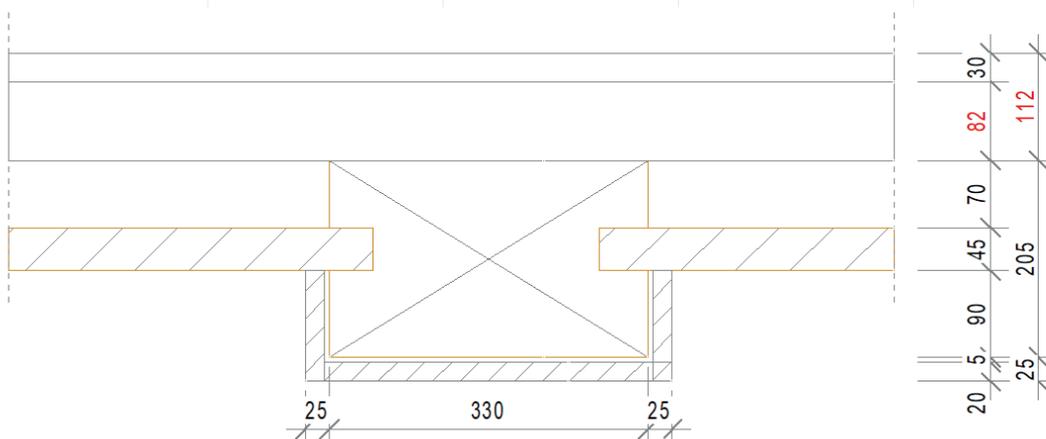
Die Resonanzfrequenz des Systems der Dielbaumdecke mit abgehängter Decke beträgt:

$$f_0 = 160 \text{ Hz} \sqrt{\frac{0.11 \text{ m} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{d} \cdot \left( \frac{1}{m'_{AD}} + \frac{1}{m'_{DBD}} \right)}$$

G 17

Hierin bezeichnet:

- $d$  die Abhanghöhe der abgehängten Decke in m
- $m'_{AD}$  die flächenbezogene Masse der Beplankung der abgehängten Decke in kg/m<sup>2</sup>
- $m'_{DBD}$  die flächenbezogene Masse der Dielbaumdecke in kg/m<sup>2</sup>



B 50

Vertikalschnitt durch eine Dielbaumdecke

Die bisher geschilderten Maßnahmen zur Verbesserung des Trittschallschutzes müssen aber auf die Gegebenheiten und Randbedingungen vor Ort abgestimmt werden. Hierbei sind insbesondere folgende Punkte zu klären:

können die zusätzlich aufgebrachten Lasten für die Unterlagsbodenplatte und die Beschwerung der Dielbaumdecke von der Konstruktion sicher abgeleitet werden?

Ist die Höhe des zusätzlich aufgebrachten Unterlagsbodens mit der erforderlichen Höhe der bestehenden Türzargen und der erforderlichen Raumhöhe verträglich?

Entsteht eine Stolperschwelle im Treppenhaus?

Ist die Abhanghöhe der abgehängten Decke mit der erforderlichen Raumhöhe des Raumes unter der Dielbaumdecke verträglich?

#### Messungen des Schallschutzes

Um die Wirksamkeit von schwimmenden Unterlagsböden auf einer Dielbaumdecke zu untersuchen, wurden Schallmessungen von sanierten Dielbaumdecken in zwei Referenzgebäuden durchgeführt. Die untersuchten Geschossdecken weisen folgende Fußbodenaufbauten auf:

#### Gebäude I

- 15 mm Parkett
- 25 mm Fermacell Estrichelement
- 20 mm Trobatherm Bodenheizungsplatte
- 18 mm OSB-Platte
- variabel Schüttung aus Zellulose-Wärmedämmung Isofloc als Höhenausgleich
- Rieselschutz
- Bestandsboden aus Dielbaum und Brettern

#### Gebäude II

- 20 mm Riemenboden Fichte (geklebt)
- 25 mm Fermacell Estrichelement
- 20 mm Trobatherm Bodenheizungsplatte
- 22 mm OSB-Platte (schwimmend)
- 40 mm Schüttung Isofloc als Höhenausgleich
- Rieselschutz
- 55 mm Bestandsboden aus Dielbaum und Brettern

Die folgenden Bilder B 4 bis B 7 zeigen die Ergebnisse der Luft- und Trittschallmessung der ersten Geschossdecke in den Gebäuden I und II.



B 51  
Schallmessung einer sanierten Dielbaumdecke

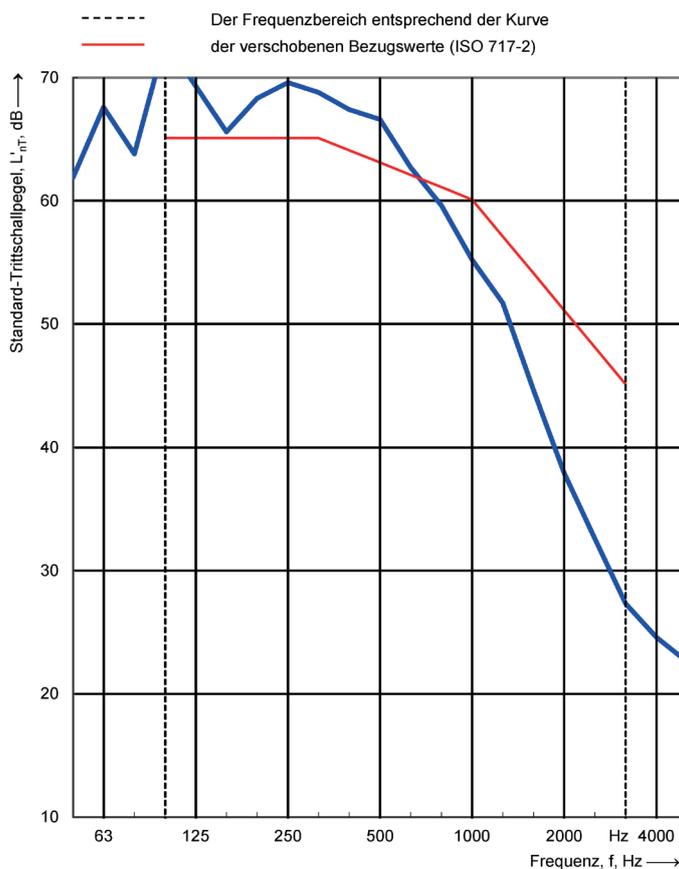
### Standard-Trittschallpegel nach ISO 16283-2

Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden

Auftraggeber: VetaNova Prüfdatum: 16.04.2021  
 Aufbau: Parkett, Estrichelement, Bodenheizungsplatte, OSB-Platte schwimmend auf Isofloc Dämmung mit Rieselschutz.  
 Flankierende Bauteile: zwei Vollholzaussenwände, zwei Vollholzinnenwände  
 Objekt: Referenzgebäude I, Decke über EG, Empfangsraum Hobbyraum, Senderraum Wohnen

Volumen des Senderraumes: 116.4 m³  
 Volumen des Empfangsraum 30.2 m³

Frequenz f [Hz]	L'_{nT} Terz [dB]
50	61.9
63	67.6
80	63.8
100	73.0
125	69.3
160	65.6
200	68.3
250	69.6
315	68.8
400	67.4
500	66.6
630	62.7
800	59.6
1000	55.2
1250	51.7
1600	44.6
2000	37.9
2500	32.6
3150	27.3
4000	24.6
5000	22.6



<sup>1</sup> Background noise too high

Bewertung nach ISO 717-2  
 $L'_{nT,W}(C_1) = 63.1$  ( -1 ) dB  $C_{1,50-2500} = 0$  dB  
 Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen,  
 die in Terzbändern gewonnen wurden.

Company: Berner Fachhochschule  
 Nr. des Prüfberichtes: Sébastien Bonifacio und Jan Maurer  
 Datum: 20.04.2021 Unterschrift:

B 52  
 Trittschallpegel

Ergebnis der Luft- und Trittschallmessung der Geschosdecke im 1. OG im Gebäude I

Es wird der Standard-Trittschallpegel  $L'_{nT}$  in jedem Terzintervall sowie die daraus abgeleitete Einzulangabe bewerteter Standard-Trittschallpegel  $L'_{nT,W}$  und die zugehörigen Spektrumanpassungswerte  $C_1$  und  $C_{f,50-2500}$  gezeigt.

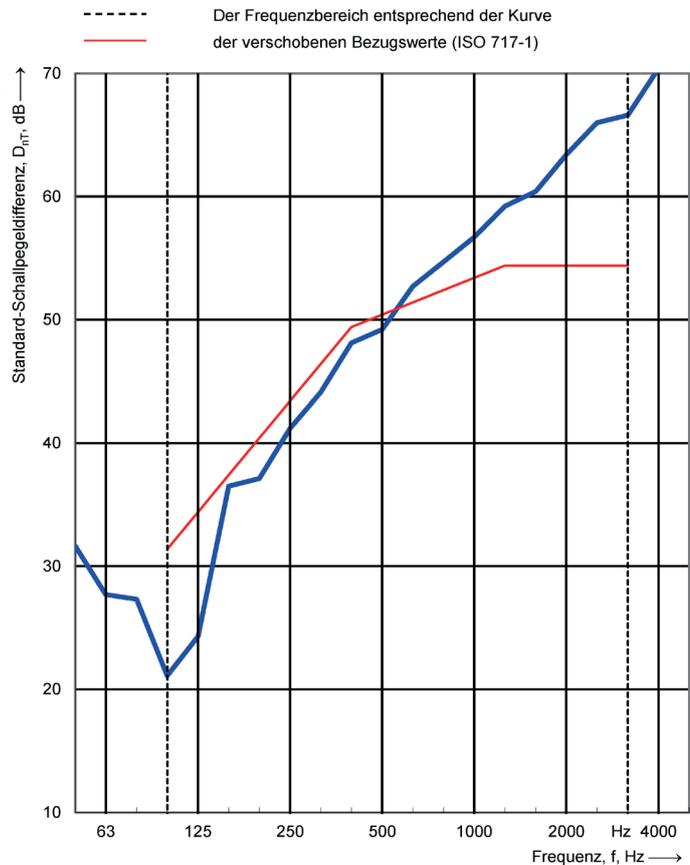
### Standard-Schallpegeldifferenz nach ISO 16283-1

Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden

Auftraggeber: VetaNova Prüfdatum: 16.04.2021  
 Aufbau: Parkett, Estrichelement, Bodenheizungsplatte, OSB-Platte schwimmend auf Isofloc Dämmung mit Rieselschutz.  
 Flankierende Bauteile: zwei Vollholzaussenwände, zwei Vollholzinneiwände  
 Objekt: Referenzgebäude I, Decke 1.OG, Empfangsraum Hobbyraum, Senderraum Wohnen

Fläche S des Trennbauteils: 16.09 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: 116.4 m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraum: 30.2 m<sup>3</sup>

Frequenz f [Hz]	D <sub>nT</sub> Terz [dB]
50	31.6
63	27.7
80	27.3
100	21.1
125	24.3
160	36.5
200	37.1
250	41.2
315	44.1
400	48.1
500	49.2
630	52.7
800	54.7
1000	56.7
1250	59.2
1600	60.4
2000	63.4
2500	66.0
3150	66.6 <sup>1</sup>
4000	70.4 <sup>1</sup>
5000	71.4 <sup>1</sup>



<sup>1</sup> Background noise too high

**Bewertung nach ISO 717-1**  
 $D_{nT,w}(C;C_{tr}) = 50.4$  ( -4 ; -11 ) dB  
 Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden.  
 $C_{50-3150} = -4$  dB  $C_{50-5000} = -3$  dB  $C_{100-5000} = -3$  dB  
 $C_{tr,50-3150} = -12$  dB  $C_{tr,50-5000} = -12$  dB  $C_{tr,100-5000} = -11$  dB

Company: Berner Fachhochschule  
 Nr. des Prüfberichtes: Sébastien Bonifacio und Jan Maurer  
 Datum: 20.04.2021 Unterschrift:

B 53  
 Schallpegeldifferenz  
 Ergebnis der Luft- und Trittschallmessung der Geschossdecke im 1. OG im Gebäude I

Es wird die Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT}$  in jedem Terzintervall sowie die daraus abgeleitete Einzulangabe bewertete Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT,w}$  und die zugehörigen Spektrumanpassungswerte C und  $C_{tr}$  gezeigt.

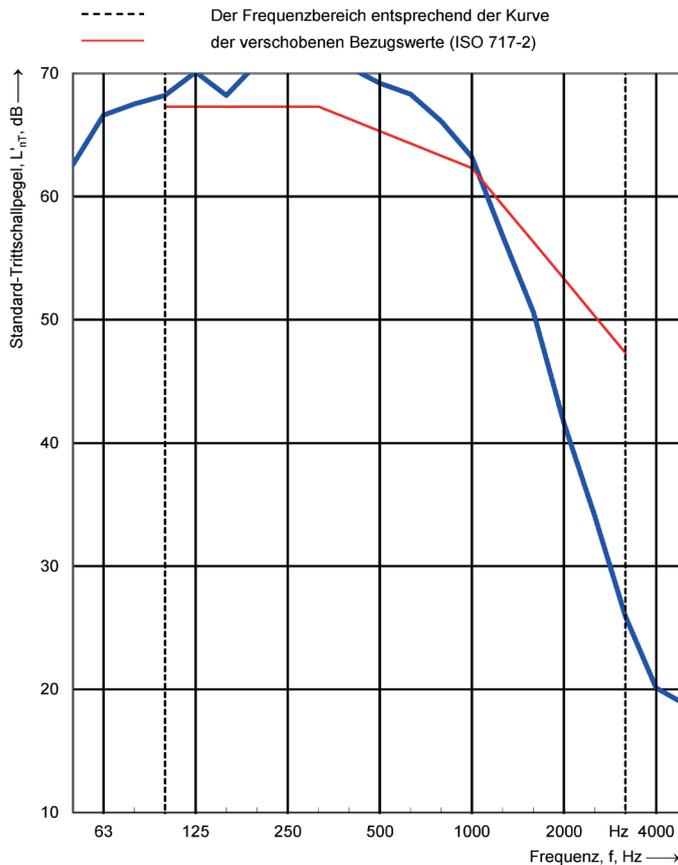
### Standard-Trittschallpegel nach ISO 16283-2

Messung der Trittschalldämmung von Decken in Gebäuden

Auftraggeber: VetaNova Prüfdatum: 16.04.2021  
 Aufbau: Riemenboden geklebt, Estrichelement, Bodenheizungsplatte, OSB-Platte schwimmend auf Isofloc Dämmung mit Rieselschutz, Bestandsdecke aus Dielbaumbrettern  
 Objekt: Flankierende Bauteile: zwei Vollholzaussenwände, zwei Vollholzinneiwände  
 Referenzgebäude II, Decke 1.OG, Empfangsraum Schlafzimmer EG, Senderraum Wohnen 1.OG

Volumen des Senderraumes: 37.74 m³  
 Volumen des Empfangsraum 36.5 m³

Frequenz f [Hz]	L'_{nT} Terz [dB]
50	62.6
63	66.6
80	67.5
100	68.2
125	70.1
160	68.2
200	70.8
250	70.4
315	72.3
400	70.5
500	69.2
630	68.3
800	66.1
1000	63.2
1250	56.8
1600	50.6
2000	41.6
2500	34.1
3150	25.9
4000	20.1
5000	18.7



<sup>1</sup> Background noise too high

Bewertung nach ISO 717-2  
 $L'_{nT,W}(C_i) = 65.3$  ( -1 ) dB  $C_{i,50-2500} = -1$  dB  
 Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

Company: Berner Fachhochschule  
 Nr. des Prüfberichtes: Sébastien Bonifacio und Jan Maurer  
 Datum: 20.04.2021 Unterschrift:

B 54  
 Trittschallpegel

Ergebnis der Luft- und Trittschallmessung der Geschosdecke im 1. OG im Gebäude II

Es wird der Standard-Trittschallpegel  $L'_{nT}$  in jedem Terzintervall sowie die daraus abgeleitete Einzulangabe bewerteter Standard-Trittschallpegel  $L'_{nT,W}$  und die zugehörigen Spektrumanpassungswerte  $C_i$  und  $C_{f,50-2500}$  gezeigt.

### Standard-Schallpegeldifferenz nach ISO 16283-1

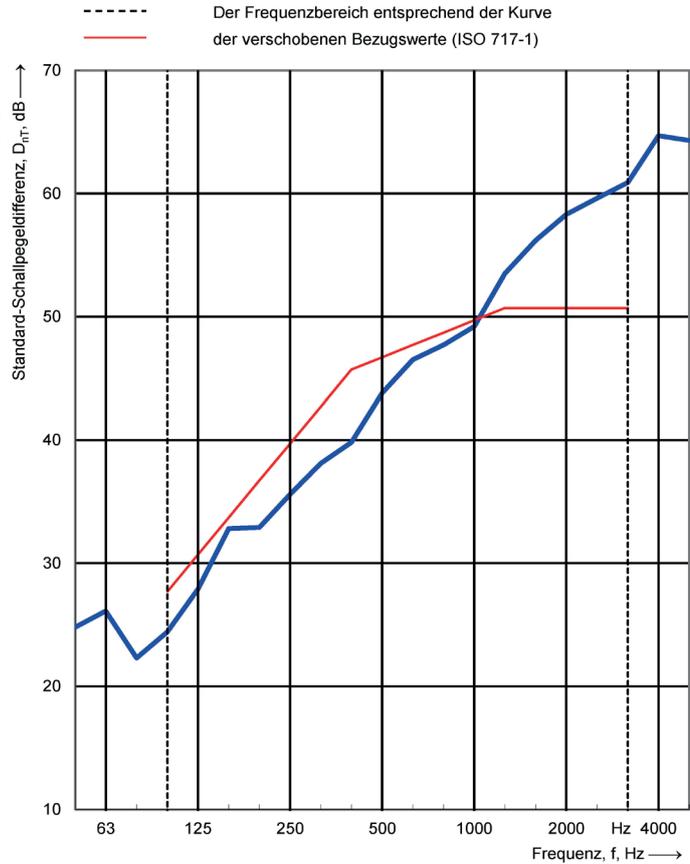
Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden

Auftraggeber: VetaNova Prüfdatum: 16.04.2021  
 Aufbau: Riemenboden geklebt, Estrichelement, Bodenheizungsplatte, OSB-Platte schwimmend auf Isofloc Dämmung mit Rieselschutz, Bestandsdecke aus Dielbaumbrettern

Objekt: Flankierende Bauteile: zwei Vollholzaussenwände, zwei Vollholzzinnenwände  
 Referenzgebäude II, Decke 1.OG, Empfangsraum Schlafzimmer, Senderaum Wohnen

Fläche S des Trennbauteils: 19.72 m<sup>2</sup>  
 Volumen des Senderraumes: 37.7 m<sup>3</sup>  
 Volumen des Empfangsraum: 36.6 m<sup>3</sup>

Frequenz f [Hz]	D <sub>nT</sub> Terz [dB]
50	24.8
63	26.1
80	22.3
100	24.4
125	27.9
160	32.8
200	32.9
250	35.6
315	38.1
400	39.8
500	43.8
630	46.5
800	47.7
1000	49.2
1250	53.5
1600	56.2
2000	58.3
2500	59.6
3150	60.9
4000	64.7
5000	64.3



B 55  
 Schallpegeldifferenz

Ergebnis der Luft- und Trittschallmessung der Geschossdecke im 1. OG im Gebäude II

Es wird die Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT}$  in jedem Terzintervall sowie die daraus abgeleitete Einzelaussage bewertete Standard-Schallpegeldifferenz  $D_{nT,w}$  und die zugehörigen Spektrumanpassungswerte C und  $C_{tr}$  gezeigt.

Bewertung nach ISO 717-1  
 $D_{nT,w}(C;C_{tr}) = 46.7$  ( -1 ; -6 ) dB  
 Die Ermittlung basiert auf Gebäude-Messungen, die in Terzbändern gewonnen wurden.

$C_{50-3150} = -2$  dB  $C_{50-5000} = -1$  dB  $C_{100-5000} = -1$  dB  
 $C_{tr,50-3150} = -8$  dB  $C_{tr,50-5000} = -8$  dB  $C_{tr,100-5000} = -7$  dB

Company: Berner Fachhochschule  
 Nr. des Prüfberichtes: Sébastien Bonifacio und Jan Maurer  
 Datum: 20.04.2021 Unterschrift:

Die Messergebnisse für den Luft- und den Trittschallschutz der Geschossdecken sind in Tabelle T 30 zusammengestellt. Ein Vergleich mit den Anforderungen nach SIA 181 ergibt, dass diese Messergebnisse für den Luft- und den Trittschallschutz die Mindestanforderungen der SIA 181 deutlich verfehlen.

#### Verbesserungsmaßnahmen

Bei beiden untersuchten Geschossdecken wurden die Fermacell Elemente auf Holzfaserplatten aufgebracht. Damit sind die Holzfaserplatten so steif, dass die Resonanzfrequenz des schwimmenden Unterlagbodens in der Größenordnung von 500 Hz bis 680 Hz liegt. Hierdurch wird die Wirksamkeit des schwimmenden Unterlagbodens auf den Trittschallschutz sehr begrenzt.

Um die Wirksamkeit des schwimmenden Unterlagsbodens zu erhöhen, sollte der Fussbodenaufbau wie folgt modifiziert werden:

- 25 mm Fermacell Estrich-Element 2 E 22
- 20 mm Mineralwolle/Holzfaserplatte  $s' = 30 \text{ MN/m}^3$
- 60 mm Wabenschüttung,  $m' = 66 \text{ kg/m}^2$

Nach den Unterlagen der Firma Fermacell sollte dies eine Verbesserung der Trittschalldämmung in der Größenordnung von  $L_{n,T,w} + C_i = \text{ca. } 53 \text{ dB} + 4 \text{ dB}$  erbringen. Allerdings handelt es sich hierbei um grobe Abschätzung. Daher muss sowohl der erzielte Luft- als auch der Trittschallschutz der sanierten Decke an einer Musterdecke im Objekt festgestellt werden.

T 30 Zusammenstellung der Einzulangaben der Schallmessungen

Richtung	Senderraum	Empfangsraum	Luftschallschutz $D_{n,T,w} + C$	Trittschallschutz $L'_{n,T,w} + C_i$
vertikal	Wohnen, 1.OG	EG Schlafzimmer	46 dB	65 dB
vertikal	Essen, 1.OG	Hobbyraum, EG	46 dB	63 dB

Falls eine weitere Erhöhung des Qualitätsniveaus des Trittschallschutzes erforderlich ist, ist noch zusätzlich eine abgehängte Decke unter der Dielbaumdecke einzubringen. Diese abgehängte Decke ist mit einer 15 mm dicken Gipsfaserplatten (z.B. Fermacell) zu beplanken und mit elastischen Federhängern abzuhängen.

Damit ergibt sich folgender Aufbau der abgehängten Decke:

- 100 mm Hohlraum
- 15 mm Gipsfaserplatte (z.B. Fermacell) als Beplankung, Fugen verspachtelt, an den Rändern schalldicht angeschlossen, mit 50 mm dicker, vollflächiger Mineralwolleauflage zur Hohlraumbedämpfung

Die Resonanzfrequenz der abgehängten Decke ist so abzustimmen, dass diese unterhalb von 50 Hz liegt.

Die Maßnahmen zur Verbesserung des Trittschallschutzes werden auch zu einer Verbesserung des Luftschallschutzes der sanierten Decken dienen, da schwimmende Unterlagsböden und abgehängte Decken akustisch wirksame Vorsatzschalen darstellen, die auch den Luftschallschutz verbessern.

## Literatur

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/forschung-und-zusammenarbeit/forschung-und-entwicklung.html>, am 05.08.2021

Der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK), <https://www.geak.ch/>, am 05.08.2021

Der Gebäudeenergieausweis der Kantone (GEAK), Ist-Zustand beurteilen und Sanierung planen, [https://www.geak.ch/media/basis-broschuere\\_2021\\_a4\\_leporello\\_de\\_web.pdf](https://www.geak.ch/media/basis-broschuere_2021_a4_leporello_de_web.pdf), am 05.08.2021

Konferenz Kantonaler Energiedirektoren (EnDK), <https://www.endk.ch/de/fachleute-1/energienachweis>, am 05.08.2021.

Kölsch, Ph. (2017). Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany. Ergänzte und editierte Fassung 01/2017.

Sedlbauer, K. (2001) Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart

Wehle, B., Geyer, Ch. (2022a) Gebäudeerneuerung Oberwallis - Heizwärmebedarfsberechnung zur Ermittlung der Dicke der innenliegenden Wärmedämmung; Forschungsbericht zu AP 6 Bauphysik und Baukonstruktion, Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau; Berichtsnummer 74FE-009519-K-01\_28941.1.IP-FB-08

Wehle, B., Geyer, Ch. (2022b) Gebäudeerneuerung Oberwallis-Randbedingungen, Beurteilungskriterien und Ergebnisse der Simulationsrechnungen der Feuchte- und Wärmeströme in unsanierten sowie sanierten Massivholzwänden; Forschungsbericht zu AP 6 Bauphysik und Baukonstruktion, Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau; Berichtsnummer 74FE-009519-K-01\_28941.1.IP-FB-06

WUFI® Leitfaden zur Verwendung der Infiltrationsquelle in WUFI®, Stand: August 2017 [https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.08\\_Infiltration.pdf](https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.08_Infiltration.pdf), am 05.08.2021

WUFI® Leitfaden zur Berechnung von geneigten Dächern, Stand: November 2017 [https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.11\\_Leitfaden\\_GeneigtesDach.pdf](https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.11_Leitfaden_GeneigtesDach.pdf), am 05.08.2021

Zirkelbach, D., Künzel, H.M., Schafaczek, B., Borsch-Laaks, R. (2009) Dampfkongression wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen, Conference «Trends in High Performance Buildings and the Role of Ventilation»

## Normen und Richtlinien

Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) Ausgabe 2014, deutsche Version; 9. Januar 2015

SIA 181:2000 Schallschutz im Hochbau, SIA Schweizer Ingenieur und Architekt, Zürich, Schweiz.

SIA 380/1:2016, Heizwärmebedarf, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.

SIA 380/1:2009 Thermische Energie im Hochbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.

Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE) Ausgabe 2014, Nachführung 2018 - aufgrund geänderter Normen, deutsche Version; 20 April 2018

DIN 4108-3:2018 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland

Merkblatt SIA 2028:2010 Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.

SN EN 15026:2007 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.

WTA Merkblatt 6-2:2014-12 Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Stuttgart, Deutschland

DIN 68800-1:2019-06, Holzschutz - Teil 1: Allgemeines, Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland

WTA Merkblatt 6-8:2016-08 Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Stuttgart, Deutschland

WTA-Merkblatt 6-5:2014-04, Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmssystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Stuttgart, Deutschland

DIN EN 12087:2013-06, Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen; Deutsche Fassung, Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin, Deutschland

SIA 180:2014 Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Schweiz.

## Software (zuletzt abgerufen am 05.05.2021)

Lesosai, Version 2019 (build 1125), <https://lesosai.com/?lang=de>

Delphin, <https://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>

WUFI® 2D, Version 4.2, Datenbank Version 27.0.5.0, <https://wufi.de/de/software/wufi-2d/>

WUFI® Pro, Version 6.4, Datenbank Version 27.0.5.0, <https://wufi.de/de/software/wufi-pro/>

WUFI® <https://wufi.de/de/>

Flixo, Version 8.1, <https://www.flixo.de/>

## Kontakt

ARGE Dorfkernerneuerung Oberwallis  
p.a. Monika Holzegger  
Geschäftsstelle

info@vetanova.ch  
www.vetanova.ch

Dieses Projekt wurde gefördert durch  
Innosuisse - Schweizerische Agentur  
für Innovationsförderung



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Innosuisse - Schweizerische Agentur  
für Innovationsförderung

## Nationale Partner

**fermacell®**

**fisolan.ch**  
Die Dämmstoffe aus Schafwolle  
L'isolation de la laine des moutons



**GUTEX®**

**JOMOS**  
Fire Protection Solutions

**SIGA** 1966

## Regionale Partner

**abgottspon  
werlen  
architekten**

**anton imhof  
ingenieurbüro**  
Dipl.-Ing. ETH-BA  
3993 Groggiols  
Tel. 027 927 10 07  
zurtruggen.salver@bluewin.ch

**ATELIER SUMMERMATTER RITZ**  
ARCHITECTUR ETH-BA  
FURKASTRASSE 7  
3900 BRIG  
SCHWEIZ  
www.summERMATTERritz.ch  
info@summERMATTERritz.ch

**farbe + gips ag**  
JOSEF WÄLDEN WÄLKER

**holzbau  
weger**

**HN**  
HOLZBAU NOLL

**imhof lax**

**KK**  
KURT KARLEN AG  
BAU- UND MÖBELSCHREINEREI

**Lauber  
IWISA**  
Gebäudetechnik, die verbindet.

**Perren AG**  
SCHREINEREI  
IDEEN IN HOLZ

**SRP** SRP INGENIEUR AG

**TRUFFER**  
ingenieurberatung

## Forschungspartnerin



Berner  
Fachhochschule