Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 30.01.2013

Nachhaltige Erneuerung historisch wertvoller Bauten

Arbeitspaket 5: Innenliegende Wärmedämmung

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE

Sektion Energieforschung

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau

Solothurnstrasse 102, Postfach 6096

CH-2504 Biel-6

www.ahb.bfh.ch

Autoren:

Prof. Dr. Christoph Geyer, BFH AHB, christoph.geyer@bfh.ch

Elisa Díguele Jiménez, BFH AHB, elisa.diguele@bfh.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. P. Previdoli

BFE-Programmleiter: Dr. R. Schmitz

BFE-Vertragsnummer: 154100

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

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird die Funktionsfähigkeit des Feuchteschutzes historischer Aussenwänden mit Innendämmsystemen untersucht. Hierfür werden zunächst die feuchtetechnischen Eigenschaften historischer Backsteinsorten analysiert. Die feuchtetechnische Funktionsfähigkeit der Innendämmsysteme wird dann mittels hygrothermischer Bauteilsimulationen mit dem Programm WUFI® überprüft. Diese Simulationen werden für Innendämmsysteme mit den Wärmedämmstoffen Steinwolle, Glas-wolle, Holzfaserdämmung, Zellulose und Schaumglas durchgeführt. Für die Analyse werden realitätsnahe, langfristige klimatische Randbedingungen des Standorts Zürich benutzt. Die so berechneten Wassergehalte in den Schichten werden mit den Versagenskriterien der einzelnen Bauteilschichten, wie der Frostsicherheit des Backsteins, dem Risiko von Schimmelpilzbildung oder der Feuchte-schäden bei Holzwerkstoffen im Dämmsystem beurteilt. Als Ergebnis der Simulationen werden die Eigenschaften der Bestandswand, die für die langfristige Funktionsfähigkeit des Innendämmsystems erforderlich sind, identifiziert. Der Wärmeschutz der typischen Wärmebrücken an Rändern und Durchdringungen von Innendämmsystemen wird berechnet. Die Ergebnisse zur Beurteilung des Wärmeschutzes der Wärmebrücken werden in Form von f_{Rsi}- und Ψ -Werten in einem Wärmebrückenkatalog zusammengefasst. Aus den Simulationsergebnissen werden Planungshinweise für Planer und Ausführende entwickelt und in einem Katalog zusammengestellt.

Résumé

Dans le cadre de ce travail de recherche, l'étude a porté sur le bon fonctionnement de la protection contre l'humidité des murs extérieurs historiques en présence d'un système d'isolation intérieur. Pour cela, l'analyse s'est d'abord centrée sur les caractéristiques des sortes de briques historiques. Le bon fonctionnement technique, relatif à l'humidité, des systèmes d'isolation intérieurs a été vérifié, avec le programme WUFI®, au moyen de simulations hygrométriques des éléments de construction. Ces simulations ont été exécutées pour des systèmes d'isolation intérieure en laine de pierre, laine de verre, fibres de bois, cellulose et verre cellulaire. Les conditions climatiques utilisées pour l'analyse sont celles marginales locales à long terme de Zurich, proches de la pratique. Les taux d'humidité ainsi calculés dans les couches ont été évalués en fonction des critères de défaillance des différentes strates d'éléments, tels que la résistance au gel de la brique de terre cuite, le risque de formation de moisissures ou les dégâts, dus à l'humidité, aux dérivés du bois dans les systèmes d'isolation. Les résultats des simulations sont l'identification des caractéristiques du mur existant nécessaires au bon fonctionnement du système d'isolation intérieure. La protection contre le froid des ponts thermiques typiques dans les bords et les pénétrations des systèmes d'isolation intérieure ont été calculés. Les résultats pour l'évaluation de la protection contre le froid précitée ont été rassemblés, sous forme de valeurs f_{Rsi} et Ψ, dans un catalogue des ponts thermiques. Des indications de planification pour les projeteurs et les exécutants ont été développées sur la base des résultats des simulations et rassemblées dans un catalogue.

Abstract

Within the context of this research study the functional capability of moisture protection for historical buildings with interior insulation systems will be investigated. For this purpose initially the moisture properties of a selection of historical bricks will be analysed. The functional capability of the interior insulation system concerning moisture will then be simulated within a hygrothermal simulation using the software WUFI®. These simulations for interior insulation systems will be carried out for the insulation materials rock wool, glass wool, wood fibre insulation, cellulose and foam glass. The analysis is based on close to reality and long-term climatic boundary conditions for the location Zürich. The calculated moisture contents of the different layers will then be evaluated in terms of failure criteria of the individual material layers for example for the frost durability of the brick, the risk of mould growth or the risk of moisture damages regarding timber products within the insulating system. As result of the simulations the characteristic values of the existing wall, which are required for a long-term functional capability of the interior insulation system, will be identified. Characteristic values of typical heat bridges at edges and penetrations of the interior insulation system will be calculated and summarized in a catalogue showing f_{Rsi}- and Ψ -values. Based on the simulation results a catalogue with planning instructions is designed, which is for planners and persons, who implement interior insulation systems.

INHALTSVERZEICHNIS

1 Vorwort ... 7

2 Einleitung ... 8

2.1 Ausgangslage ... 8

2.2 Zielsetzung ... 8

2.3 Vorgehensweise ... 9

3 Hygrothermische Simulationen ... 10

3.1 Simulationsprogramm WUFI® ... 10

3.2 Eingabeparameter ... 10

3.2.1 Geometrie ... 10
3.2.2 Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie Funktionen ... 10
3.2.3 Klimadaten ... 11
3.2.4 Zeitdauern der Simulationen ... 12
3.2.5 Randbedingungen ... 13
3.2.6 Anfangsbedingungen ... 14

4 Konstruktive Analyse des Bestandes ... 16

4.1 Konstruktionen ... 16

4.2 Materialien ... 17

4.2.1 Mauersteine ... 17
4.2.2 Putze und Mörtel ... 19

4.3 Eingabe der Bauteilaufbauten in WUFI® ... 21

5 Versagenskriterien ... 23

5.1 Jahresverlauf des Gesamtwassergehalts des Bauteils ... 24

5.2 Frostsicherheit im Bauteil ... 24

5.3 Vermeidung von Oberflächenkondensat und Schimmelpilzbefall an der Innenoberfläche 31

5.3.1 Vermeidung von Oberflächenkondensat ... 31
5.3.2 Schimmelpilzfreiheit an der Innenoberfläche ... 31

5.4 Maximal zulässiger Wassergehalt und Vermeidung von Schimmelpilz im Dämmsystem 33

5.4.1 Maximal zulässiger Wasser- und Feuchtegehalt in der Dämmschicht ... 34
5.4.2 Maximal zulässiger Feuchtegehalt im Grenzbereich Bestand – Innendämmsystem 35

5.5 Wärmeschutz im Winter und energetische Anforderungen an die Gebäudehülle ... 38

5.5.1 Wärmeschutz im Winter nach SIA 180:1999 ... 38
5.5.2 Anforderungen an Aussenwände nach SIA 380/1:2009 ... 38
5.5.3 Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient ... 39

6 Feuchte- und Wärmetechnische Analyse der Bestandswand ... 40
6.1 Feuchtetechnische Analyse des Bestandes ... 40
6.2 Wärmeschutz ... 48
6.3 Frost-Tau-Wechsel in der Bestandswand ... 49
7 Innendämmsysteme ... 52
7.1 Allgemeines ... 52
7.1.1 Vor- und Nachteile von Innendämmmassnahmen ... 52
7.1.2 Dampfbremsende und dampfsperrende Schichten ... 53
7.1.3 Feuchteadaptive Dampfbremse ... 54
7.1.4 Kapillaraktive Dämmstoffe ... 55
7.1.5 Dämmsysteme ohne Dampfbremse ... 55
7.2 Wärmeschutz der Innendämmsysteme ... 55
7.3 Innendämmsysteme ... 56
7.3.1 Mineralwolledämmung ... 57
7.3.2 Zellulosedämmung ... 60
7.3.3 Holzfaserdämmplatte ... 63
7.3.4 Schaumglasdämmung ... 65
7.4 Berechnete Varianten des Bestands mit Innendämmsystemen ... 66
8 Ergebnisse der Simulationen ... 67
8.1 Auswertung der Versagenskriterien ... 67
8.1.1 Vergleich West und Nord-West Orientierung ... 67
8.1.2 Frostsicherheit im Bauteil ... 68
8.1.3 Vermeidung von Kondensat und Schimmelpilz an der inneren Oberfläche ... 73
8.1.4 Gesamtwassergehalt im Bauteil ... 74
8.1.5 Maximal zulässiger Wassergehalt und Vermeidung von Schimmelpilz im Dämmsystem ... 76
8.1.6 Wärmeschutz ... 77
8.2 Allgemeine Planungshinweise ... 81
8.2.1 Bestandsaufnahme ... 81
8.2.2 Innere Bauteilschichten ... 82
8.2.3 Unterkonstruktion des Innendämmsystems ... 82
8.2.4 Luftdichtheitsebene ... 82
8.2.5 Feuchtevariable Dampfbremsen in Feuchträumen ... 83
8.2.6 Wärmebrücken an Bauteilanschlüssen ... 83
8.2.7 Einfluss des Innendämmsystem auf den Schallschutz ... 83
9 Schlussfolgerungen ... 84
10 Ausblick ... 85
11 Wärmebrückenkatalog ... 86
12 Literaturverzeichnis ... 87
A 1 Anhang ... 89
A 1.1 Materialkenndaten für die Simulation ... 89
A 2 Anhang Wärmebrückenkatalog ... 90

A 3 Anhang Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Steinwolledämmung 90
A 4 Anhang Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Glaswolledämmung 90
A 5 Anhang Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Zellulosedämmung 90
A 6 Anhang Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Holzfaserdämmung 90
A 7 Anhang Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Schaumglasdämmung 90
A 8 Planungshinweise 90

1 VORWORT

Der aktuelle Primärenergieverbrauch des schweizerischen Gebäudeparks liegt bei knapp 50 % des gesamten Energieverbrauchs. Davon wird etwa 30 % zum Heizen und zur Warmwasserbereitung verwendet [1]. Um die erforderliche Energieeinsparung für eine nachhaltige Entwicklung der Schweiz, sowie das hohe Ziel der Senkung des CO_2 - Ausstosses erreichen zu können, müssen Altbauten energetisch saniert werden. Von 1850 bis 1920 erstellte Bauten umfassen 20 % der beheizten Räume in der Schweiz. Die energetische Sanierung dieser Bauten ist somit zur Einhaltung der oben genannten Ziele notwendig.

Um die Frage nach möglichen Sanierungsmassnahmen zu beantworten, initiierte das CCEM (Competence Center Energy and Mobility) das Forschungsprojekt SuRHiB (Sustainable Renovation of Historical Buildings). Das Projekt wird vom Bundesamt für Energie (BFE) gefördert und ist in sieben Arbeitspakete unterteilt. Die in dieser Forschungsarbeit vorgestellten Untersuchungen beziehen sich auf Arbeitspaket 5 „*Entwicklung von Lösungen für robuste Innendämmsysteme*“. Als Grundlagen dienen die in Arbeitspaket 1 (ETH-IDB) „*Charakterisieren von Bauweise und Zustand erhaltenswerter Wohnbauten“* [2] durchgeführten Bestandsuntersuchungen erhaltenswerter Wohnbauten sowie die in Arbeitspaket 3 (EMPA) „*Analyse der Klimabelastung schützenswerter Fassaden“* [3] durchgeführte Analyse verschiedener Klimastandorte der Schweiz.

2 EINLEITUNG

Bei historischen Bauten aus der Zeit von 1850 bis 1920 sind Aussendämmungen oft nicht erlaubt bzw. nicht machbar. Um solche Bauten energetisch zu verbessern und das Einsparpotential zu nutzen, ist das Anbringen einer innenliegenden Wärmedämmung notwendig. Diese Massnahme hat in bauphysikalischer Hinsicht Auswirkungen auf die bestehende Konstruktion. Die Aufgabe des Arbeitspakets 5 des SuRHiB-Projektes ist es, herkömmliche Innendämmsysteme zu untersuchen, und diese zu beurteilen, um schadensfrei funktionierende und energieeinsparende Lösungen aufzuzeigen.

Bei der energetischen Sanierung muss in erster Linie der Wärmeschutz des sanierten Aussenbauteiles gewährleistet werden. Die Wärmeverluste durch die Bauteile der Gebäudehülle sollen minimiert werden. Dadurch werden der Energieverbrauch und damit auch die Emissionen von Abgasen reduziert. Hinsichtlich des Feuchteschutzes ist zu beachten, dass Oberflächenkondensation, Schimmelpilzbildung sowie Schäden des Mauerwerks durch Frosteinwirkung verhindert werden, um die Baukonstruktion zu schützen und ein hygienisches Raumklima sicherzustellen.

Mittels hygrothermischer Bauteilsimulation werden Berechnungen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports durchgeführt, um das bauphysikalische Verhalten des Bestands und des mit einem Innendämmsystem sanierten Bauteiles zu evaluieren. Mit den hygrothermischen Untersuchungen werden die unterschiedlichen Einflussparameter systematisch untersucht. Dabei werden alle Parameter betrachtet, die einen Einfluss auf die Funktionstüchtigkeit von Innendämmungen haben. Dazu zählen u.a. der Schlagregeneinfluss, die Mauerwerksart, der Backsteintyp, die Wasseraufnahme des Aussenputzes und die unterschiedlichen Eigenschaften der Innendämmsysteme. Aus dieser Parameterstudie werden Aussagen abgeleitet, unter welchen Voraussetzungen Innendämmsysteme funktionieren.

Des Weiteren gilt es die Gefährdung von Mauerwerk und Putz zu untersuchen. Durch die Innendämmung rücken das Mauerwerk und der innere Putz in den kalten Temperaturbereich. Gleichzeitig entstehen im Winterhalbjahr hohe Luftfeuchten in den Baustoffen, sowie ein Feuchteeintrag durch den Schlagregen. Dies erhöht das Risiko von Frostschäden der bestehenden Wand.

Auch die Detailausbildungen und die damit verbundenen Wärmebrücken müssen so optimiert werden, dass keine Bauschäden entstehen. In diesem Projekt wird daher ein Wärmebrückenkatalog mit den gängigen Konstruktionsdetails erstellt und die für die Beurteilung des Wärmeschutzes der Wärmebrücken notwendigen Kenngrössen berechnet.

2.1 Ausgangslage

Das CCEM Forschungsprojekt *„Nachhaltige Erneuerung historisch wertvoller Bauten“* (Sustainable Renovation of Historical Buildings, SuRHiB) untersucht energieeffiziente Sanierungsmöglichkeiten traditioneller historischer Massivbauten der Schweiz aus der Zeit von 1850 bis 1920, die ursprünglich als Wohngebäude erstellt wurden. Diese tragen zum kulturellen Erbe bei, indem sie das Stadtbild der Innenstädte und Dorfkerne massgebend gestalten. Meist stehen sie nicht unter Denkmalschutz.

Es ist notwendig, Lösungen zu entwickeln, um den Energieverbrauch dieser Gebäude zu reduzieren. Die zu entwickelnden Massnahmen sollen das Energieeinsparpotenzial ausschöpfen, das Erscheinungsbild dieser Bauten erhalten und gleichzeitig die Gebäude vor dem Zerfall schützen.

2.2 Zielsetzung

Das vom Competence Center Energy and Mobility (CCEM) initiierte und vom Bundesamt für Energie (BFE) geförderte Projekt ist in sieben Arbeitspakete unterteilt. Ziel des Arbeitspakets 5 „*Entwicklung*

von Lösungen für robuste Innendämmsysteme“ ist die Untersuchung schadensfrei funktionierender Innendämmlösungen, dessen Ergebnisse in vorliegendem Bericht beschrieben werden.

Im Fokus der Untersuchungen des Arbeitspakets 5 steht die Klärung der Risiken durch Feuchtebelastung von Mauerwerk und Wärmebrücken unter Berücksichtigung der Konstruktion und Exposition der Fassade. Mittels hygrothermischer Bauteilsimulation werden die wichtigsten Einflussparameter und Anwendungsgrenzen ermittelt, innerhalb derer Innendämmmassnahmen schadensfrei ausgeführt werden können. Dabei kommen Resultate der anderen Arbeitspakete zur Anwendung. In diesem Zusammenhang ist vor allem Arbeitspaket 1 [2] zu nennen, in welchem vom Institut für Denkmalpflege und Bauforschung (IDB) im Bereich der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Konstruktionen verschiedener Referenzgebäude analysiert wurden. Diese Quelle dient als Grundlage für die Festlegung der Bauteilaufbauten unserer Forschungsarbeit. Im Arbeitspaket 3 wurden unter anderem sechs für die Schweiz repräsentative Klimadatensätzen der MeteoSwiss durch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) Dübendorf zusammengestellt und analysiert. Der Klimadatensatz Zürich-Fluntern wird für die Simulationen in Arbeitspaket 5 verwendet.

Durch die Sanierungsmassnahmen soll zum einen die Einhaltung des Wärmeschutzes bzw. des Feuchteschutzes nach SIA Norm 180:1999 gewährleistet werden. Die Anforderungen an Behaglichkeit und Oberflächenkondensatfreiheit gemäss SIA 180:1999 Tabelle 8 sind ein Wärmedurchgangskoeffizient der vertikalen Wand $U \leq 0.4$ W/m²K. Darüber hinaus ist eine Verbesserung des Wärmeschutzes nach SIA Norm 380/1 erstrebenswert. Dafür muss der Grenzwert des flächenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten von $U \leq 0.25$ W/m²K gemäss den Einzelanforderungen für Umbau oder Umnutzung nach Tabelle 3a dieser Norm für eine bestehende Aussenwand erreicht werden. Ferner ist der Schutz der bestehenden Gebäudesubstanz zu gewährleisten bzw. durch die Sanierungsmassnahmen darf keine Beeinträchtigung der Konstruktionen verursacht werden.

Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Erstellung eines Wärmebrückenkataloges für Planende und Handwerker, der Informationen zu den Wärmebrücken enthält, die an den konstruktiven Anschlüssen der ausgewählten Sanierungsmassnahmen entstehen.

Aus den so gewonnenen Erkenntnissen wird ein Ergebniskatalog für Planende und Handwerker erstellt, um das Energiesparpotenzial von Innendämmungen zu nutzen, ohne dass es zu Bauschäden kommt. Die Unterlagen dienen einer besseren Einschätzung und Beurteilung von Innendämmsystemen.

2.3 Vorgehensweise

In einem ersten Schritt werden die gängigen Wandkonstruktionen des Gebäudebestands analysiert (s. Kap. 4). Auf Basis der Bestandsanalyse in Arbeitspaket 1 wird der Schichtaufbau der bestehenden Konstruktionen bestimmt. In einem zweiten Schritt wird eine detaillierte Untersuchung der ausgewählten Bestandskonstruktionen mit und ohne Innendämmsystem mittels hygrothermischer Bauteilsimulationen mit dem Programm WUFI® (Wärme- und Feuchtetransport instationär) des Fraunhofer Instituts für Bauphysik durchgeführt. Mit dieser Untersuchung werden die Bestandskonstruktionen bauphysikalisch analysiert. Die untersuchten Innendämmsysteme umfassen die Dämmstoffe Steinwolle, Glaswolle, Holzfaser, Zellulose und Schaumglas. Dazu werden verschiedene Aufbauten der Systeme mit unterschiedlichen Zwischenschichten sowie Dampfbremsen überprüft.

Mit Hilfe des Programms „Flixo“ werden die Wärmebrücken der ausgewählten Konstruktionen berechnet und in einem Katalog zusammengefasst.

Abschliessend werden die Ergebnisse interpretiert, zusammengefasst und für Planende und Handwerker in geeigneter Weise aufbereitet.

3 HYGROTHERMISCHE SIMULATIONEN

Neue Methoden in der Bauphysik bieten Ansätze für die Planung und Bewertung von Sanierungsmassnahmen. So finden numerische Berechnungsverfahren zur Beurteilung des instationären hygrothermischen Verhaltens von Konstruktionen seit einigen Jahren eine immer breitere Anwendung in der Forschung, sowie in der Praxis.

Im Gegensatz zu den gängigen Bewertungsverfahren wie beispielsweise dem Nachweis des Wärmeschutzes nach SIA 180:1999 und dem Glaser-Verfahren nach SN EN ISO 13788:2001, bieten die modernen Simulationsverfahren viel mehr Möglichkeiten. So ist es möglich wärme- und feuchtetechnische Speicherphänomene wie auch den Feuchtetransport durch Kapillarleitung zu berücksichtigen. Temperatur- und Feuchteberechnungen werden nicht getrennt voneinander betrachtet, sondern in Abhängigkeit voneinander gelöst. Einflüsse wie Schlagregenereignisse, Baufeuchte, hygroskopische Feuchte und Sommerkondensation können bewertet werden [4].

Die hygrothermische Untersuchung der Konstruktionen in dieser Studie erfolgt mit dem Programm „WUFI Pro“ aus der Softwarefamilie WUFI®. Im Folgenden wird kurz das Funktionsprinzip der Software beschrieben, sowie auf die für die Simulation relevanten Eingabedaten eingegangen.

3.1 Simulationsprogramm WUFI®

KÜNZEL [5] entwickelte auf den physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports ein Differenzialgleichungssystem, mit welchem sich das Feuchteverhalten von mehrschichtigen Bauteilaufbauten bei realistischen Klimabedingungen bestimmen lässt. Dieses Gleichungssystem ist mit Hilfe des Programms WUFI® numerisch lösbar, welches am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt und mit Hilfe der Freilandversuchsstelle Holzkirchen experimentell verifiziert wurde. Es werden die instationäre Temperatur- und Feuchtefelder im Bauteil ermittelt. Für die Berechnungen wird die Programmversion WUFI® 5.1, Release 5.1.0.559.DB.24.71, verwandt.

Als Berechnungsergebnis erhält man die stündlichen Werte der Temperatur- und Feuchtefelder im Bauteil sowie die Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen. Es kann sowohl die örtliche Verteilung von Temperatur, relativer Feuchte und Wassergehalt zu einem bestimmten Zeitpunkt, als auch das Langzeitverhalten hygrothermischer Parameter bestimmt werden.

3.2 Eingabeparameter

3.2.1 Geometrie

Zur Geometrie gehören der Aufbau des zu berechnenden Bauteils und das numerische Gitter. Im Abschnitt 4.3 werden die Bauteilaufbauten der ausgewählten Bestandskonstruktionen beschrieben. Im Abschnitt 7.3 werden die untersuchten Innendämmsysteme behandelt. Die Elementgrösse des zugrunde gelegten numerischen Gitters richtet sich nach dem Schichtaufbau und den lokalen Klimaeinwirkungen. Für die Berechnungen wird das automatisch von WUFI® erstellte numerische Gitter mit der höchsten räumlichen Auflösung-Stufe „fein“ (in Millimeter bis zehntel Millimeter Bereich) ausgewählt.

3.2.2 Thermische und hygrische Stoffkennwerte sowie Funktionen

Als Eingabeparameter für eine Berechnung müssen die Rohdichte, Porosität, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl aller Materialien bekannt sein. Bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen sind auch die Feuchtespeicherfunktion, sowie die Flüssigleitfunktionen für die Beschreibung des Saugvorgangs und der Weiterleitung erforderlich. Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der Sorptionsisotherme und die Saugspannungskurve zusammen.

Im Anhang A 1.1 ist eine Tabelle mit den Kenndaten der verwendeten Baustoffe für die Simulation enthalten.

3.2.3 Klimadaten

Für die Klimaparameter aussen sind die Stundenmittelwerte der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der Solarstrahlung, des Schlag- oder Normalregens und der Windgeschwindigkeit, sowie der Windrichtung notwendig. Für die Berechnungen liegen gemessene Werte des Aussenklimas unterschiedlicher Schweizerischer Standorte vor. Das Innenklima wird nach der Norm prEN 15026 [6] für eine normale Belegung eines Wohnraums (normalen Feuchtelast) angenommen.

Aussenklima:
Im Arbeitspaket 3 wurden die Grundparameter der erzeugten Klimadaten entwickelt, die in der Tabelle 1 dargestellt sind. Durch die repräsentativen Klimadatensätze dieser sechs Messstationen wird es in Zukunft möglich sein, Gebäudekonstruktionen landesweit in der Schweiz hygrothermisch zu simulieren.

Tabelle 1: Grundparameter der erzeugten Klimadaten in Arbeitspaket 3 des SuRHiB Forschungsvorhaben [7]

Station	Höhe über dem Meeresspiegel	Normalregen	Schlagregen		Temperatur	Globalstrahlung
			Ø	max.		
	in m	in mm/a	in mm/a		in °C	in W/m²
Basel-Binningen	316	521	117	167	10.6	129
Davos	1594	675	171	267	3.7	154
La Chaux-de Fonds	1018	1226	295	421	6.7	134
Locarno-Magadino	203	936	150	266	11.7	141
Zürich-Fluntern	555	699	190	266	9.5	127
Genève-Cointrin	420	845	141	204	10.8	143

Für den Zeitraum von 1984 bis 2009 sind neben den in Tabelle 1 aufgeführten Grundparametern zusätzlich die Stundenwerte der relativen Luftfeuchte in %, des Luftdrucks in hPa, der Windrichtung und Windgeschwindigkeit in m/s, der Diffusstrahlung, sowie der langwellige Himmelsstrahlung und der terrestrischen Strahlung in W/m^2 im vollständigen Klimadatensatz enthalten.

Für die hygrothermischen Berechnungen vorliegender Arbeit wird aus Arbeitspaket 3 der Klimadatensatz Zürich-Fluntern herangezogen, da die Grundparameter viele weiterer Schweizer Standorte wie zum Beispiel Altdorf, Bern, Chur, Luzern, Payerne sowie Vaduz denen Zürichs ähneln [7].

Die Klimadaten aus dem Arbeitspaket 3 werden in das Programm WUFI® eingelesen. Die Berechnungen erfolgen für eine nach Westen orientierte Aussenwand, da diese Orientierung die höchste Schlagregenbelastung aufweist. Zum Vergleich mit der nach Westen orientierten Wand wird zusätzlich für jede Backsteinvariante die Berechnung einer nach Nordwesten ausgerichtete Aussenwand mit einer Innendämmstärke von 120 mm durchgeführt. Damit wird der Einfluss des gekoppelten Effektes von geringerer Solareinstrahlung und Schlagregenbeanspruchung auf den Wassergehalt einer nach Nordwest ausgerichteten Wand überprüft. Die Neigung der Aussenwand wird als vertikal (90°) angenommen und die Höhe des Gebäudes wird mit 10 bis 20 m angenommen und damit als mittleres Gebäude eingestuft. Diese Angaben werden von WUFI® benötigt, um die Regen- und Strahlungslasten auf der Oberfläche der Aussenwand zu berechnen [8].

Es gibt im Programm die Möglichkeit die Regenbelastung durch die Schlagregenkoeffizienten R1 und R2 einzustellen. Die Schlagregenkoeffizienten R1 und R2 dienen in WUFI® zur Abschätzung der Schlagregenbelastung auf eine beliebig orientierte und geneigte Bauteiloberfläche. Folgende Beziehung wird dafür verwendet (1):

$$\text{Schlagregen} = \text{Regen} \cdot (\text{R1} + \text{R2} \cdot \text{Windgeschwindigkeit}) \quad (1)$$

R1 und R2 sind stark abhängig von der genauen Position an der Aussenfassade. Für senkrecht stehende Flächen ist R1 null. R2 beträgt für eine von Gebäuden unbeeinflusste freistehende Aussenwand ca. 0.2 s/m, ist an weniger exponierten Stellen in der Mitte einer grösseren Gebäudefassade deutlich kleiner (z.B. 0.07 s/m), an stärker exponierten (an Fassadenkanten oder -ecken) sogar grösser [8].

Für die Berechnungen wird eine normale Regenbelastung einer wenig exponierten Stelle (d.h. in der Mitte einer grösseren Gebäudefassade) ausgewählt, da die betrachteten Gebäude sich i. d. R. in der Innenstadt oder Dorfkernen befinden und sind deshalb nicht wie ein freistehendes Gebäude der Witterung ausgesetzt sind.

Innenklima:
In WUFI® stehen drei verschiedene Modelle für die Innenraumverhältnisse zur Verfügung: Vom Programm generierte sinusförmige Jahresgänge für die Raumluftfeuchte, ein Innenklima nach EN ISO 13788 abhängig vom jeweiligen Aussenklima und ein Innenklima nach prEN 15026 ebenfalls vom jeweiligen Aussenklima abgeleitet. Für die Berechnungen mit den Innendämmsystemen wird das Modell „prEN 15026 mit normaler Feuchtelast“ gewählt, da die Vornorm EN 15026 [6] die Innenraumbedingungen in Abhängigkeit der Aussenluftverhältnisse auf Basis der Temperatur errechnet. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Raumlufttemperatur und –feuchte bestimmte Werte weder unter- noch überschreiten, sich also zwischen diesen Grenzen frei einstellen können. Das bedeutet konkret, dass die Innenlufttemperatur 20 °C beträgt, wenn die Aussenlufttemperatur unter 10 °C liegt. Bei Aussenlufttemperaturen zwischen 10 °C und 20 °C pendelt die Innenlufttemperatur zwischen 20 °C und 25 °C. Bei Aussenlufttemperaturen über 20°C beträgt die Innenlufttemperatur dann konstant 25 °C. Bei der normalen Feuchtelast beträgt die relative Feuchte Innen 30 %, wenn die Aussenlufttemperatur unter -10 °C liegt. Zwischen -10 °C und 20 °C Aussenlufttemperatur pendelt die relative Feuchte innen zwischen 30 % und 60 %. Bei Aussenlufttemperaturen über 20 °C beträgt die innere relative Feuchte dann konstant 60 %.

Langwellige Strahlung:
Der langwellige Strahlungsaustausch der Bauteile kann in den Simulationen berechnet werden, da im Klimadatensatz alle dafür notwendigen Strahlungsdaten enthalten sind. Durch Aktivierung der Einstellung „Explizite Strahlungsbilanz“ in der Simulation wird auch die nächtliche Abkühlung der Bauteile durch Wärmeabstrahlung berücksichtigt.

3.2.4 Zeitdauern der Simulationen

In einem ersten Schritt wird aus dem Klimadatensatz ein repräsentatives Jahr ausgewählt. Das Jahr 1994 ist ein Jahr mit einem mittleren Klima. Um den eingeschwungenen Zustand der Bestandsaussenwände zu erreichen, wird die Konstruktion mit diesem Jahr simuliert, wobei ein Jahr achtmal wiederholt wird. Das hiermit bestimmte Profil der Wassergehalte in der Bestandwand wird dann als Startwert für die nachfolgenden Simulationen der sanierten Wandaufbauten verwandt (s. Abschn. 3.2.6).

Die Simulationen der Wände mit Innendämmsystem starten am 1.10.1984 und enden am 1.10.2009. Sie umfassen also insgesamt einen Zeitraum von 25 Jahren. Diese Berechnung wird für die Auswertung folgender Versagenskriterien herangezogen:

- Frost-Beständigkeit der Bestandswand (s. Abschn. 5.2),
- Schimmelpilz- und Kondensatfreiheit an der Innenoberfläche (s. Abschn. 5.3),
- Maximal zulässiger Wassergehalt und relative Feuchte im Dämmsystem (s. Abschn. 5.4)

Ferner werden die Bauteile mit dem mittleren Jahr 1994, welches zehn Mal wiederholt wird, berechnet. Damit kann ein eingeschwungener Zustand der Bauteile erreicht werden. Diese Berechnungen dienen der Voruntersuchung zum zeitlichen Verlauf des Gesamtwassergehalts des Bauteils (s. Abschn. 5.1).

3.2.5 Randbedingungen

Zu den Randbedingungen gehören Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient, Strahlungsabsorptionsgrad und Regenfaktor, die es an den Bauteilgrenzen zu erfassen gilt. Durch die Steuerparameter werden berechnungsspezifische Parameter wie Rechengenauigkeit und die Anfangsbedingungen eingestellt.

In Tabelle 2 sind die Randbedingungen sowie Steuerparameter, die in der Simulation verwendet werden, aufgelistet.

Tabelle 2: Parameter für die Simulation mit der Software WUFI®

Parameter	Einstellung für die Simulation
Orientierung	Für die Aussenwände wird eine West-Orientierung gewählt. Zum Vergleich wird mit einer Variante auch eine Nord-West Ausrichtung simuliert.
Höhe	Kleines Gebäude bis 10 m Höhe
Wärmeübergangswiderstand	Aussen: 0.0588 m^2/KW (nicht windabhängig) Innen: 0.125 m^2/KW
s_d-Wert	Aussen und innen keine Beschichtung
Explizite Strahlungsbilanz	wird berücksichtigt: Terrestrischer langwelliger Emissionsgrad: 0.90 Terrestrischer langwelliger Reflexionsgrad: 0.10 Terrestrischer kurzwelliger Reflexionsgrad: 0.20 Bewölkungsgrad: 0.66
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	0.4 (Putz normal hell)
Anhaftender Anteil des Regens	0.7 (gemäss Bauteiltyp und Neigung)
Anfangsfeuchte im Bauteil (s. Abschn. 3.2.6)	Feuchteprofil 1: Die Bestandswand wird mit dem Referenzjahr 1994 für 8 Jahre simuliert. Der End-Wassergehalt nach 8 Jahren entspricht dann der Anfangsfeuchte für die Simulation der 25 Jahre. Feuchteprofil 2: Die Anfangsfeuchte der Bestandswand und des Innendämmsystems beträgt 80 % relative Feuchte konstant über das Bauteil.
Anfangstemperatur im Bauteil	20°C konstant über das Bauteil

3.2.6 Anfangsbedingungen

Zu den Anfangsbedingungen der Bauteiloberflächen gehören die Temperatur und die Anfangsfeuchte im Bauteil. Die Anfangstemperatur wird mit 20° C konstant über das Bauteil angenommen. Für die Anfangsfeuchte werden zwei verschiedene Profile betrachtet.

Feuchteprofil 1

Um eine realitätsnahe Feuchteverteilung in der Mauerwerkswand als Startwert für die Simulationen der Wände mit Innendämmsystem zu bestimmen, wird die Bestandswand in einem ersten Schritt mit folgenden Randbedingungen simuliert:

- einem Aussenputz mit einem Wasseraufnahmekoeffizient von $w = 2.0\ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ (s. Abschn. 4.2.2)
- einer konstanten Anfangsfeuchte über das gesamte Bauteil von 80 %
- dem mittleren Jahr 1994 (acht Mal wiederholt)

Dadurch wird das Feuchteprofil für den eingeschwungenen Zustand der Bestandswand errechnet. Die so berechnete Feuchte entspricht dem Profil einer nach West orientierten Bestandswand nach 8 Jahren Bewitterung. In Tabelle 3 sind die Wassergehalte der verschiedenen Bauteilschichten am Anfang und am Ende dieser Simulation für die beiden Backsteinsorten der Bestandswand gegenübergestellt. Der Vergleich der Start- und der Endwerte in Tabelle 3 zeigt, dass die äusseren Bauteilschichten der Bestandswand im eingeschwungenen Zustand höhere Feuchten aufweisen, als am Beginn der Simulation. Der Wassergehalt der inneren Schichten nimmt allerdings im Verlauf der Simulation geringfügig ab.

Der Wassergehalt der Schichten am Ende der Berechnung wird als Startwert (Anfangsfeuchte im eingeschwungenen Zustand) für die Bestandsbauteile bei den Simulationen der sanierten Bauteile, also der Bestandswand mit Innendämmsystem, angesetzt.

Feuchteprofil 2

Bei der üblichen Durchführung von WUFI®-Simulationen wird eine Anfangsfeuchte von 80 % relative Feuchte konstant über das Bauteil angenommen. Diesem Feuchteprofil liegt ein geringerer Wassergehalt entsprechend der Ausgleichfeuchte bei 80 % relativer Feuchte zur Grunde (s. Spalte „Anfang Rechnung“, Tabelle 3) als beim Feuchteprofil 1. Die Simulationen werden daher auch mit diesem Feuchteprofil durchgeführt, um einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Feuchtegehalten im Bestandsmauerwerk herzustellen.

Tabelle 3: Wassergehalt der Schichten einer Bestandswand am Anfang und am Ende der Simulation im eingeschwungenen Zustand nach 8-maliger Wiederholung des Jahres 1994 mit folgenden Randbedingungen: Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes von w = 2.0 kg/(m² h$^{0.5}$) und einer konstanten Anfangsfeuchte über das gesamte Bauteil von 80 %

Wassergehalt in kg/m³	Vollbackstein ZC		Vollbackstein HWZ	
	250 mm		250 mm	
Schicht/ Material	Anfang Rech.	Ende Rech.	Anfang Rech.	Ende Rech.
Kalkzementputz	45.00	77.39	45.00	79.65
Äussere Zentimeter des Backsteins	3.10	5.91	11.80	80.57
Mittlere 23 cm des Backsteins	3.10	5.52	11.80	57.78
Innerer Zentimeter des Backsteins	3.10	2.72	11.80	10.63
Kalkputz	30.00	23.81	30.00	25.33

Wassergehalt in kg/m³	Vollbackstein ZC		Vollbackstein HWZ	
	510 mm		510 mm	
Schicht/ Material	Anfang Rech.	Ende Rech.	Anfang Rech.	Ende Rech.
Kalkzementputz	45.00	82.43	45.00	84.04
Äusserer Zentimeter des äusseren Backsteins	3.10	9.02	11.80	113.84
Innere 11 cm des äusseren Backsteins	3.10	11.39	11.80	116.43
Kalkzementmörtel 1 cm	24.65	90.33	24.65	85.34
25 cm des mittleren Backsteins	3.10	8.33	11.80	100.47
Kalkzementmörtel 1 cm	24.65	63.99	24.65	74.78
Äussere 11 cm des inneren Backsteins	3.10	3.54	11.80	43.14
Innerer Zentimeter des inneren Backsteins	3.10	2.63	11.80	10.82
Kalkputz	30.00	22.93	30.00	25.11

4 KONSTRUKTIVE ANALYSE DES BESTANDES

Im Arbeitspaket 1 des Forschungsvorhabens SuRHiB [2] wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Bauteilaufbauten mit den entsprechenden Baumaterialien von schweizerischen historischen Bauten aus der Zeit von 1850 bis 1920 ermittelt. Weiterhin wurden im Rahmen von zwei studentischen Arbeiten an der Berner Fachhochschule unter anderem verschiedene Konstruktionsdetails in bestehenden Wohngebäuden dieser Zeitepoche in Basel-Stadt analysiert [9] [7]. Um den Umfang der bauphysikalischen Untersuchungen und Berechnungen in einem angemessenen Rahmen zu halten, muss die Auswahl auf einige wenige repräsentative Bauteilaufbauten beschränkt werden. Diese werden nachfolgend beschrieben.

4.1 Konstruktionen

Das Mauerwerk der meisten historischen Gebäude besteht aus Backsteinen und Natursteinen. Aufgrund der Inhomogenität von Natursteinmauerwerk und der Tatsache, dass zu diesem Baumaterial keine Materialkenndaten vorliegen, beschränken sich die Untersuchungen vorliegender Arbeit auf Backsteinmauerwerk.

Der Untersuchung der Bestandsgebäude zufolge liegen hauptsächlich Wände mit Dicken im Bereich von ungefähr 300 mm, 450 mm und 550 mm vor. Die Wandstärke ist abhängig von der Gebäudehöhe, sowie von der Tatsache, dass in den meisten Gebäuden die Aussenwände von einem Stockwerk zum nächst höheren dünner werden [2]. Die Kellerwände einiger Gebäude weisen Dicken bis zu 650 mm auf. Diese Wände bestehen oft aus einem inhomogenen Aufbau mit Backstein- und Natursteinen, welcher in einer Simulation schwer abzubilden ist. Deshalb beschränken sich die nachfolgenden Untersuchungen und Simulationsberechnungen auf die in Abbildung 1 aufgeführten Grundkonstruktionen auf Backsteinmauerwerk mit Mauerwerksdicken von 300 mm, 430 mm und 560 mm. Diesen wird ein Backsteinformat von 25 cm Länge, 12 cm Breite und 6 cm Höhe zugrunde gelegt.

Der Analyse des Bestandes zufolge ist das Mauerwerk in den meisten Fällen auf der Aussenseite mit einem Kalkzementputz (20 – 30 mm) und auf der Innenseite mit einem Kalkputz (10 – 20 mm) versehen.

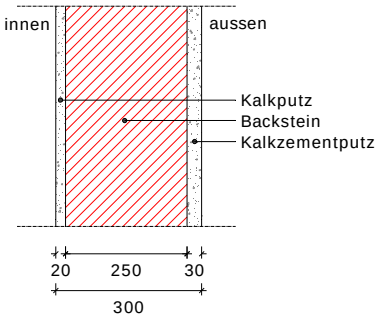
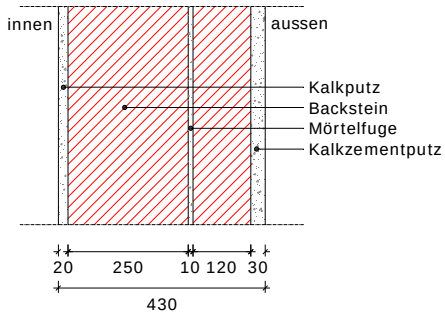
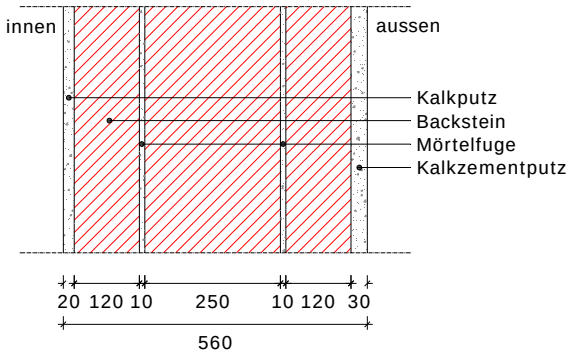
	Wanddicke **300 mm** 250 mm Backsteinmauerwerk mit 30 mm Aussen- und 20 mm Innenputz
	Wanddicke **430 mm** 380 mm Backsteinmauerwerk mit einer 1 cm Mörtelfuge und 30 mm Aussen- und 20 mm Innenputz
	Wanddicke **560 mm** 510 mm Backsteinmauerwerk mit 2 x 1 cm breiten Mörtelfugen und 30 mm Aussen- und 20 mm Innenputz

Abbildung 1: Zusammenstellung der untersuchten Wandkonstruktionen für die Bestandswände. Alle Masse sind in mm angegeben

4.2 Materialien

Bei der hygrothermischen Bauteilsimulation ist eine genaue Kenntnis der Materialkenndaten notwendig, um ein realistisches Simulationsergebnis zu erhalten. Als Quelle für die vorliegende Arbeit dienen hauptsächlich die Materialdatenbank des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP), die MASEA-Datenbank [10], sowie die Messdaten der TU-Wien, welche im Programm WUFI® hinterlegt sind. Im Folgenden sind die wichtigsten Kenndaten der Materialien mit Angabe ihrer jeweiligen Quelle zusammengefasst.

4.2.1 Mauersteine

Backsteine sind in Brennprozessen künstlich erzeugte Baustoffe, deren feuchtetechnische Eigenschaften durch die Herstellungsbedingungen in hohem Masse gesteuert werden können: Durch hohe Temperaturen kann ein Verschmelzen des Gefüges mit sehr hoher Dichtigkeit für Wassermoleküle, sowie Frostbeständigkeit erreicht werden. Andererseits sind porenreiche und deswegen stark saugende, hoch speicherfähige, gut wasserdampfdurchlässige und gut wärmedämmende Gefüge produzierbar, deren Frostbeständigkeit und Druckfestigkeit dann klein ist [11]. Durch die unterschiedliche

Herstellungsbedingungen und –prozesse in der untersuchten Bauzeit zeigen historische Backsteine sehr unterschiedliche Eigenschaften.

Die Materialkennwerte der Mauersteine für die hygrothermische Simulationen dieser Arbeit stammen aus der MASEA-Datenbank. Für die Berechnungen wird ausschliesslich Vollbackstein verwendet, da Vollbacksteinmauerwerk in den untersuchten Gebäuden am häufigsten vorkommt. Bei der Backsteinauswahl wird zum einen darauf geachtet, dass es sich um Altbau - Backsteine aus der Bauperiode 1850 bis 1920 handelt. Zum anderen müssen alle für die Simulation relevanten thermischen und hygrischen Materialkenndaten für die jeweiligen Backstein vorhanden sein. In der WUFI®-Datenbank gibt es rund 20 Backsteine, die in Betracht kommen. Aus den in Frage kommenden Backsteinen werden wiederum sieben Stück ausgewählt. Um eine grosse Bandbreite in den Simulationen abzudecken, wird darauf geachtet, dass die ausgewählten Backsteine sich hinsichtlich ihrer Materialkennwerte, wie vor allem der Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und Porosität unterscheiden.

Tabelle 4 enthält die Materialkennwerte der Backsteine, die zur Untersuchung herangezogen werden.

Tabelle 4: Charakteristische Materialkennwerte der Backsteine (Quelle: WUFI®-Datenbank)

Bezeichnung	Rohdichte ρ in kg/m^3	Wärmekapazität c_p in J/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ_T in W/mK	Diffusionswiderstand μ [-]	Sorption $u_{(80)}$ in kg/m^3	Freie Wassersättigung $u_{(f)}$ in kg/m^3	Wasseraufnahmekoeffizient A_w in $kg/m^2h^{0.5}$	Offene Porosität Φ in Vol.-%
Vollbackstein ZP	1879	834	1.00	45.1	2.52	82.4	3.04	25.3
Vollbackstein ZC	1985	836	0.91	23.0	3.10	188	10.8	28.5
Vollbackstein ZA	1845	794	0.53	16.4	5.17	216	10.9	30.4
Backstein ARB	1807	861	0.695	10	1.5	161	0.25	32
Vollbackstein ZJ	1767	868	0.50	17.1	3.38	192	11	33.3
Hist. Wiener Vollbackstein	1560	850	0.60	14.93	11.8	369	0.58	38
Vollbackstein ZD	1611	953	0.39	10	3.6	216	11	39

4.2.2 Putze und Mörtel

Aussenputz:
Die Schadenswahrscheinlichkeit eines Aussenputzes wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. Einerseits die äusseren klimatischen Randbedingungen, wie die Feuchtebeanspruchung der Fassade, je nach Position und Ausrichtung des Bauteils, sowie die einfallende solare Einstrahlung. Andererseits sind die bauphysikalischen Eigenschaften des Aussenputzes, wie die Festigkeit oder das feuchtetechnische Verhalten des Materials (z.B. die Saugfähigkeit oder der Wasseraufnahmekoeffizient des Putzes) entscheidend [12]. Die Kapillarstruktur und damit die Saugfähigkeit eines Putzes ist nicht nur durch seine Komponenten (Bindemittel, Zuschlagstoff,…), die Art der Mischung und die mechanische Verfestigung beim Mörtelauftrag festgelegt, sondern wird auch von den Erhärtungsbedingungen nach der Herstellung beeinflusst [13].

Wenn poröse, durch die Kapillarstruktur wasserbenetzbare Baustoffe mit Wasser in Kontakt kommen, saugt der erzeugte Kapillardruck dieses in die Poren hinein. Dabei wird mit zunehmender Eindringtiefe h der viskose Fliesswiderstand des Wassers immer grösser. Deshalb nimmt die Eindringtiefe h des Wassers mit der Zeit immer langsamer zu (2):

$$h = B \cdot \sqrt{t} \tag{2}$$

h = Wassereindringtiefe in m

B[1] = Wassereindringkoeffizient in m$\sqrt{t}$

t = Zeit in s

Eine entscheidende Eigenschaft der äusseren Putzschicht ist die kapillare Regenwasseraufnahme des Baustoffes. Wenn die bestehende Fassade eine Putzschicht aufweist, die einen hohen Wassereindringkoeffizient B hat, dringt durch Kapillarwirkung eine grössere Wassermenge in die bestehende Wand ein. Bei starkem Wind ist die kapillare Wasseraufnahme noch höher. Ist das Wasser in die Porenräume eingedrungen, so besteht die Gefahr, dass es bei tiefen Temperaturen zur Eisbildung und zu Schäden durch Abplatzungen der Fassade kommt.

In Analogie zu Gl. (2) kann die flächenbezogene Wasseraufnahme m wie folgt definiert werden (3):

$$m = w \cdot \sqrt{t} \tag{3}$$

m = aufgenommene Wassermenge in kg/m^2

w[2] = Wasseraufnahmekoeffizient in kg/(m$^2\sqrt{h}$)

t = Zeit in h

Der Zahlenwert des Wasseraufnahmekoeffizienten w ergibt sich als Ergebnis eines Saugversuchs, für eine bestimmte Saugzeit, im Regelfall ein Tag.

Aus einer Literaturrecherche [15] über Wasseraufnahmekoeffizienten von Kalkzementputzen aus der Zeit zwischen 1850 -1920 sind folgende Werte zu entnehmen:

- Kalkzementputz: $2 \text{ bis } 4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \sqrt{\text{h}})$
- Zementputz: $2 \text{ bis } 3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \sqrt{\text{h}})$

[1] Der Wassereindringkoeffizient B wird nach Künzel als Ww bezeichnet [11]
[2] Der Wasseraufnahmekoeffizient kann auch sekundenbezogen angegeben werden und wird dann als Aw bezeichnet [11] [14]

Bei der WUFI® Datenbank sind für den Kalkzementputz folgende Werte zu finden:

- Kalkzementputz/ -mörtel: $1.8 \text{ bis } 5.1 \text{ kg/m}^2 \sqrt{\text{h}}$

Die Wetterschutzwirkung von Putzen und Beschichtungen wird durch das Produkt ($w \cdot s_d$) der beiden Grössen Wasseraufnahmekoeffizient w und wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d nach [16] bestimmt. Dabei wird die Grösse des Wasseraufnahmekoeffizienten *w* dazu benützt, die kapillare Saugfähigkeit zu klassifizieren, wobei die folgenden Begriffe Verwendung finden [11]:

- Stark saugend sind Schichten mit $w > 2.0 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$
- Als wasserhemmend gelten Schichten mit $0.5 < w \leq 2.0 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ und einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke $s_d \leq 2 \ m$.
- Wasserabweisend sind Schichten, wenn das Produkt $w \cdot s_d$ einen Wert von höchstens $0.12 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ aufweist, d.h. wenn der Wert w zwischen dem Intervall $0.001 < w \leq 0.5 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ liegt und $s_d \leq 2 \ m$ ist.

Tabelle 5 zeigt die Kennwerte zum Wasseraufnahmekoeffizient von Putzen.

Tabelle 5: Wasseraufnahmekoeffizienten w der Putze (nach Künzel und Schwarz) [15] , deren wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d und das Produkt aus beiden Grössen

Material	Wasseraufnahmekoeffizient w		Wasserdampf-diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d	$w \cdot s_d$
	in $kg/(m^2 \cdot h^{0.5})$	in $kg/(m^2 \cdot s^{0.5})$	in m	in $kg/(m \cdot h^{0.5})$
Kalkzementputz	2 bis 4	0,03 bis 0,07	$\leq 2{,}0$	4 bis 8
Zementputz	2 bis 3	0,03 bis 005	$\leq 2{,}0$	4 bis 6

Die Wasseraufnahmefähigkeit des Aussenputzes bestimmt in hohem Masse den Wassergehalt des Mauerwerks. Es wurde in Anlehnung an die Ergebnisse einer Untersuchung mit Putzproben des Bio-Grundputzes ($\text{nach DIN V } 18550 \ w = 0.165 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ und des Restaurier-Grundputzes ($\text{nach DIN V } 18550 \ w = 1.083 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ ein relativ hoher Wert des Wasseraufnahmekoeffizient *w* von 1.8 kg/m^2 h $^{0.5}$ herausgefunden [7]. Infolgedessen wurde $w = 2.0 \ kg/(m^2 \cdot h^{0,5})$ als typischer Wert für die Simulationen des Bestands angenommen. Dieser Wert entspricht wahrscheinlich dem eines historischen Putzes.

<u>Mörtel und Innenputz</u>:

Die Bestandsanalyse ergab, dass der Mörtel der untersuchten Wände in vielen Fällen zementhaltig ist, weshalb in der Simulation Kalkzement mit einem groben Zuschlag verwendet wird. Als Innenputz wird Kalkputz verwendet [2]. Die Materialkenndaten der Putze stammen aus der Datenbank des Fraunhofer IBP, Holzkirchen Deutschland. Das Material Kalkzementmörtel wurde vom Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz der TU-Wien messtechnisch untersucht und in WUFI® hinterlegt.

Tabelle 6 enthält die charakteristischen Materialkennwerte der verwendeten Putze und Mörtel für die Simulationen.

Tabelle 6: Charakteristische Materialkennwerte der Putze und Mörtel (Quelle: Materialdatenbank der Simulationssoftware WUFI® des Fraunhofer IBP, Holzkirchen, Deutschland)

Bezeichnung	Rohdichte ρ in kg/m³	Wärmekapazität cp in J/kg K	Wärmeleitfähigkeit λT in W/mK	Diffusionswiderstand μ [-]	Sorption u(80) in kg/m³	Freie Wassersättigung u(f) in kg/m³	Wasseraufnahmekoeffizient Aw in kg/(m²h^0.5)	Offene Porosität Φ in Vol.-%
Kalkzementputz	1900	850	0.80	19.0	45.0	210	2.0	24
Kalkzementmörtel	1910	850	0.80	45.9	24.65	200	5.1	25
Kalkputz	1600	850	0.70	7.00	30.0	250	2.82	30

4.3 Eingabe der Bauteilaufbauten in WUFI®

Aus der Bestandsanalyse ist eine repräsentative Auswahl an Konstruktionsaufbauten zu bilden, in der Simulation abzubilden und bauphysikalisch zu beurteilen.

Wie im Abschnitt 4.1 erläutert, liegen bei Bestandsgebäuden hauptsächlich Wände mit Dicken im Bereich von ungefähr 300 mm, 450 mm und 550 mm vor.

Auf Basis der ermittelten Grundkonstruktionen (vgl. 4.1), bei einem Backsteinformat von 25 cm Länge, 12 cm Breite und 6 cm Höhe, ergeben sich die in Abbildung 2 bis Abbildung 4 dargestellten Bauteilaufbauten der Bestandswände in WUFI®. In der Simulation können beliebig viele sogenannte „Monitorpositionen“ in einem Bauteil gesetzt werden. Für jede dieser Positionen wird nach der Berechnung der zeitliche Verlauf von relativer Feuchte und Temperatur ausgegeben, was eine Beurteilung der hygrothermischen Verhältnisse an bestimmten, gegebenenfalls kritischen Punkten der Konstruktion ermöglicht. An der Aussen- sowie Innenseite des Backsteinmauerwerks werden jeweils eine sogenannte „diagnostische Schicht“ von 10 mm Dicke mit denselben Materialkenndaten wie der eigentliche Backstein angeordnet. WUFI® gibt für jede Bauteilschicht auch den mittleren Wassergehalt in kg/m³ aus. Durch diese Methode kann der Wassergehalt des ersten und des letzten Zentimeters des Backsteinverbunds ausgewertet werden.

In diesem Projekt werden in den Bauteilsimulationen wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellt, nur die vertikalen Mörtelfugen berücksichtigt.

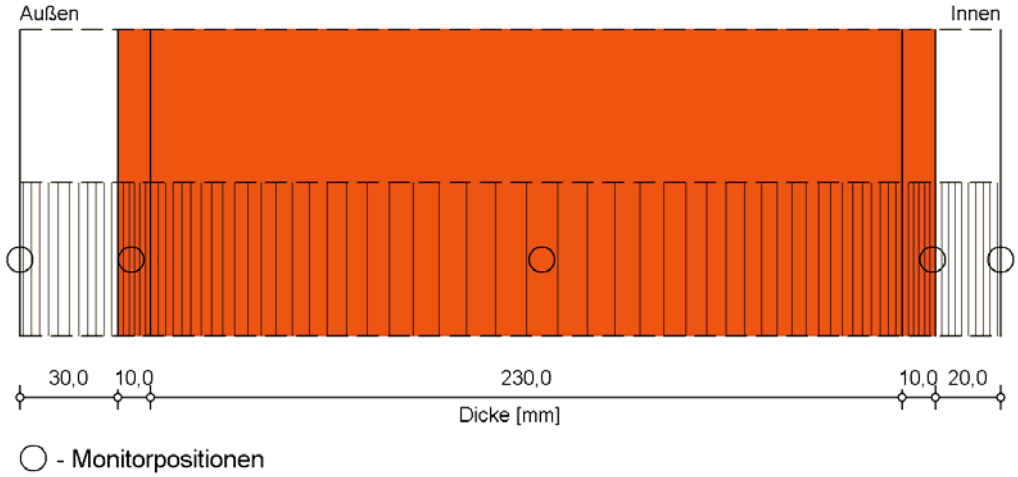


Abbildung 2: Darstellung der 300 mm starken Wandkonstruktion in WUFI®. Bauteilaufbau von aussen (links) nach innen (rechts) mit Monitorpositionen (Kreise) und diagnostischer Schicht an Aussen- und Innenseite

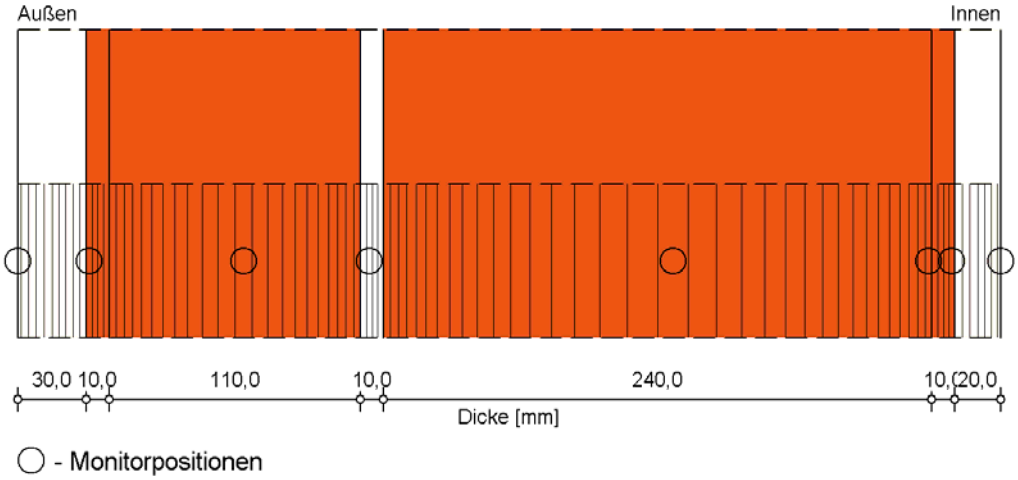


Abbildung 3: Darstellung der 430 mm starken Wandkonstruktion in WUFI®. Bauteilaufbau von aussen (links) nach innen (rechts) mit Monitorpositionen (Kreise) und diagnostischer Schicht an Aussen- und Innenseite

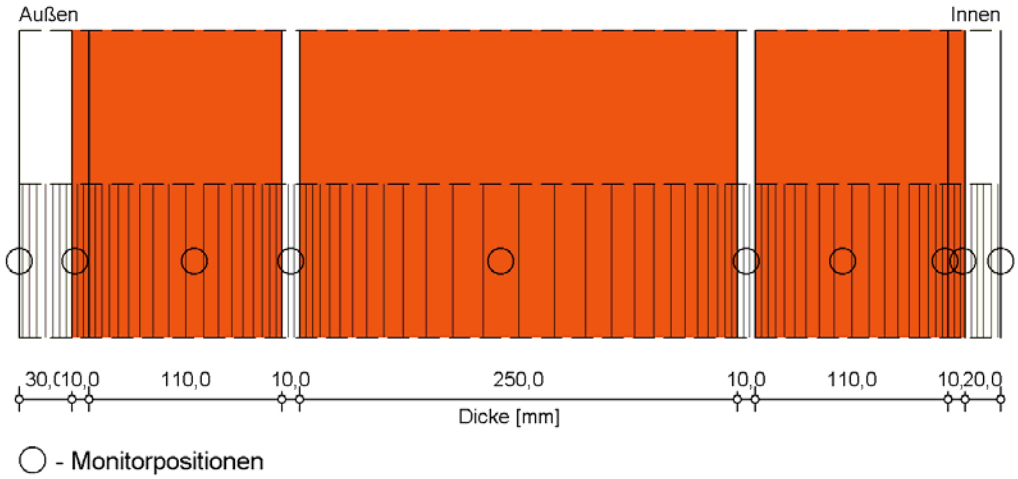


Abbildung 4: Darstellung der 560 mm starken Wandkonstruktion in WUFI®. Bauteilaufbau von aussen (links) nach innen (rechts) mit Monitorpositionen (Kreise) und diagnostischer Schicht an Aussen- und Innenseite

5 VERSAGENSKRITERIEN

Für die bauphysikalische Beurteilung von bestehenden, sowie von sanierten Aussenwandkonstruktionen werden in der vorliegenden Forschungsarbeit Simulationsverfahren eingesetzt. Die Bewertung der Ergebnisse erfordert die Anwendung von Kriterien, die als Hilfsmittel für die Auswertung der Simulationsergebnisse dienen. Unter *Versagenskriterien* werden Kriterien definiert, bei deren Überschreitung das Risiko eines Schadenseintritts nach einer geplanten Sanierung mit Innendämmung als zu hoch angesehen wird. Im folgenden Abschnitt werden Grenzwerte zu den jeweiligen Versagenskriterien formuliert. Die Einhaltung dieser Grenzwerte soll die Gebrauchstauglichkeit sowie Dauerhaftigkeit der Konstruktionen sicherstellen.

In dieser Arbeit werden folgende Versagenskriterien beschrieben:

- Maximal zulässiger Wassergehalt im Bauteil als Vorauswahlkriterium (Abschn. 5.1)
- Frostsicherheit der Bestandswand (Abschn. 5.2)
- Schimmelpilz- und Oberflächenkondensatfreiheit der raumseitigen Innenoberfläche (Abschn. 5.3)
- Maximal zulässiger Wassergehalt und Vermeidung von Schimmelpilz im Innendämmsystem (Abschn. 5.4)
- Einhaltung des Wärmeschutzes im Winter gemäss SIA 180:1999 und der Wärmeschutzanforderungen an die Aussenbauteile gemäss SIA 380/1 (Abschn. 5.5)

Die Kriterien werden einerseits auf die Bestandswand und andererseits auf das Innendämmsystem angewandt. Das Innendämmsystem besteht aus dem Dämmstoff mit zusätzlich erforderlichen Schichten (z.B. Dampfbremsen), den Befestigungsmitteln, je nach System einer Unterkonstruktion, sowie der raumseitigen Bekleidung bzw. Beschichtung. Abbildung 5 zeigt in einer Prinzip-Skizze einen Vertikalschnitt durch die Aussenwand mit Innendämmsystem. Es wird in den Teil A (Bestand = Mauerwerk inkl. vorhandenem Aussen- und Innenputz) und Teil B (neu aufgebrachtes Innendämmsystem) aufgeteilt. Weiter wird dargestellt in welcher Schicht welches Kriterium angewandt wird.

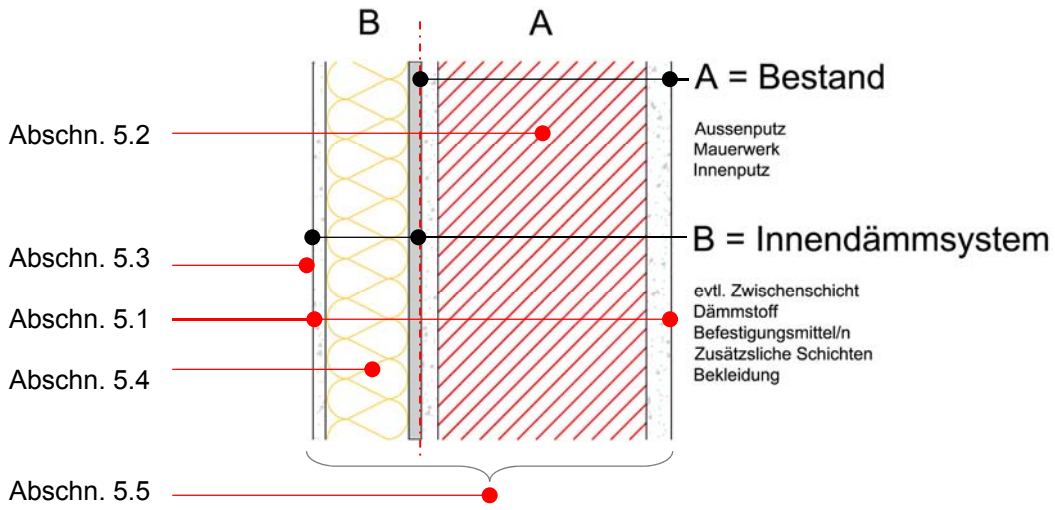


Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer sanierten Aussenwand mit Innendämmsystem. Dargestellt ist die sanierte Aussenwand aufgeteilt in zwei Systeme: Bestandswand und Innendämmsystem (in schwarz Teil A und Teil B) und die einzelnen Schichten oder Bereiche, auf die jedes Kriterium angewandt wird (in rot).

5.1 Jahresverlauf des Gesamtwassergehalts des Bauteils

Aufgrund der unterschiedlichen Backsteinsorten, der verschiedenen Innendämmsystem mit unterschiedlichen Wärmedämmstoffen und –dicken, sowie diversen Dampfbremsen, ergibt sich eine grosse Anzahl von möglichen Sanierungsvarianten. Es würde den Rahmen dieses Forschungsprojekt sprengen, wenn alle diese Varianten mit WUFI® über 25 Jahre simuliert und bezüglich aller Versagenskriterien ausgewertet würden.

Daher wurde nach einem Vorauswahlkriterium gesucht, mit dem sich die erfolgsversprechenden Varianten schnell bestimmen lassen könnten.

Bei dieser Voruntersuchung werden zuerst alle Varianten der Bestandswand mit dem mittleren Jahr 1994, welches zehn Mal wiederholt wird, berechnet. Mit der mehrmaligen Wiederholung desselben Klimajahrs ist es möglich, dass das Bauteil im Laufe der Zeit einen eingeschwungenen Zustand erreicht. Falls die Simulation ergibt, dass der Gesamtwassergehalt des Bauteils am Ende der 10 Jahre grösser ist, als zu Beginn der Simulation, wird die Aufbau des IDS als untauglich verworfen.

Das Vorkriterium lautet also: Der Gesamtwassergehalt darf langfristig nicht ansteigen.

Nachdem kontrolliert wird, dass der Gesamtwassergehalt des Bauteils nicht ansteigt, sondern entweder konstant zu einem eingeschwungenen Zustand führt, oder mit der Zeit abnimmt, werden in einem weiteren Schritt die einzelnen Bauteilschichten mit weiteren Versagenskriterien untersucht.

5.2 Frostsicherheit im Bauteil

Nach der Anbringung einer Innendämmung wird die bestehende Wand kälter und dadurch feuchter. In der Folge steigt das Risiko eines Frostschadens der Bestandswand.

Frostschäden bei Aussenbauteilen entstehen durch die Volumenvergrösserung des Wassers beim Gefrieren im Baustoff, was eine Zerstörung des Steingefüges verursachen kann. Bei der Umwandlung von Wasser in Eis gibt es eine Volumenzunahme von 9 V.-%. Diese Volumenzunahme kann zu Druckspannungen im wassergesättigten Porenraum führen, die die Festigkeit des Materials übersteigen und zu Absprengungen führen können [12].

Entscheidend dafür sind nicht nur die Bauteiltemperatur, sondern auch der gleichzeitig vorhandene Wassergehalt in den jeweiligen Schichten, die dabei auftretende Anzahl von Frost-Tau-Wechsel, sowie die Porenstruktur des Backsteines.

Im Folgenden werden die Schichten einzeln analysiert, deren Frostrisiko untersucht werden soll und ein Grenzwert festgelegt.

<u>Frostkriterium des Backsteinmauerwerks</u>

Wasser gelangt in das Bauteil in flüssiger Form oder als Wasserdampf durch verschiedene Ursachen, z.B. durch Regenfeuchte, Tauwasserfall, aufsteigende Feuchte oder als Anfangsfeuchte bei der Herstellung. Sinkt die Lufttemperatur im Oberflächenbereich unter 0 °C, bildet sich zuerst Eis an der Oberfläche oder in oberflächennahen grösseren Poren des Backsteins [17].

Nun gibt es Effekte im Porenbereich [18] die zur Unterschreitung des Gefrierpunktes führen, ohne das sich Eis bildet. Bei Messungen dieser Gefrierpunktunterschreitungen an Backsteinen stellte ROSENTHAL [18] fest, dass in Backsteinmaterialien mit einem mittleren Porenradius von $r_{50\%V}$ = 1 µm die Eisbildung in der Regel im Bereich von $\theta = 0\ bis\ -5°C$ abgeschlossen ist. Für die Untersuchungen in diesem Projekt wird jedoch konservativ angenommen, dass bereits unter 0 °C Eisbildung im Backstein einsetzt.

Die Backsteine, die in dieser Arbeit untersucht werden, sind nicht direkt der Witterung ausgesetzt, sondern durch den Aussen- bzw. Innenputz von den direkten klimatischen Einflüssen geschützt. Trotzdem werden die Backsteine im Inneren des Bauteils im Laufe der Zeit viele Male gefroren und aufgetaut. Dieser Vorgang, der als *Frost-Tau-Wechsel* bekannt ist, stellt eine Dauerbelastung für das Backsteinmaterial dar. Denn Frostschäden entstehen in der Regel nicht beim ersten Frost-Tau-Wechsel, sondern es handelt sich bei Frostschäden meist um Schäden aus Dauerschwellbelastungen[3] für das Backsteinmaterial [19].

Wenn flüssiges Wasser in direktem Kontakt mit porösem Backsteinmaterial gelangt, wird eine Kapillarzugspannung induziert. Diese ist von der Kapillarporengrösse abhängig und bewirkt, dass das Wasser von den Kapillarporen aufgesogen wird. Um so kleiner die Porengrösse ist, desto höher wird die Kapillarzugspannung. Daraus folgt, dass mit abnehmenden Radius, die Wasserfüllung der Poren steigt. Durch diese höhere Wassersättigung ergibt sich eine Zunahme der Empfindlichkeit von Backsteinmaterial gegenüber Frostbelastung [19].

BENTRUP [19] hat in seiner Arbeit eine umfangreiche Recherche über die Entstehung von Schäden durch Frost in Backsteinmaterial durchgeführt. Dabei hat er insgesamt 40 Backsteinsorten auf Frostbelastung bzw. Frostwiderstandsfähigkeit untersucht. Diese 40 Backsteine wurden aus neuen und historischen Gebäuden entnommen. Davon gehören 15 Backsteinsorten der Bauzeit von 1850 bis 1920 an. Tabelle 7 enthält seine Messungen für die Backsteingruppen aus der von uns untersuchten Bauperiode, die Dichtekennwerte, sowie Kennwerte der Porenstruktur, wie die Porosität P und der mittlere Porenradius $r_{50\%V}$.

Als Mittelwert über alle Backsteinsorten ergeben sich folgende Werte:

- Mittlere offene Porosität $\overline{P}_{offen} = 31.29\% \approx 31.3\%$
- Mittlerer Porenradius (Vol. bezogen) $\bar{r}_{50\%,V} = 1{,}174\ \mu m \approx 1{,}1\ \mu m$

Die Werte der offenen Porosität sind vergleichbar mit den Materialkennwerten der für diese Arbeit ausgewählten Backsteinsorten der MASEA-Datenbank ($\overline{P}_{offen} = 32{,}3\%$). Daher wird angenommen, dass die Ergebnisse der Frostversuche von BENTRUP [19] auch für die Steinsorten gelten, die für diese Studie verwendet werden.

[3] Dauerhafte Druckschwellbelastungen durch Frost-Tau-Wechsel Prozesse, die im Laufe einer begrenzten Zeitperiode auf einen Backstein einwirken und zu irreversiblen Veränderungen der mechanischen Eigenschaften des Baustoffes (Versagen durch Risse im Porenraumgefüge) führen können.

Tabelle 7: Messwerte der Materialeigenschaften der geprüften Backsteine aus der Bauperiode 1850 bis 1920 mit Kennwerten der Porenstruktur nach [19]

Nr.	Bauzeit-punkt	Anzahl Proben in Stk.	Reindichte in kg/m³	Rohdichte in kg/m³	Porosität offen[4] in V.-%	Porosität geschl. in V.-%	Porosität gesamt in V.-%	mittlerer Porenradius bzgl. Vol. $r_{50\%,V}$ in µm
7	1907	6	2667	1852	30.19	0.37	30.56	1.080
8	1904	6	2674	1538	42.65	0	42.48	2.620
9	1900	6	2731	1680	35.92	2.56	38.48	2.000
10	1850	6	2668	1821	29.55	2.2	31.75	3.030
14	1904	3	2694	1874	29.04	1.4	30.44	0.810
15	1900	3	2719	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0.330
16	1890	3	2669	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0.220
17	1879	3	2776	1727	37.02	0.77	37.79	0.970
18	1879	3	2658	1745	33.98	0.37	34.35	0.250
22	1896-1900	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	0.800
23	1885	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	0.740
24	1820	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	2.140
38	1910	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	0.800
39	1905	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	1.550
40	1863-1868	-	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	0.264

[4]Von aussen zugängliche offene Porosität;
n.v. = nicht vorhanden; n.b. = nicht bemessen

Eine Materialeigenschaft zur Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Backsteinen ist der Sättigungswert S, [20] sowie die Porengrösse und -verteilung im Porensystem. Die Frostschäden von Backsteinen stehen also in direktem Zusammenhang mit dem Wassergehalt im Material beim Auftreten des Frostes.

Der Sättigungswert wird nach [21] als der tatsächlich mit Wasser gefüllte Porenraum nach zeitlich definierter Wassertränkung, bezogen auf den gesamten Porenraum beschrieben. Als $S_{3d,Z}$ definiert HIRSCHWALD [21] den Sättigungswert von Backsteinen nach 3 Tagen Wasserlagerung gemäss DIN 52252. Nach der Messung des Wassersättigungsgrades von 10 Backsteingruppen, wovon 4 Gruppen in der Bauzeit dieser Untersuchung liegen, erzielt BENTRUP [19] folgende Resultate, die in Tabelle 8 aufgelistet sind.

Tabelle 8: Gemessene Sättigungswerte und -grade von Backsteine nach 3 Tagen Wasserlagerung gemäss DIN 52252 [19]

Nr.	Bauzeitpunkt	Anzahl Proben in Stk.	Sättigungswert Backsteine (Mittelwert) $S_{3d,Z}$ in %	Sättigungswert Backsteine[5] $S_{3d,Z,95\%}$ 95% Quantil in %	Kritischer Sättigungsgrad *50-F-T-W* $S_{krit,50}$ in %	Kritischer Sättigungswert *Einsetzung Eis* S_E in %
7	1907	15	58.8	65.9	77	69
8	1904	15	68.7	78.9	85	60
9	1900	15	69.8	72.6	74	66
10	1850	15	65.4	72.1	80	55

[5] Mittelwert des Sättigungswertes ermittelt nach 3 Tagen Wasserlagerung eines ganzen Backstein nach DIN 52252 (95 % Quantil-Wert)

Als Versagenskriterium für ein Versagen des Backsteinmaterials bei Frosteinwirkung, wird der Grenzwert verwendet, bei dem ein Bruch der Proben nach 50 Frost-Tau-Wechsel (FTW) stattfindet. Dieser wird als $S_{krit,50}$ bezeichnet. Der Sättigungsgrad, ab dem Eisdehnung einsetzt, wird als S_E bezeichnet. Dieser wird gemäss den Frostdilatometeruntersuchungen nach [19] zusammengestellt.

Der Vergleich zwischen den kritischen Dehnungswert $S_{krit,50} - S_E$ und die Differenz $\Delta S_{krit,50} = S_{krit,50} - S_{3d,Z,95\%}$ wird in Tabelle 9 gezeigt. Einerseits schwankt der Abstand zwischen den kritischen Sättigunswerten $S_{krit,50}$ und S_E zwischen 8 und 25 %. Das bedeutet, dass die Backsteinsorten eine Zunahme des Sättigungsgrades von mindestens 8 % ertragen, bis ein Bruch nach 50 Frost-Tau-Wechseln stattfindet.

Tabelle 9: Zusammenstellung kritischer Dehnungswerte $S_{krit,50}$ - S_E und der Differenz $\Delta S_{krit,50}$

Nr.	Bauzeitpunkt	Anzahl Proben in Stk.	$S_{krit,50} - S_E$ in %	$\Delta S_{krit,50} = S_{krit,50} - S_{3d,Z,95\%}$ in %
7	1907	15	8	11
8	1904	15	25	6
9	1900	15	8	1
10	1850	15	25	8

Bei den 4 ausgewählten Backsteingruppen beginnt die Eisdehnung ab einem Sättigungsgrad von S_E = 55 %. Da eine Zunahme von 8 % noch möglich wäre, bis ein Bruch im Backsteinmaterial stattfindet, und unter der Voraussetzung, dass das Kriterium auf der sicheren Seite liegen soll, wird eine Sättigungsgrad von 55 % (untere Grenze) bis 63 % (obere Grenze) als Versagenskriterium für die Frostsicherheit aller Backsteinsorten festgelegt.

Wie im Kapitel 2 erwähnt wurde, basiert diese Untersuchung auf den Bestandsaufnahmen des Arbeitspakets 1, sowie auf Ergebnissen des Simulationsprogrammes WUFI®. Das Programm rechnet den mittleren Wassergehalt in jeder Bauteilschicht, als u bezeichnet, nach folgender Gleichung (4):

$$u = \frac{m_w}{V_B} \text{ in } kg/m^3 \quad (4)$$

m_w = Masse des Wassers in der Bauteilschicht

V_B = Volumen der Bauteilschicht

Der auf die freie Wassersättigung bezogene Wassergehalt *u* wird demnach wie folgt gerechnet (5):

$$u = \frac{u_f \cdot S_{Grenzwert}\,[\%]}{100} \left[kg/m^3\right] \quad (5)$$

u_f = Wassergehalt bei freier Wassersättigung

Die Berechnung der unteren und oberen Grenzwerte des Wassergehaltes für die untersuchten historischen Backsteine sind in Tabelle 10 dargestellt. Im Abschnitt 6.3 werden die Grenzwerte bei den Bestandswänden analysiert.

Tabelle 10: Oberer und unterer Grenzwert des kritischen Wassergehaltes bei 50 Frost-Tau-Wechsel für verschiedene Backsteintypen

Backstein	Wassergehalt bei freier Wassersättigung u_f	Grenzwert Wassergehalt für S-Wert = 55% $u = \frac{u_f \cdot 55}{100}$ in kg/m^3	Grenzwert Wassergehalt für S-Wert = 63% $u = \frac{u_f \cdot 63}{100}$ in kg/m^3
HWZ	368.965	202.93	232.45
ZC	188.000	103.40	118.44
ZA	216.000	118.80	136.08
SuRHiB	333.007	183.15	209.79

Ausser dem Backstein ist der Mauerwerksmörtel ein wichtiger Teil der Bestandswand. Wie in Arbeitspaket 1 beschrieben wurde, variiert die Dicke der Mörtelfuge in Bauten von 1850 bis 1920 je nach Mauerwerkstyp sehr stark. Eine Mörtelfuge kann zum Beispiel bis zu 8 cm Dicke erreichen. Im Allgemeinen besass das Mauerwerk der untersuchten Bauten einen höheren Anteil an Fugenmörtel als ein Mauerwerk der Bauzeit ab etwa 1960, das eine Solldicke der Stoss- und Lagerfuge von 10 mm resp. 12 mm hatte. Die Dicke der Mörtelfuge beeinflusst sowohl die Tragfähigkeit als auch die bauphysikalischen Eigenschaften des Mauerwerks, das schlussendlich die Dauerhaftigkeit von Aussenwänden beeinträchtigt.

Hinsichtlich des Feuchteschutzes und bei dem Kriterium der Frostsicherheit sind die Mörtelfugen eine Schwachstelle der Bestandswand. Der Mauermörtel der untersuchten Bauten des Arbeitspakets 1 bestand aus Kalkmörtel mit einem Zusatz von Zement. Kalkzementmörtel hat im Normalfall eine gewisse Frostwiderstandsfähigkeit. Ein Grenzwert des Sättigungsgrades sowie Anzahl an Frost-Tau-Wechsel für den Kalkzementmörtel ist in der Literatur nicht zu finden. Vermutlich ist ein solcher

Grenzwert je nach der Zusammensetzung, der Mischung und der Einbaubedingungen unterschiedlich, sodass es nicht möglich ist, eine Verallgemeinerung der Grenzwerte anzugeben. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes können diese Untersuchungen nicht durchgeführt werden. Hier besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf.

Frostkriterium des Innenputzes

Im Gegenteil zum Mauermörtel ist der Innenputz der Bestandswand i.d.R. nicht frostbeständig. Da die Innendämmung den Wärmestrom vom Raum in den Innenputz reduziert, wird das bestehende Mauerwerk und der Innenputz im Winterhalbjahr kälter. Dadurch wird der Innenputz einer Frosteinwirkung ausgesetzt.

Frostschäden beim Innenputz, vor allem bei gipshaltigen Innenputzen, äussern sich durch das Erweichen des Putzes [22]. Dadurch wird der von Frost geschädigter Innenputz mit der Zeit spröde und es kann zur Abplatzungen kommen.

Ein Beispiel für den Temperaturverlauf innerhalb einer 30 cm starken Aussenwand wird nachfolgend in Abbildung 6 gezeigt. Es wird der Temperaturverlauf bei stationären Temperaturrandbedingungen vor und nach der Sanierung dargestellt.

Damit am Innenputz Schäden entstehen, müssen beide Faktoren, tiefe Temperaturen und ein hoher Sättigungsgrad, zusammenwirken. Deswegen ist eine rel. Feuchte über 95 % in der Innenputzschicht - ab diesem Wassergehalt spricht man vom Kapillarwasserbereich - als kritisch zu betrachten und sollte nicht überschritten werden. Um sichere Lösungen mit Innendämmsystemen zu erlangen, wird hier empfohlen, den alten Innenputz abzuschlagen. Eine gründliche Reinigung des Mauerwerks von Staub und losen Teilen, sowie ein fachgerechtes Ausfugen des Mauerwerks soll durchgeführt werden, bevor ein neuer frostbeständiger Putz aufgebracht wird.

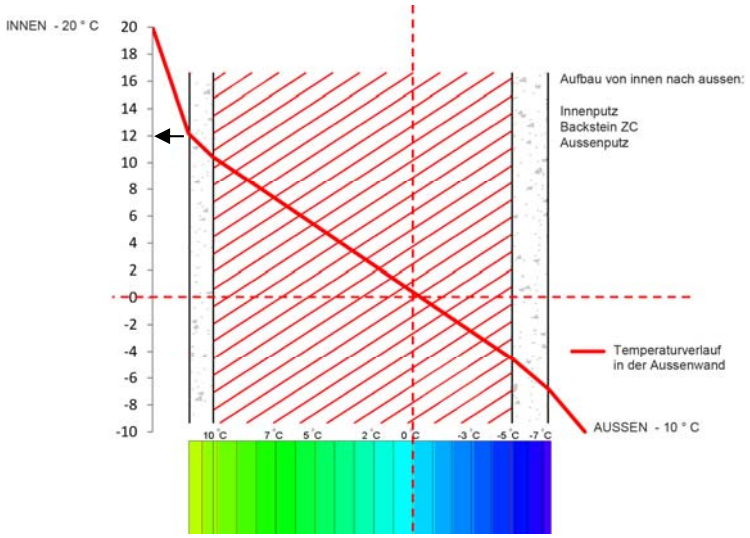
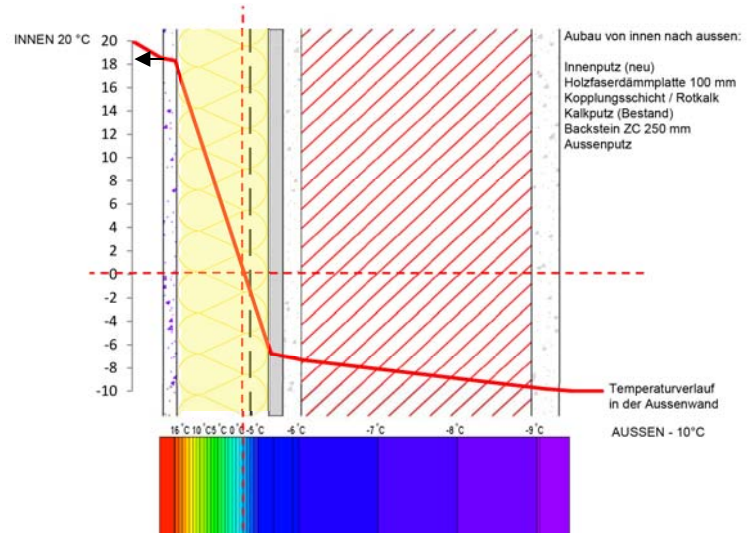
	Die Temperatur an der inneren Oberfläche des Bestandsmauerwerks liegt bei etwa 12 °C. Die 0 °C Isotherme befindet sich innerhalb der äusseren ersten 10 cm des Backsteinmauerwerks. Der bestehende Innenputz ist nicht von Frost gefährdet.
	Nach einer Sanierung der Aussenwand mit einer Innendämmung von 100 mm Holzfaserplatte erhöht sich die Temperatur an der inneren Oberfläche des Raumes um etwa 6 K. Der Gefrierpunkt dagegen hat sich von aussen nach innen verlagert. Er befindet sich innerhalb der Dämmschicht. Der bestehende Innenputz liegt jetzt im frostgefährdeten Bereich, d.h. bei bestimmten Bedingungen könnten Bauschäden auftreten.

Abbildung 6:Temperaturverlauf innerhalb einer 30 cm starken Aussenwand vor und nach der Sanierung bei stationären Temperaturrandbedingungen von 20 °C innen und -10 °C aussen

5.3 Vermeidung von Oberflächenkondensat und Schimmelpilzbefall an der Innenoberfläche

Das Ziel dieses Kriterium ist es, Schäden durch Tauwasserbildung, sowie Schimmelpilzbildung auf der Raumseite der Wand zu vermeiden.

5.3.1 Vermeidung von Oberflächenkondensat

Die Oberflächentemperatur, bei deren Unterschreitung Tauwasserbildung eintritt, heisst Taupunkttemperatur. Die Taupunkttemperatur θ_D bezeichnet diejenige Temperatur, bei der der Wasserdampfsättigungsdruck p_s der Luft erreicht ist. Sie hängt von der Feuchte und der Temperatur der Raumluft ab.

Gemäss der Norm SIA 180:1999 [23] darf an keiner Stelle der raumseitigen Oberfläche Kondensat auftreten. Kurzfristiges Auftreten von Kondenswasser an der Oberfläche ist dann zulässig, wenn dies nicht zu Schäden führt [23].
Dieses Kriterium verlangt, dass die Innenoberflächentemperatur θ_{si} die Taupunkttemperatur der Luft nicht unterschreitet (6):

$$\theta_{si} \geq \theta_D \qquad (6)$$

θ_{si} = Innenoberflächentemperatur

θ_D = Taupunkttemperatur

Eine instationäre Betrachtung der Oberflächentemperatur wird anhand der Berechnungen mit der Software WUFI® dargestellt. Da aber Schimmelpilz vor Oberflächenkondensat entsteht, wird zuerst die Schimmelpilzfreiheit in der Innenoberfläche beurteilt (s. Abschn. 5.3.2). Erst wenn dieses Kriterium nicht erfüllt ist, wird die Oberflächenkondensatfreiheit beurteilt.

Die Tauwasserbildung tritt zuerst an den raumseitigen Oberflächen von Wärmebrücken auf, weil dort die geringsten Oberflächentemperaturen auftreten. Die Kondensatfreiheit bei Wärmebrücken muss ebenfalls gewährleistet werden und wird in diesem Bericht im Kapitel 11 ausführlich untersucht. Mit Hilfe des Wärmebrückenkatalogs können die Wärmebrücken der Anschlüsse der Innendämmsystems überprüft werden.

5.3.2 Schimmelpilzfreiheit an der Innenoberfläche

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 180:1999 verlangt, dass die Oberflächenfeuchte, d.h. die relative Feuchte der oberflächennahen Luftschicht, den Wert von 80 % langfristig nicht übersteigt.

Die Anforderungen an die Konstruktion für die kritische Oberflächenfeuchte werden durch den vereinfachten Nachweis oder durch den rechnerischen Nachweis gemäss SIA 180:1999 ermittelt [23].

Damit Schimmelpilzsporen keimen können, müssen drei wesentliche Wachstumsvoraussetzungen - Temperatur, Feuchte und Nahrung- über eine bestimmte Zeitperiode, simultan vorhanden sein, weshalb eine instationäre Betrachtung der Schimmelpilzbildung erforderlich ist. Dazu wird das Isoplethenmodell nach SEDLBAUER [24] verwendet.

Das Modell von SEDLBAUER [24] fasst die Forschungsergebnisse zu Schimmelpilzwachstum auf Oberflächen zusammen. Hierzu werden sogenannte Isoplethenkurven, also Kurven gleicher Schimmelpilzaktivität gebildet. Die unterste Kurve, *lowest isopleth mould curve* oder LIM genannt, stellt die unterste Grenze der biologischen Aktivität für eine Substratklasse dar. Sie nennt zu jeder Oberflä-

chentemperatur eine kritische relative Feuchte der Oberfläche, bei deren Überschreitung Schimmelpilzaktivität einsetzt. Darüber hinaus werden sogenannte Sporenauskeimungskurven gebildet, die für jede Oberflächentemperatur eine relative Feuchte an der Oberfläche angegeben, die zu einer Auskeimung der Sporen nach einer gewissen Zeitspanne (16 Tage, 8 Tage..., bis zu einem Tag) führt. Diese Kurven sind in Abbildung 7 dargestellt.

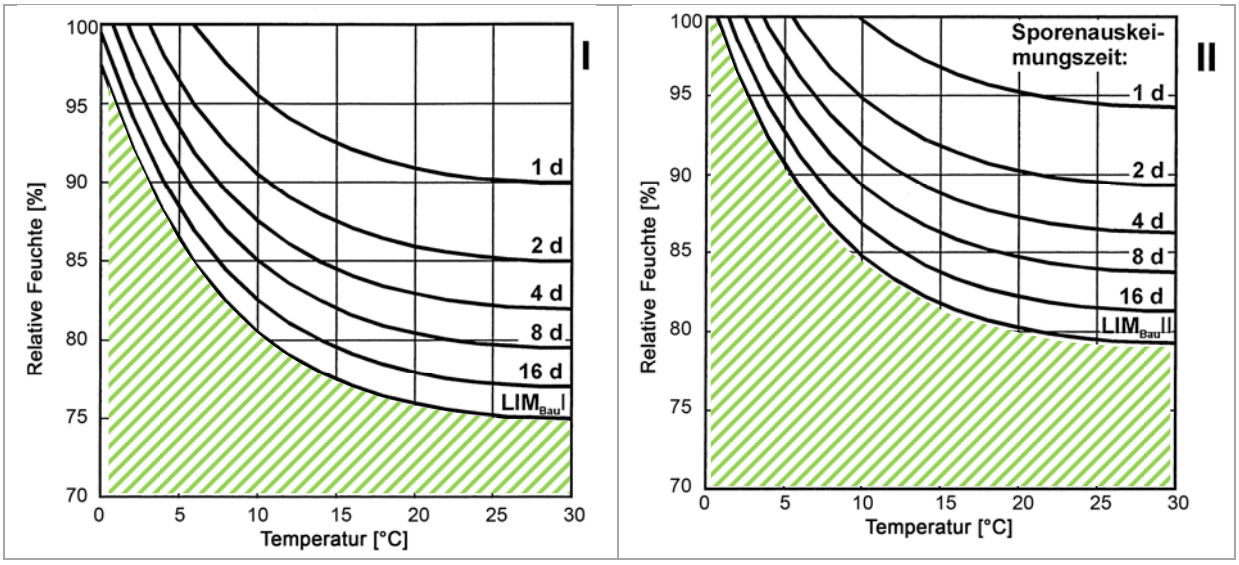


Abbildung 7: Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung, das für die Substratgruppen I (linkes Bild) und II (rechtes Bild) gilt. Die Angaben in Tagen (d) bedeuten Auskeimungszeiten. Grün schraffiert ist der Bereich ohne Schimmelpilzaktivität [24]*, Seite 61*

Die verschiedenen Substrate werden darüber hinaus in Substratgruppen eingeteilt:

- **Substratgruppe 0**: Optimaler Nährboden (z.B. Vollmedien)
- **Substratgruppe I**: biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen, Material für dauerelastische Fugen
- **Substratgruppe II**: Baustoffe mit porigem Gefüge, wie z.B. Putze, mineralische Baustoffe, manche Hölzer sowie Dämmstoffe, die nicht unter Substratgruppe I fallen
- **Substratgruppe III**: Baustoffe, die weder abgebaut werden können noch Nährstoffe enthalten

In Abbildung 8 ist eine bestehende 30 cm dicke Aussenwand ohne Innendämmsystem und nach Westen orientiert, dargestellt. Das Diagramm zeigt die relative Feuchte der Oberfläche als Funktion der Oberflächentemperatur der Wandinnenoberfläche mit normalen inneren Raumfeuchtelasten. Links sind die Werte ohne Regen berechnet, rechts werden die Werte für die gleiche Konstruktion mit Regenbelastung dargestellt. In der Grafik links liegen die Werte unter den LIM B I und LIM B II - Kurven (unterste Grenze der biologischen Aktivität gebäudetypischen Schimmelpilze –B für Bau- je nach Substratgruppe I oder II). Bei der Variante rechts werden die LIM-Kurven zwar kurzzeitig überschritten. Die Zeitdauern sind aber zu kurz für eine Sporenauskeimung. Dies wurde mit dem Softwaremodul WUFI®-Bio, einen biohygrothermisches Prognosemodell zur Beurteilung des Schimmelbefallrisikos, berechnet. Aus Abbildung 8 geht hervor, dass ein ungenügender Regenschutz der Aussenwand das Schimmelpilzrisiko auf der raumseitigen Innenoberfläche erhöht.

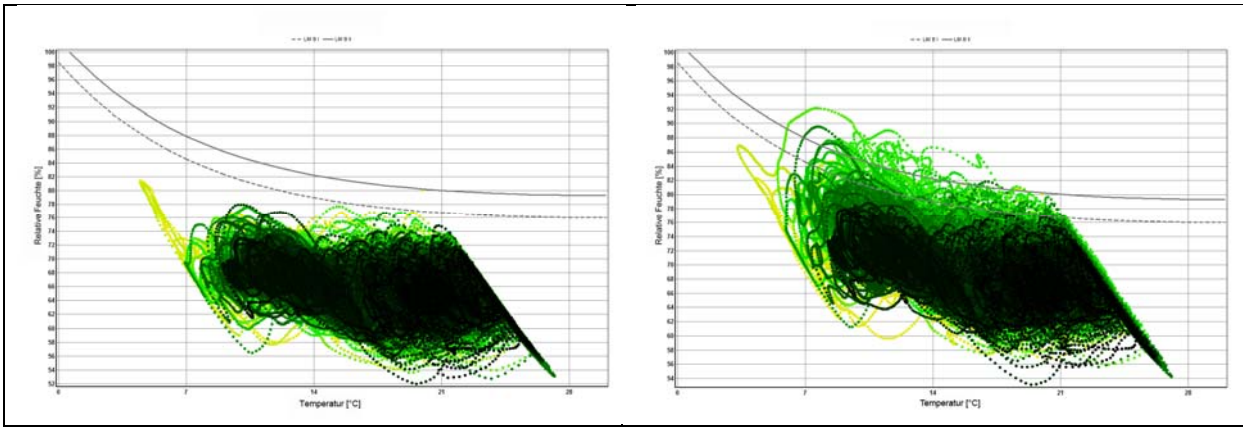


Abbildung 8: Vergleich der auftretenden relativen Feuchte der Innenoberfläche einer 30 cm dicken Bestandswand mit normaler Feuchtelast (ISO EN 15026)mit den LIM-Kurven des Isoplethenmodells. Links ohne Regen berechnet, rechts mit Regenbelastung

Des Weiteren wird in Abbildung 9 die gleiche Bestandswand mit zwei verschiedenen Innendämmsystemen mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von U = 0.38 W/(m^{2}K) dargestellt. Links ist eine sanierte Bestandswand mit IDS Schaumglas und rechts mit IDS Holzfaserplatte. Obwohl diese Innendämmsysteme sehr unterschiedliche s_d-Werte haben - links s_d = 7200 m und rechts s_d= 0.4 m - lässt sich kaum ein Unterschied in den Feuchte- und Temperaturverhältnissen auf der Innenoberfläche erkennen. Dies zeigt, dass die Innendämmsysteme die raumseitigen Oberflächentemperaturen so erhöhen, dass bei üblichen Raumluftfeuchten keine Gefahr von Schimmelpilzbildung besteht.

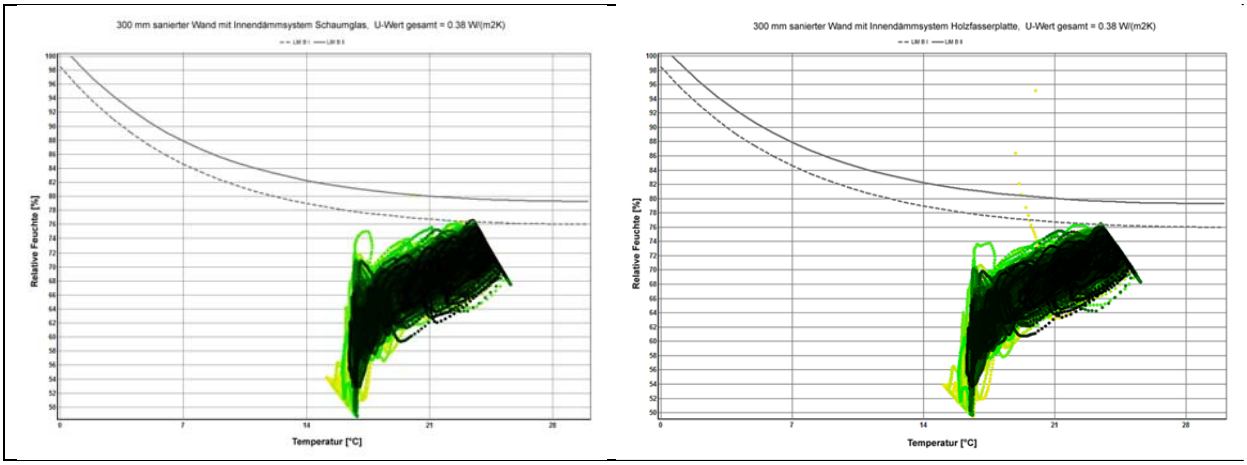


Abbildung 9: Vergleich der auftretenden relativen Feuchten der Innenoberfläche einer sanierten Bestandwand mit hoher Feuchtelast innen (ISO EN 15026) mit den LIM-Kurven des Isoplethenmodells. Links mit IDS Schaumglas, rechts mit IDS Holzfaserplatte berechnet

5.4 Maximal zulässiger Wassergehalt und Vermeidung von Schimmelpilz im Dämmsystem

Wärmedämmstoffe sind unterschiedlich empfindlich gegenüber hohen Wassergehalten. So besteht bei Faserdämmstoffen die Gefahr, dass sie bei länger andauernden hohen Wassergehalten verschimmeln. Holz- oder Holzwerkstoffe können bei hohen Feuchtegehalten von holzzerstörenden Mikroorganismen angegriffen werden. Daher muss für jeden Wärmedämmstoff ein Versagenskriterium in Form eines maximalen Wassergehaltes definiert werden, um eine Schädigung durch hohe Feuchtegehalte zu verhindern. Darüber hinaus führt ein zu hoher Wassergehalt in der Dämmschicht zur Ver-

minderung der Wärmedämmung, da die Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt zunimmt (s. Abschn. 5.5.3).

Im folgenden Abschnitt werden zwei Bereiche untersucht:

- Der Wassergehalt und die relative Feuchte innerhalb der Dämmschicht und
- die maximale Feuchte an der Grenze zwischen dem Bestand und dem Innendämmsystem.

Da Schaumglas keine Feuchtigkeit aufnimmt und mit Bitumen-Kaltkleber hohlraumfrei an die Bestandswand montiert wird, entfällt die Auswertung hinsichtlich des Wassergehalts in der Dämmschicht sowie der relativen Feuchte zwischen Bestandswand und Innendämmung. Bei Glaswolle- und Steinwolledämmung ist die relative Feuchte an der Trennschicht zwischen Bestand und Innendämmung in Bezug auf Schimmelpilz kritischer. Deshalb wird nur dieser Bereich analysiert.

5.4.1 Maximal zulässiger Wasser- und Feuchtegehalt in der Dämmschicht

Falls ein Wärmedämmstoff Holz- oder Zelluloseanteile enthält, muss die Feuchtigkeit berücksichtigt werden, bei deren Überschreitung Holz zerstört wird. Ein Schadensrisiko entsteht bei Holz erst, wenn Holzbauteile dauerhaft Wassergehalte über 20 M-% aufweisen. Die Grenzkriterien für die Vermeidung von Holzfäule nach VIITANEN [25] sind:

- Relative Feuchte < 95 %
- Wasseraktivität < 0.95 bis 0.99
- Holzfeuchte > 25 bis 30 M-%

Die Wasseraktivität, beschreibt das für den Schimmelpilz frei verfügbare, also nicht chemisch gebundene Wasser. Bei einer relativer Luftfeuchte über 95 % beginnt der Kapillarwasserbereich. In diesen Bereich haben kapillarporöse hygroskopische Materialien die Fähigkeit, Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung aufzusaugen [14]. Den Mikroorganismen muss ausreichend Feuchtigkeit zur Verfügung stehen. Dieser für das Wachstum notwendige Feuchtegehalt wird in der Biologie häufig als Wasseraktivität – „aw-Wert" – dargestellt und steht in einem direkten Zusammenhang mit der relativen Feuchte im Baustoff oder an der Oberfläche (7):

$$\phi = aw \cdot 100 \qquad (7)$$

ϕ [%] relative Feuchte

aw [-] Wasseraktivität

5.4.2 Maximal zulässiger Feuchtegehalt im Grenzbereich Bestand – Innendämmsystem

In der Trennschicht zwischen dem Bestandsmauerwerk und dem Innendämmsystem besteht ein erhöhtes Risiko von Bauschäden durch Schimmelpilz. Oft kommt es an dieser Trennschicht zum Schimmelpilzwachstum, weil auf der Aussenseite der Dämmschicht eine hohe relative Luftfeuchte durch niedrige Temperaturen entsteht. Für das Schimmelpilzwachstum müssen eine bestimmte Temperatur, Feuchte und Nahrung über eine Mindest-Expositionszeit, simultan gegeben sein. Ein Modell für die Prognose der Wachstumsvorgänge auf der Innenoberfläche bietet das Programm WUFI-BIO®. Das WUFI-BIO® Modell ist aber nicht für das Innere des Bauteils validiert. Grund dafür ist, dass nicht genau die gleichen Bedingungen auf der Innenoberfläche wie im Bauteilinneren herrschen. Die Bedingungen für das Schimmelpilzwachstum sind vom Innendämmsystem, aber auch von der Ausführungsweise abhängig. Zum Beispiel werden manche Innendämmsysteme an der bestehenden Oberfläche nahezu hohlraumfrei durch eine vollflächige Verklebung angebracht. Andere hingegen werden dicht daran gepresst. Wenn aber das Innendämmsystem das Eindringen feuchtwarmer Raumluft in die Trennschicht zwischen Bestand und Innendämmsystem zulässt, können günstige Bedingungen für das Schimmelpilzwachstum auftreten. Diese ähneln dann den Bedingungen an einer Innenoberfläche.

Für den Fall, dass eine luftdichte Ausführung nicht gewährleistet werden kann, wird ein unterer Grenzwert von 80 % relativer Feuchte für die Trennschicht zwischen bestehendem Kalkputz und neuem Innendämmsystem als erster Schwellenwert festgelegt, da ab diesem Wert die meisten Schimmelpilzarten wachsen können [24]. Werden 80 % relative Feuchte für längere Zeiträume überschritten, so müssen die relativen Feuchten und die Temperaturen mit einem Schimmelpilzmodell beurteilt werden. Mit Hilfe dieses Modells wird das Risiko eines Schimmelbefalls in Falle einer undichten Ausführung abgeschätzt. Da zurzeit aber nicht die Werkzeuge vorhanden sind, um das Kriterium der Schimmelpilzbildung im Bauteilinnere zur überprüfen, wird der untere Grenzwert von 80 % relativer Feuchte für den Grenzbereich zwischen Innendämmsystem und Bestandswand im Ergebniskatalog nicht angewandt. Hier besteht ein weiterer Forschungsbedarf, um die Schimmelpilzbildung im Bauteil bzw. in Hohlräumen im Bauteil zuverlässig beurteilen und somit Schimmelpilzbildung in dieser Trennschicht sicher ausschliessen zu können.

In Falle einer dichten Ausführung bei der Anbringung eines Innendämmsystems ist die Gefahr des Schimmelpilzbefalls hinter und in der Dämmschicht hingegen geringer, da die Bedingungen für das Schimmelpilzwachstum dadurch verschlechtert werden. Daher wird für diesen Fall in dieser Studie als oberer Grenzwert nach VIITANEN [25] der Wert von 95 % relativer Feuchte als Versagenskriterium angenommen.

Ein anderer Aspekt ist, dass bei einer relativen Luftfeuchte über 95% der Kapillarwasserbereich beginnt. In diesem Bereich haben kapillarporöse hygroskopische Materialien die Fähigkeit, Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung aufzusaugen [14]. Somit besteht ein hohes Risiko, dass Kondensat in der Trennschicht resp. in der Dämmung ab 95% relativer Feuchte ausfallen. Die Auswertung wird im Abschn. 8.1.5 jeweils zur Beurteilung einzelner Innendämmsysteme beschrieben.

Beschreibung der Monitor-Positionen für einzelne Innendämmsysteme im Grenzbereich/Trennschicht für die Beurteilung der Vermeidung von Schimmelpilz

Die zwei Monitorpositionen an der Trennschicht zwischen Bestand und Innendämmsystem werden im letzten Millimeter-Bereich des Innenputzes, resp. im ersten Millimeter-Bereich der Dämmschicht für alle Dämmsysteme angenommen. Um auf der sicheren Seite zu bleiben, wird somit der Trennschichtbereich mit der höchsten relativen Feuchte abgebildet.

Zur Auswertung der relativen Feuchte bei Dämmstoffen aus Steinwolle wird die Trennschicht zwischen dem bestehenden Innenputz und Innendämmung, sowie die Trennschicht zwischen Innendämmung und Dampfbremse betrachtet (s. rot gestrichelte Linie in Abbildung 10).

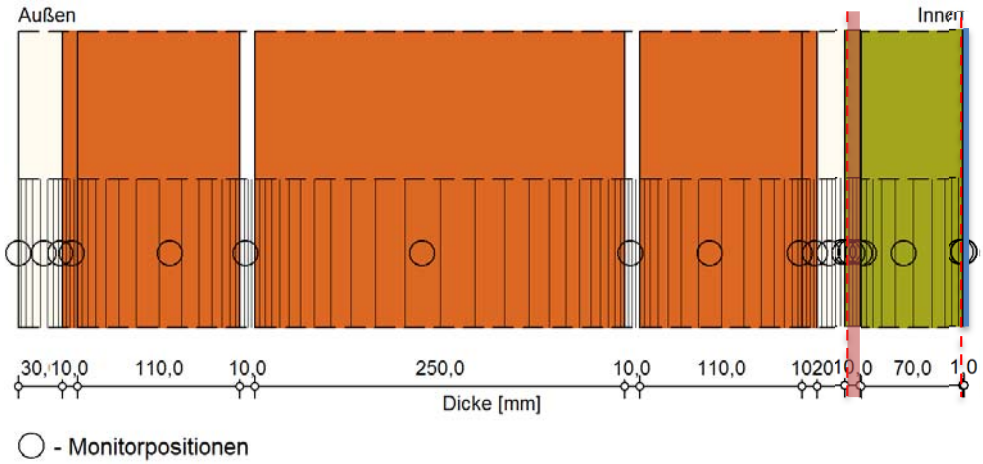


Abbildung 10: Monitorpositionen und Lage der Trennschichten für die Variante mit einem 560 mm dicken Mauerwerk mit Backstein ZC und IDS Steinwolle mit 80 mm Dämmstoffdicke (rot gestrichelte Linie = Trennschicht; rot schattiert = diagnostische Schicht)

Zur Auswertung der relativen Feuchte bei Zellulosedämmung wird die Trennschicht zwischen dem bestehenden Innenputz und Innendämmung sowie die Trennschicht zwischen Innendämmung und OSB-Platte betrachtet (s. rot gestrichelte Linie in Abbildung 11). Ferner wird die relative Feuchte in der Dämmschicht analysiert. Dazu wird die Monitorposition in der Mitte der diagnostischen Schicht und in der Mitte in der restlichen Dämmschicht herangezogen (s. Abbildung 11).

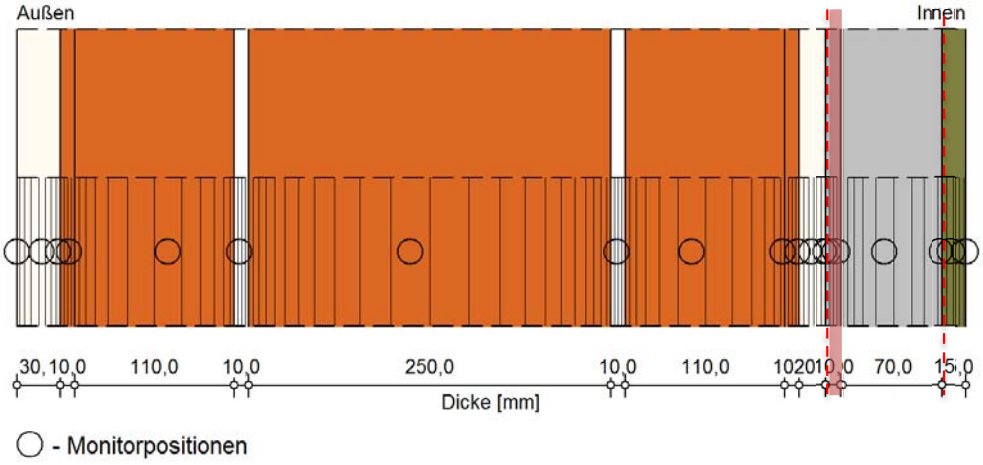


Abbildung 11: Monitorpositionen und Lage der Trennschichten für die mit einem 560 mm dicken Mauerwerk mit Backstein ZC und IDS Zellulose mit 80 mm Dämmstoffdicke und OSB-Platte raumseitig (rot gestrichelte Linie = Trennschicht; rot schattiert = diagnostische Schicht)

Bei der Variante mit Zellulosedämmung mit feuchtevariabler Dampfbremse (Intello) und Gipsbauplatte wird die Trennschicht zwischen dem bestehenden Innenputz und der Innendämmung, sowie die Trennschicht zwischen Innendämmung und Dampfbremse betrachtet (s. rot gestrichelte Linie in Abbildung 12). Ferner wird die relative Feuchte in der Dämmschicht analysiert. Dazu wird die Monitorposition in Mitte der diagnostischen Schicht und in der restlichen Dämmschicht herangezogen (s. Abbildung 12).

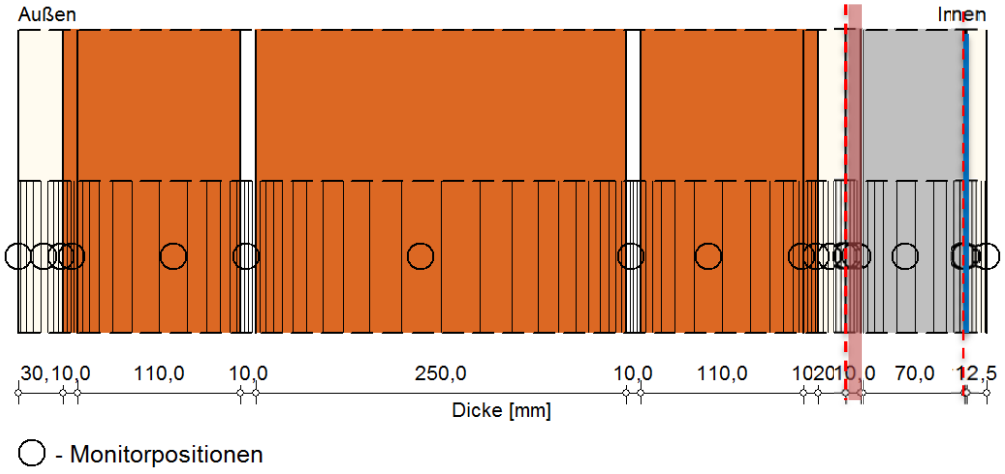


Abbildung 12: Monitorpositionen und Lage der Trennschichten für die Variante mit einem 560 mm dicken Mauerwerk mit Backstein ZC und IDS Zellulose mit 80 mm Dämmstoffdicke und feuchtevariabler Dampfbremse (rot gestrichelte Linie = Trennschicht; rot schattiert = diagnostische Schicht)

Zur Auswertung der relativen Feuchte bei Holzfaserdämmung wird die Trennschicht zwischen dem bestehenden Innenputz und Innendämmung, die Trennschicht zwischen Innendämmung und Funktionsschicht sowie die Trennschicht zwischen Innendämmung und Lehmputz betrachtet (s. rot gestrichelte Linie in Abbildung 13). Ferner wird die relative Feuchte in der Dämmschicht analysiert. Dazu wird die Monitorposition in Mitte der Dämmschicht vor und nach der Funktionsschicht herangezogen (s. Abbildung 13).

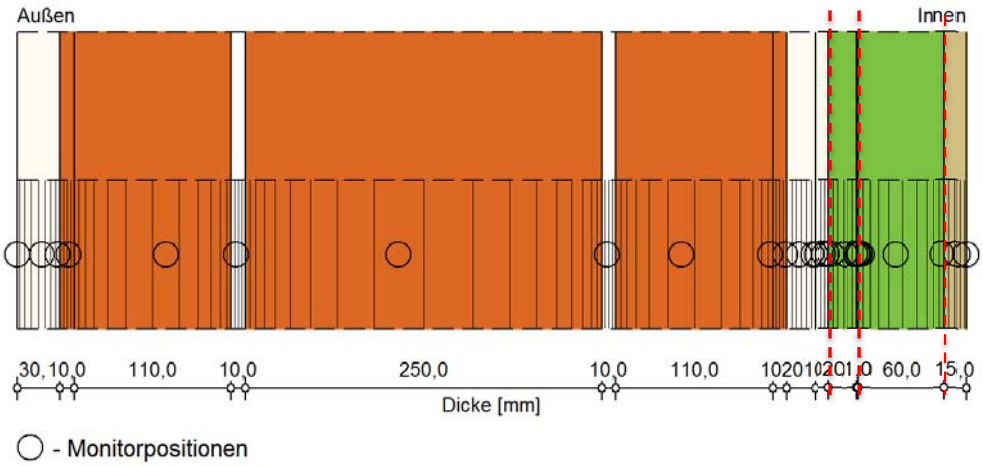


Abbildung 13: Monitorpositionen und Lage der Trennschichten für die Variante von einem 560 mm dicken Mauerwerk mit Backstein ZC und IDS Holzfaserdämmung mit 80 mm Dämmstoffdicke sowie Lehmputz raumseitig (rot gestrichelte Linie = Trennschicht; rot schattiert = diagnostische Schicht)

Bei der Variante mit Glaswolle als Dämmung mit feuchtevariabler Dampfbremse (Vario KM Duplex) wird die Trennschicht zwischen dem bestehenden Innenputz und der Glaswolledämmung, sowie die Trennschicht zwischen Glaswolle und Dampfbremse betrachtet (s. rot gestrichelte Linie in Abbildung 14).

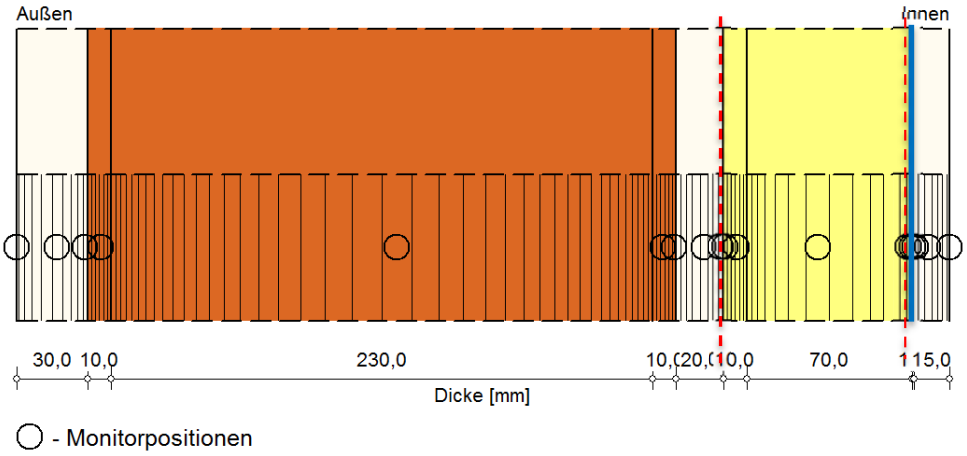


Abbildung 14: Beispiel Eingabe der Variante von einem 560 mm dicken Mauerwerk mit Backstein ZC und IDS Glaswolle Dämmung 80 mm und feuchtevariabler Dampfbremse (rot gestrichelte Linie = Trennschicht; rot schattiert = diagnostische Schicht)

5.5 Wärmeschutz im Winter und energetische Anforderungen an die Gebäudehülle

Die Kennwerte des Wärmeschutzes der Bestandswände, die Wärmedurchlasswiderstand R, sowie der Wärmedurchgangskoeffizient U, werden für jeden Backsteintyp und jede Dicke der Innendämmung berechnet. Für jene Varianten, die eine Unterkonstruktion (Holzlattung) aufweisen, wird diese auch bei der Berechnung der Kennwerte berücksichtigt.

Beide Wärmeschutznachweise, nach SIA 180:1999 und nach SIA 380/1:2009 (Einzelbauteilnachweis), werden im Ergebniskatalog in einer Tabelle mit den Anforderungen dargestellt.

Nachfolgend werden die Anforderungen an die Gebäudehülle bei der Sanierung bestehender Aussenwände erläutert.

5.5.1 Wärmeschutz im Winter nach SIA 180:1999

Damit die Anforderungen an Behaglichkeit und Oberflächenkondensatfreiheit erfüllt werden, darf ein maximaler Wärmedurchgangskoeffizient für Wände gegen Aussenklima von U_{max} = 0.4 W/(m²K) nicht überschritten werden.

5.5.2 Anforderungen an Aussenwände nach SIA 380/1:2009

In der SIA 380/1 werden folgende Anforderungen an den Wärmeschutz einer Aussenwand gestellt: Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient U = 0.25 W/(m²K).

Ab 12 cm bis 14 cm Dämmschichtstärke mit einer Wärmeleitfähigkeit von λ = 0.040 W/(mK) lässt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0.25 W/(m²K) erreichen (s. Abschn. 7.2). Allerdings können diese grossen Dammstoffstärken bei Innendämmsystemen nur hergestellt werden, wenn die dauerhafte Funktionsfähigkeit der Aussenwand damit nachgewiesen werden kann.

5.5.3 Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient

Da die Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffs vom Feuchtegehalt abhängig ist, wird für jeden Dämmstoff die Wärmeleitfähigkeit feuchteabhängig berücksichtigt. Diese Werte sind in der WUFI® Datenbank vorhanden und werden im folgenden Diagramm dargestellt (s. Abbildung 15). Abbildung 15 zeigt, wie der Wassergehalt des Dämmstoffes von untersuchten Innendämmsystemen die Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Wärmeleitfähigkeit von Steinwolle und Glaswolle am meisten zu.

Bei den organischen Dämmstoffen Zellulose und Holzfaser besteht in der Regel kein linearer Zusammenhang zwischen der Wärmeleitfähigkeit und dem Wassergehalt [27]. Wie Abbildung 15 zeigt, wird jedoch in der WUFI®-Datenbank für die Simulation ein linearer Zusammenhang angegeben.

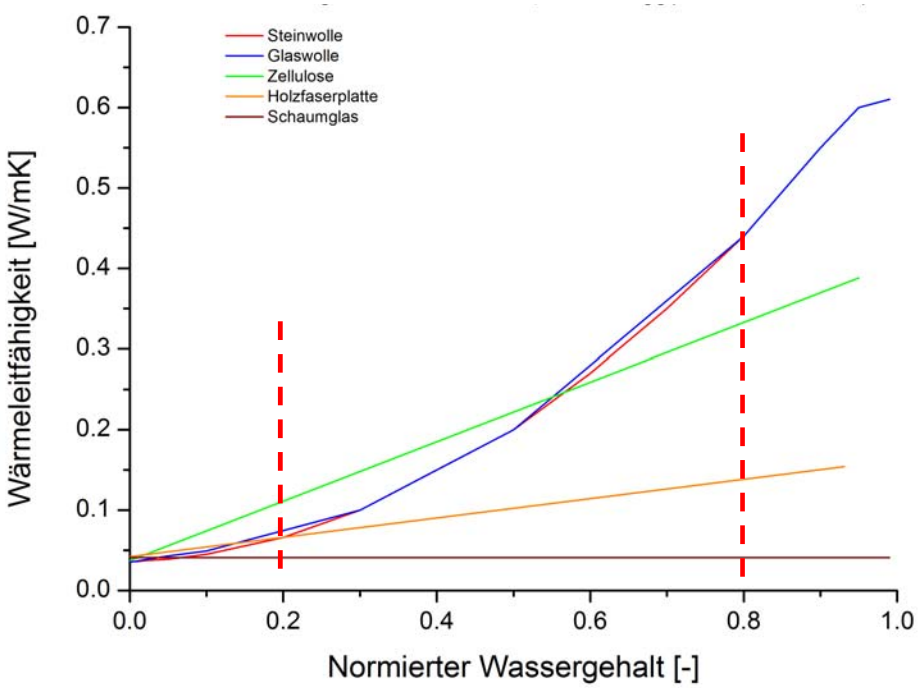


Abbildung 15: Darstellung der Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit verschiedene Baustoffe (Quelle: WUFI®-Datenbank). Die gemessenen Funktionen der WUFI®-Datenbank stammen aus (Cammerer und Achtziger 1984).

6 FEUCHTE- UND WÄRMETECHNISCHE ANALYSE DER BESTANDS-WAND

Historische Backsteine unterscheiden sich in ihren wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften. In diesem Abschnitt werden daher folgende Kenngrössen des Wärme- und Feuchteschutzes von Aussenwänden untersucht:

- Die Feuchtetransporteigenschaften von historischen Backsteinen,
- der Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient der Aussenwände,
- sowie der Frost-Tau-Wechsel.

Durch die Analyse sollen Backsteine ausgewählt werden, die für die Simulation mit den Innendämmsystemen herangezogen werden.

6.1 Feuchtetechnische Analyse des Bestandes

Zunächst sind die Auswirkungen der unterschiedlichen wärme- und feuchtetechnischen Werte der verschiedenen historischen Backsteinsorten auf den Feuchtehaushalt der Wände zu bestimmen.

Wie im Abschnitt 4.2 aufgeführt, werden aus der WUFI®-Datenbank verschiedene Backsteinsorten ausgewählt, die die Bandbreite des Gebäudebestands bestmöglich abbilden sollen. So wird eine Vorauswahl von sieben Backsteinsteinen mit unterschiedlichen Materialkennwerten getroffen (s. Tabelle 4, S. 18). Um die zu untersuchenden Varianten für die Simulationen weiter einzuschränken, wird die Zahl der ausgewählten Backsteinsorten weiter reduziert. Hierzu werden die Wassergehalte von Mauerwerkswänden mit unterschiedlichen Backsteinsorten im Winterhalbjahr, also von Anfang Oktober bis Ende März, untersucht. Dieser Zeitraum des Jahres wird hinsichtlich einer Schädigung des Backsteines durch Frosteinwirkung als besonders kritisch erachtet. Das Vorhandensein von Feuchtigkeit ist dabei eine entscheidende Voraussetzung für die Entstehung von Frostschäden.

Es werden aus den sieben Steinsorten diejenige mit dem niedrigsten Feuchtegehalt und diejenige mit dem höchsten Feuchtegehalt im Winter als Extremfall ausgewählt. Es wird davon ausgegangen, dass die Wassergehalte des Mauerwerks mit den übrigen Backsteinsorten dazwischen liegen.

Für jeden Backstein werden jeweils der Gesamtwassergehalt des jeweiligen Wandaufbaus, sowie der Wassergehalt der diagnostischen Schicht (vgl. Abschn. 4.3) auf der Aussen- und Innenseite des Backsteinverbunds für die geringste Mauerwerksstärke von 250 mm und die grösste Mauerwerksstärke von 510 mm berechnet und analysiert.

Da die Wassergehalte des Mauerwerks über das Winterhalbjahr stark variieren, müssen für einen Vergleich der Wassergehalte von Mauerwerken mit verschiedenen Backsteinsorten diese statistisch ausgewertet werden. Die Darstellung der statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgt mit Hilfe von Boxplots (vgl. Abbildung 16). Mit diesen können die wesentlichen statistischen Grössen eines Datensatzes wie Median, Minimum, Maximum visualisiert werden. Damit ist diese Diagrammform geeignet, um einen Eindruck zu bekommen, in welchem Bereich die Daten liegen und über welchen Bereich sie sich verteilen.

Ein Boxplot besteht aus einem Rechteck, genannt Box, und zwei Linien, die dieses Rechteck verlängern. Diese Linien werden als Whisker bezeichnet und durch einen Strich abgeschlossen. Dieser kennzeichnet den Minimal- und Maximalwert des jeweiligen Datensatzes. In der Auswertung der Simulationsergebnisse entspricht die Box dem Bereich, in welchem die mittleren 80 % der Daten liegen. Sie wird durch das obere 90 %- und das untere 10 %-Dezil begrenzt. Des Weiteren ist der Median als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet. Dieser Strich teilt das gesamte Diagramm in zwei Hälften, in denen jeweils 50 % der Daten liegen.

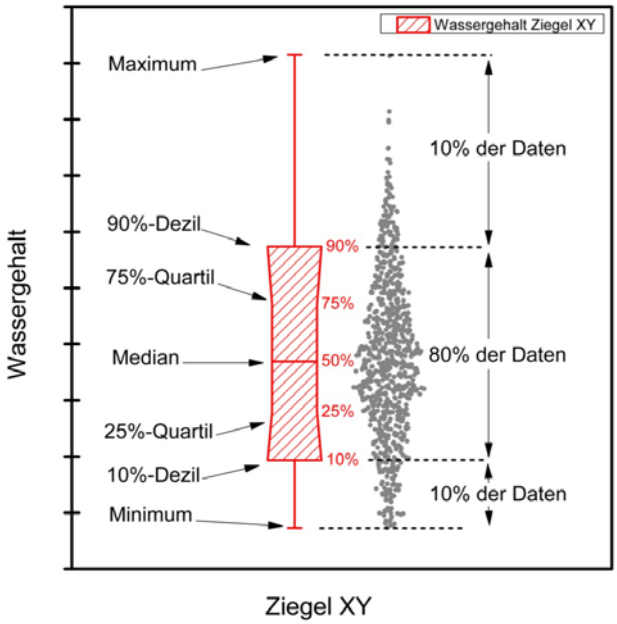


Abbildung 16: Erläuterung eines Boxplot-Diagramms

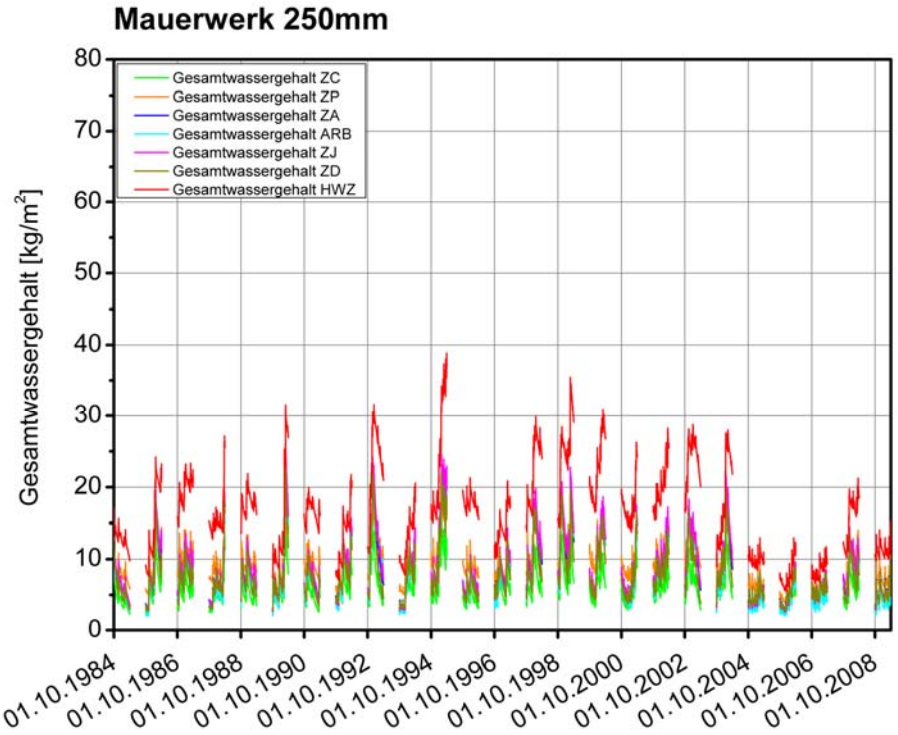
Der Wassergehalt poröser mineralischer Baustoffe wird in hohem Masse von der Rohdichte und der Porosität bestimmt. Backsteine mit einer hohen Rohdichte weisen eine geringe Porosität auf (vgl. Tabelle 11).

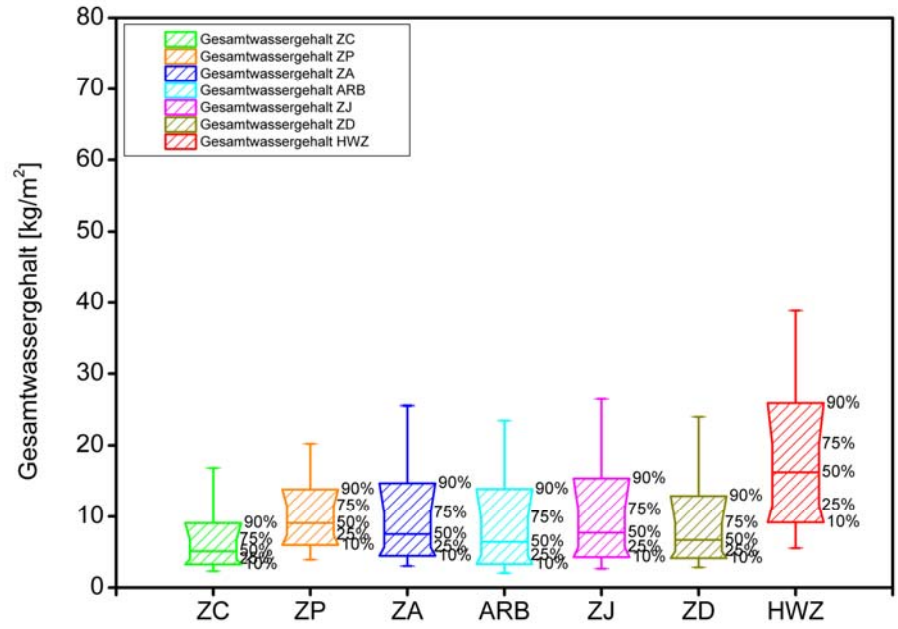
Tabelle 11: Zusammenstellung der feuchtetechnischen Kenndaten der untersuchten Backstein (Anordnung der Steine nach absteigender Rohdichte)

	Backsteintyp						
Kennwert	ZC	ZP	ZA	ARB	ZJ	ZD	HWZ
Rohdichte ρ in kg/m^3	1985	1979	1845	1807	1767	1611	1560
Offene Porosität Φ in Vol.-%	28.0	25.0	30.0	32.0	33.0	39.0	38.0

Die Auswertung der Bestandssimulation zeigt, dass Mauerwerk mit dem Backstein HWZ, welcher die niedrigste Rohdichte und die zweithöchste Porosität aufweist, sowohl den höchsten Gesamtwassergehalt des Bauteils insgesamt (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18) als auch der äusseren und inneren Backsteinschichten (vgl. Abbildung 19 bis Abbildung 22) aufweist. Aus den Liniendiagrammen, sowie den Boxplots wird zudem ersichtlich, dass die Wassergehalte dieses Backsteins eine starke Schwankungsbreite aufweisen. Es werden sehr hohe Wassergehalte erreicht, aber der Stein trocknet auch schnell wieder aus. Mauerwerk mit dem Backstein ZC mit der höchsten Rohdichte und einer relativ niedrigen Porosität, weist dagegen für alle Schichten den geringsten Wassergehalt auf. Die innenliegende diagnostische Backsteinschicht weist deutlich geringere Schwankungsbreiten der Wassergehalte auf, da sie hauptsächlich durch das Innenklima und weniger durch Schlagregeneinflüsse bestimmt ist. Die Backsteinwassergehalte der Steine ZC, ZP und ARB liegen eng beieinander. ARB weist den niedrigsten Medianwert auf. Aus den Liniendiagrammen wird deutlich, dass der Wassergehalt der inneren diagnostischen Schicht in sehr feuchten Winterhalbjahren vor allem bei den porösen Backsteinen stark ansteigt. Dadurch kann sowohl der Innenputz als auch später die Wärmedämmung Schaden nehmen. Beim Backstein ZC ist dieser Effekt am wenigsten stark ausgeprägt, wie sich aus dem niedrigen Maximalwerten des Backsteinwassergehalts erkennen lässt.

Für die Analyse der Innendämmsysteme wird in der weiteren Ausarbeitung der Stein ZC als „bester“ Backstein und der Stein HWZ als „schlechtester“ Backstein verwendet.

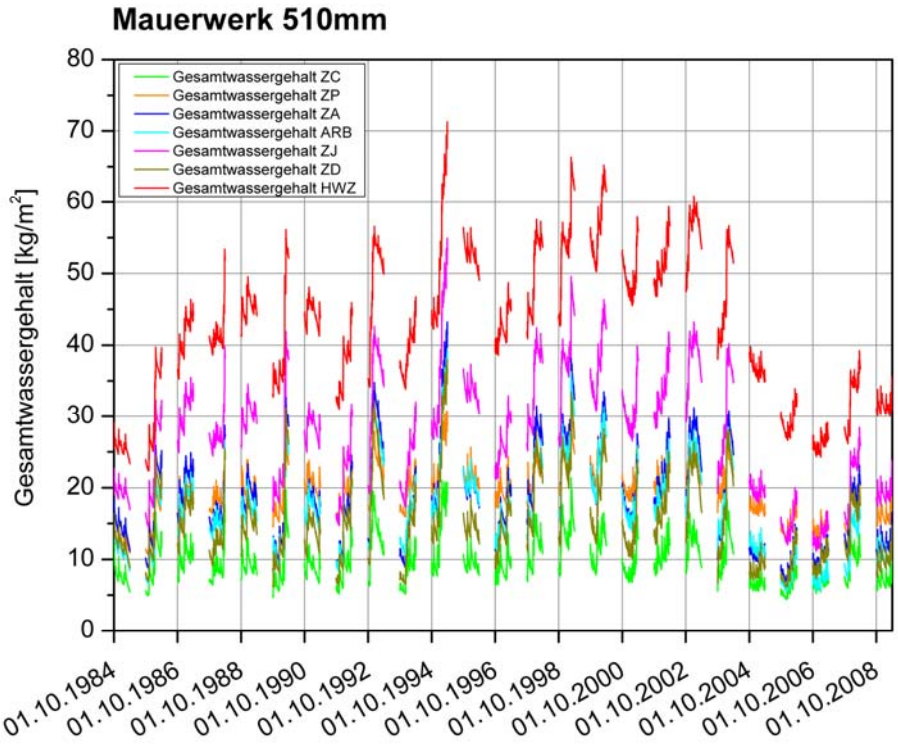


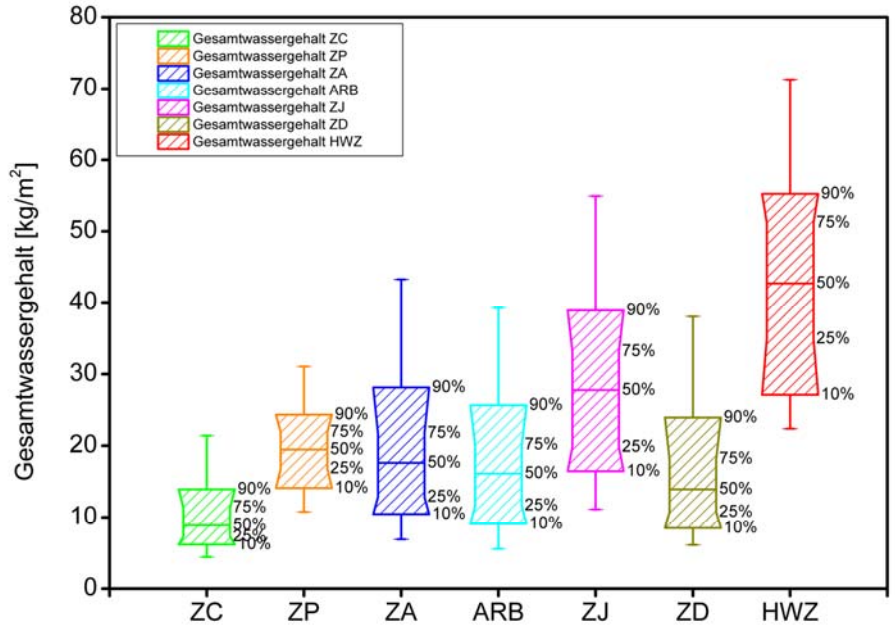


Statistik

Name [Einheit]	Mittelwert	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m2]	109825	2.3	5.1	16.82	14.52	3.25	9.05
ZP [kg/m2]	109825	3.9	9.06	20.23	16.33	5.97	13.8
ZA [kg/m2]	109825	3.01	7.51	25.56	22.55	4.44	14.66
ARB [kg/m2]	109825	2.04	6.41	23.49	21.45	3.31	13.86
ZJ [kg/m2]	109825	2.64	7.69	26.46	23.82	4.26	15.34
ZD [kg/m2]	109825	2.84	6.68	24.03	21.19	4.11	12.87
HWZ [kg/m2]	109825	5.53	16.23	38.86	33.33	9.14	25.87

Abbildung 17: Auswertung des Gesamtwassergehalts in kg/m^2 des 250 mm starken Mauerwerks

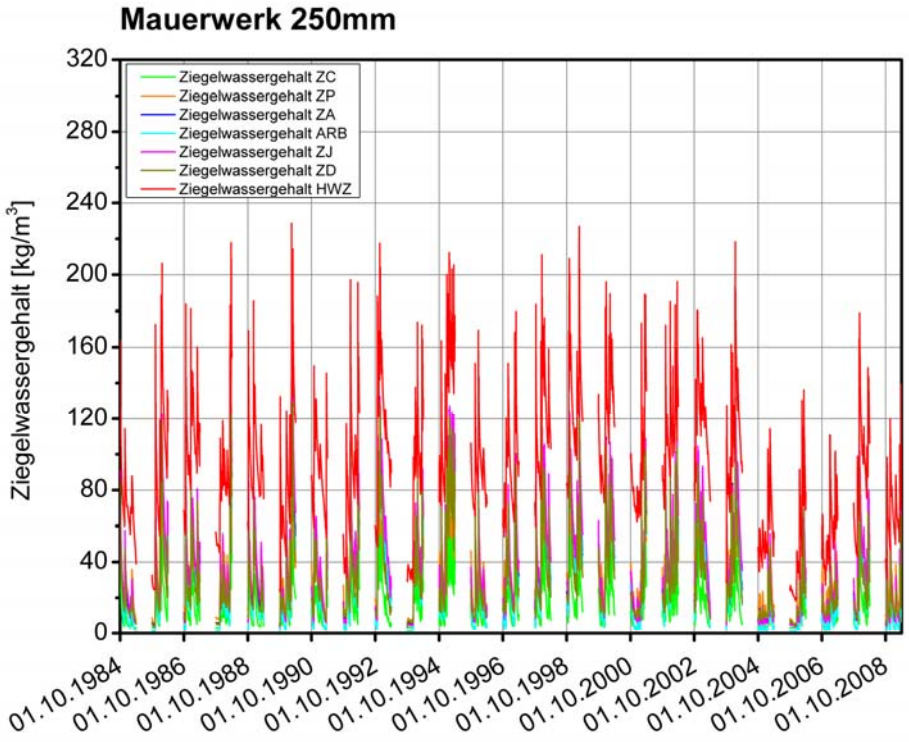


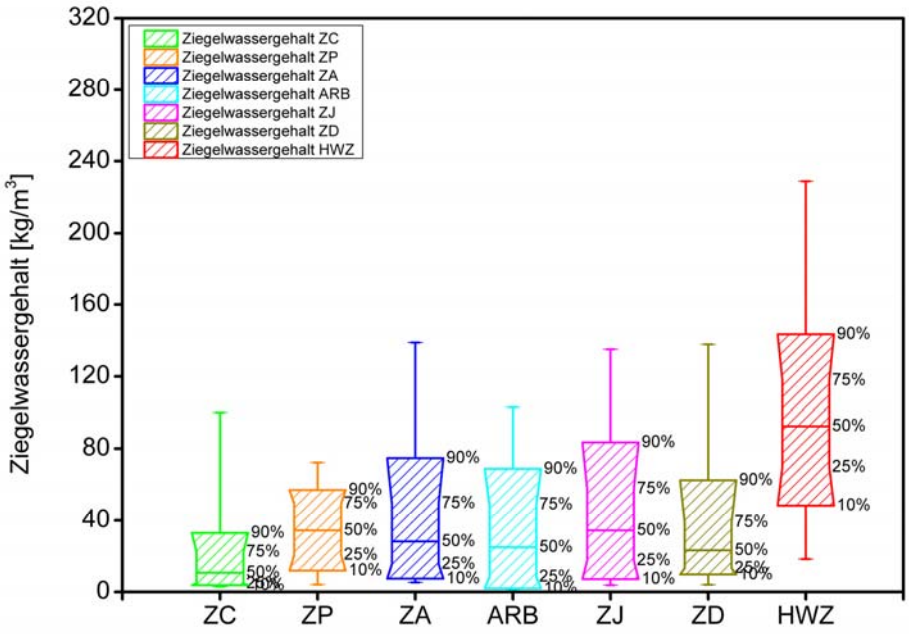


Statistik

Name [Einheit]	Anzahl	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m2]	109825	4.43	8.88	21.41	16.98	6.17	13.93
ZP [kg/m2]	109832	10.76	19.46	31.05	20.29	14.09	24.34
ZA [kg/m2]	109825	6.9	17.62	43.24	36.34	10.44	28.13
ARB [kg/m2]	109825	5.56	16.11	39.26	33.7	9.07	25.65
ZJ [kg/m2]	109825	11.12	27.75	54.93	43.81	16.46	38.91
ZD [kg/m2]	109825	6.14	13.93	38.05	31.91	8.5	23.94
HWZ [kg/m2]	109825	22.36	42.68	71.29	48.93	27.1	55.24

Abbildung 18: Auswertung des Gesamtwassergehalts in kg/m² des 510 mm starken Mauerwerks

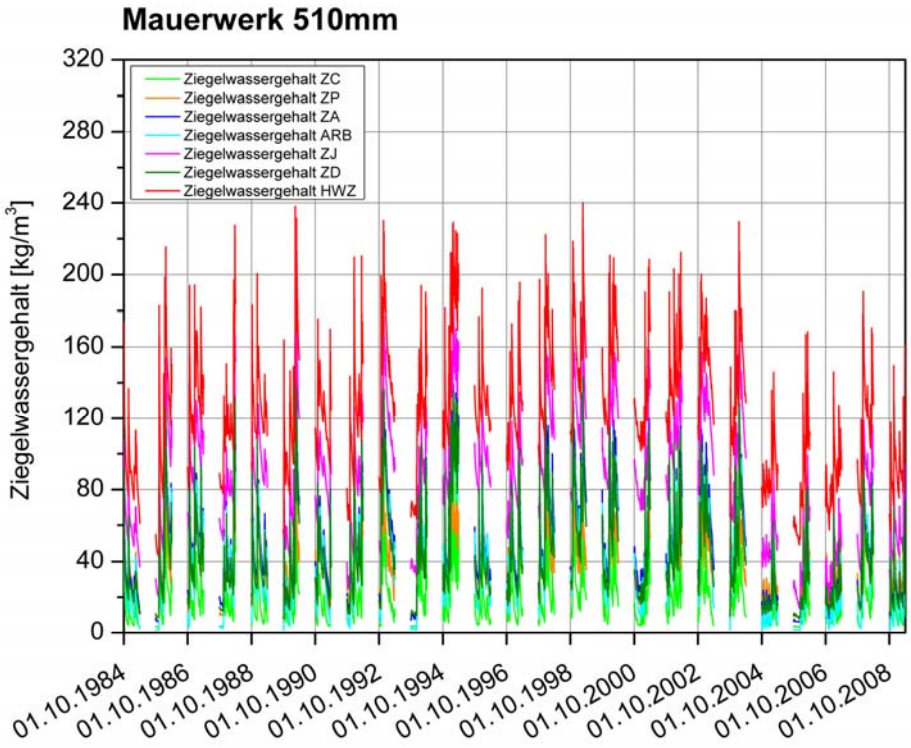


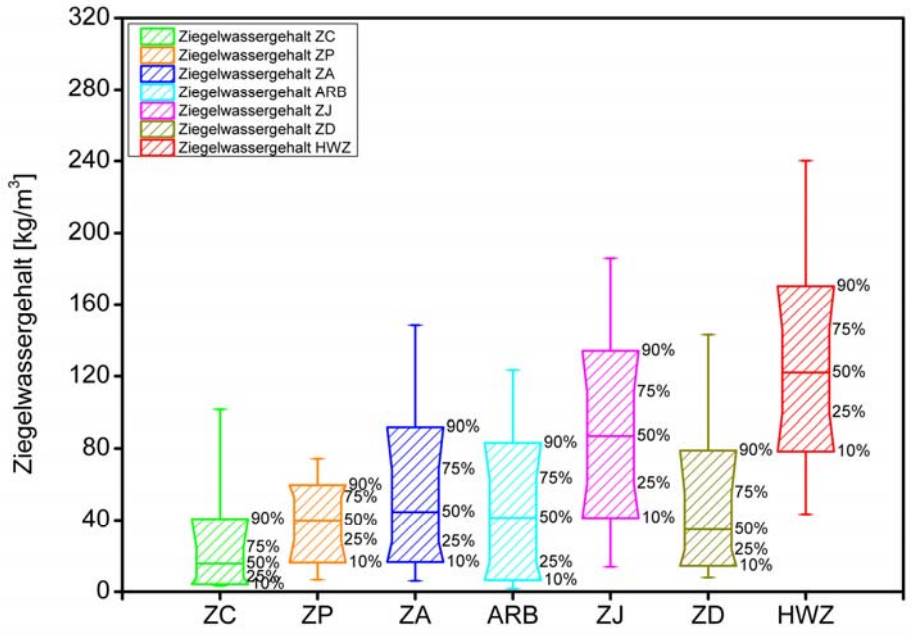


Statistik

Name [Ein	Anzahl	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m3]	109825	3.04	10.64	100.18	97.14	3.74	32.93
ZP [kg/m3]	109825	4.13	34.34	72.39	68.26	11.86	56.96
ZA [kg/m3]	109825	5.31	28.21	138.81	133.5	7.36	74.81
ARB [kg/m	109825	1.4	24.86	102.9	101.5	1.95	68.76
ZJ [kg/m3]	109825	3.78	34.34	135.03	131.25	7.08	83.47
ZD [kg/m3]	109825	4	23.21	137.8	133.8	9.7	62.45
HWZ [kg/m	109825	18.3	92.37	228.72	210.42	48.34	143.39

Abbildung 19: Auswertung des Wassergehalts des äusseren Zentimeters des Backsteins beim 250 mm dicken Mauerwerk

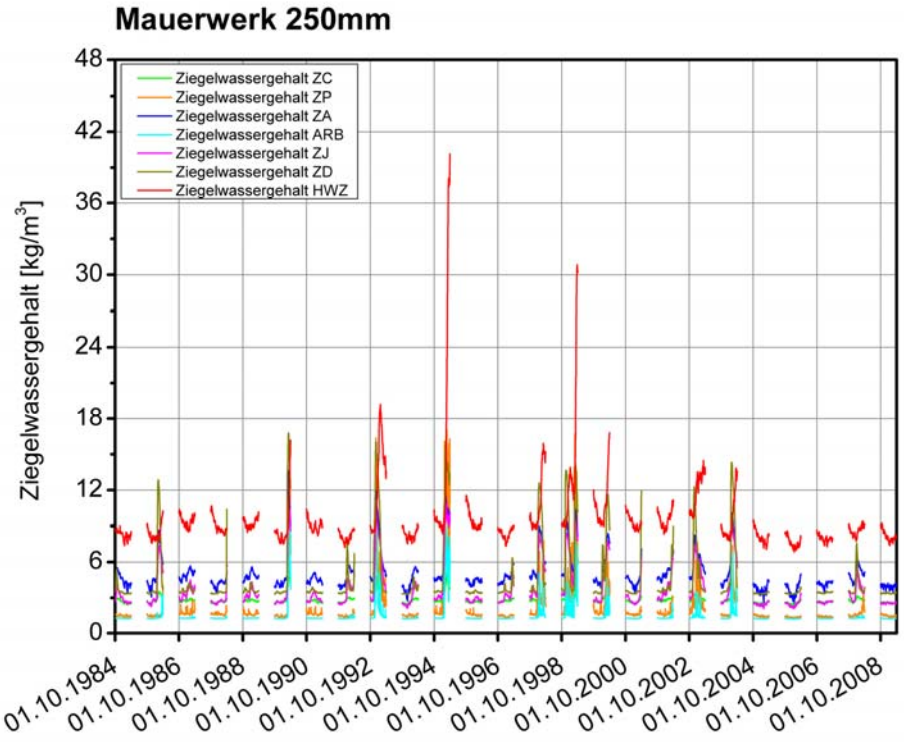


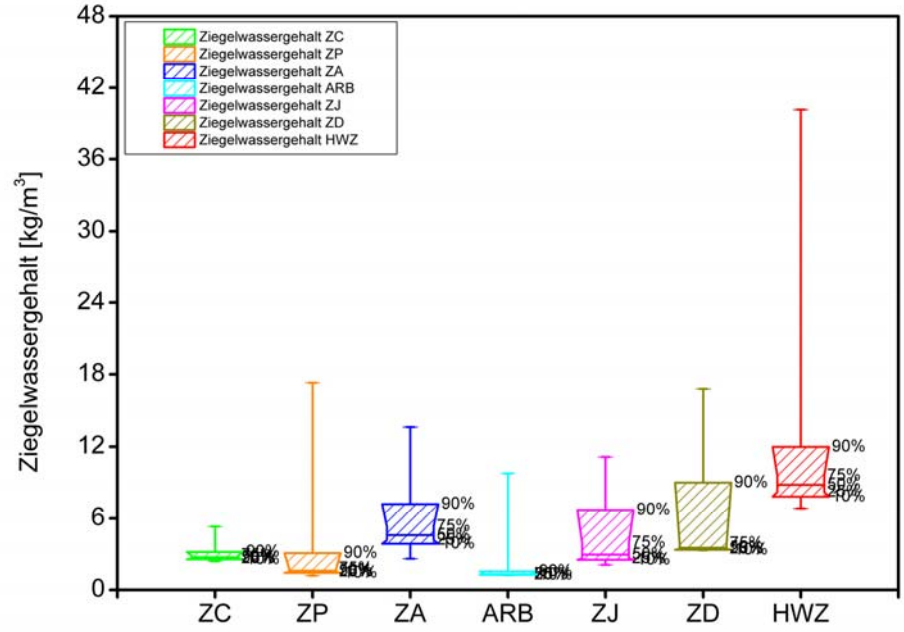


Statistik

Name [Einheit]	Anzahl	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m3]	109825	3.26	15.68	101.59	98.33	4.22	40.61
ZP [kg/m3]	109825	6.77	39.86	74.3	67.53	16.26	59.64
ZA [kg/m3]	109825	6.07	44.59	148.38	142.31	16.58	91.8
ARB [kg/m3]	109825	1.62	41.36	123.46	121.84	6.48	83.09
ZJ [kg/m3]	109825	13.9	86.97	185.98	172.08	41.2	134.04
ZD [kg/m3]	109825	7.91	34.87	143.06	135.15	14.46	78.93
HWZ [kg/m3]	109825	43.29	122.08	240.13	196.84	78.38	170.38

Abbildung 20: Auswertung des Wassergehalts des äusseren Zentimeters des Backsteins beim 510 mm dicken Mauerwerk

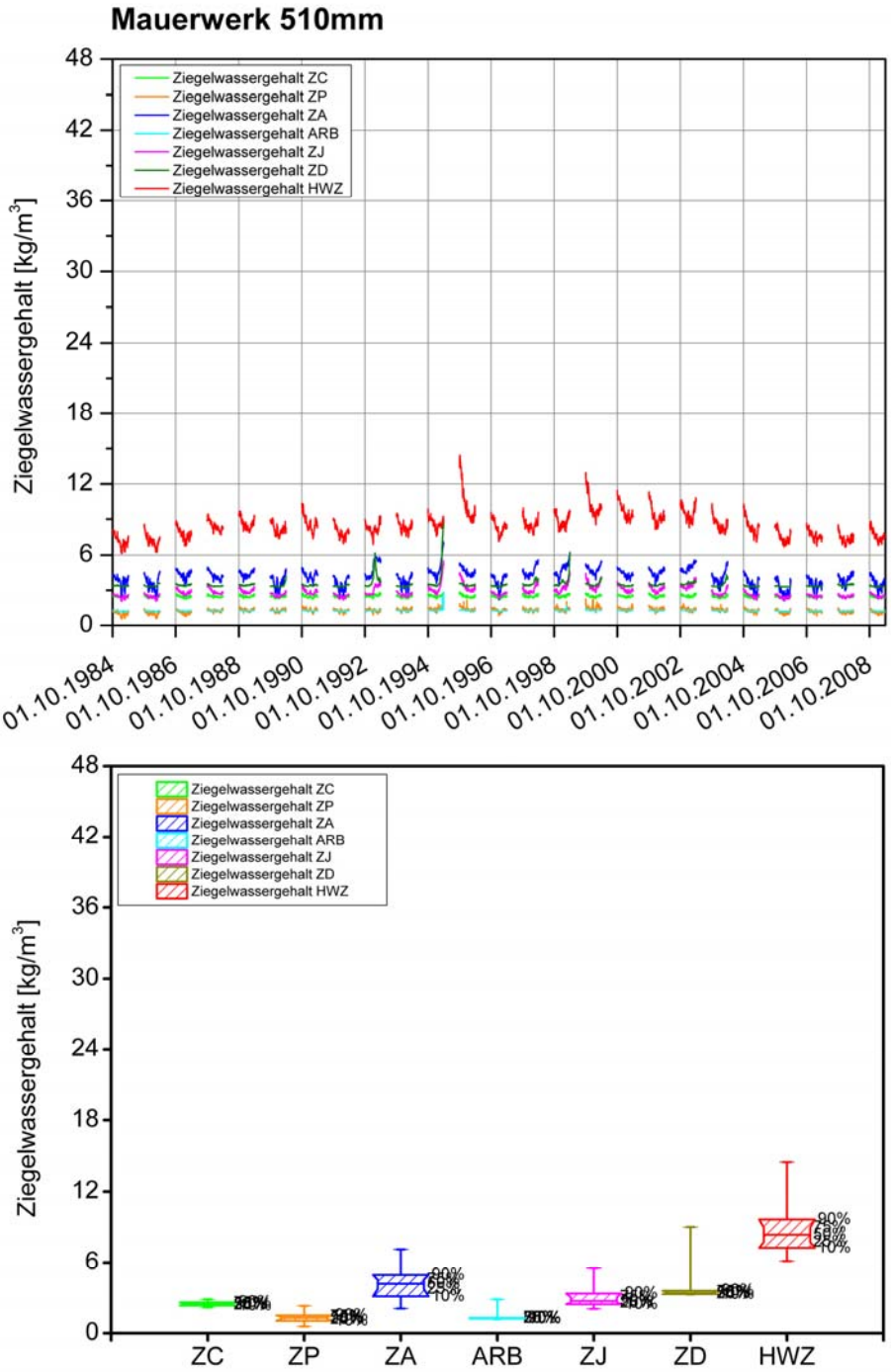




Statistik

Name [Einheit]	Anzahl	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m3]	109825	2.4	2.73	5.3	2.9	2.55	3.17
ZP [kg/m3]	109825	1.2	1.6	17.3	16.1	1.42	3.08
ZA [kg/m3]	109825	2.61	4.59	13.64	11.03	3.86	7.19
ARB [kg/m3]	109825	1.22	1.29	9.77	8.55	1.27	1.55
ZJ [kg/m3]	109825	2.09	2.95	11.15	9.06	2.51	6.7
ZD [kg/m3]	109825	3.31	3.53	16.78	13.47	3.35	9
HWZ [kg/m3]	109825	6.84	8.81	40.15	33.31	7.82	11.99

Abbildung 21: Auswertung des Wassergehalts des inneren Zentimeters des Backsteins beim 250 mm dicken Mauerwerk



Statistik

Name [Einheit]	Anzahl	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m3]	109825	2.18	2.46	2.86	0.68	2.34	2.6
ZP [kg/m3]	109825	0.57	1.31	2.32	1.75	1.05	1.5
ZA [kg/m3]	109825	2.09	4.19	7.12	5.03	3.11	4.93
ARB [kg/m3]	109825	1.18	1.28	2.87	1.69	1.24	1.29
ZJ [kg/m3]	109825	2.07	2.73	5.5	3.43	2.45	3.35
ZD [kg/m3]	109825	3.28	3.39	9.02	5.74	3.32	3.6
HWZ [kg/m3]	109825	6.12	8.36	14.44	8.32	7.25	9.66

Abbildung 22: Auswertung des Wassergehalts des inneren Zentimeters des Backsteins beim 510 mm dicken Mauerwerk

6.2 Wärmeschutz

Während hinsichtlich des Feuchteschutzes der Backsteintyp ZC als der bessere und HWZ als der schlechtere Backstein hervorgeht, ergibt sich für den Wärmeschutz eine andere Rangordnung. Die Steine mit hoher Porosität haben bessere Wärmedämmeigenschaften. Abbildung 23 zeigt die berechneten Wärmedurchgangskoeffizienten der verschiedenen Backsteine mit unterschiedlichen Mauerwerksdicken. Die Berechnung erfolgt nach SIA 180:1999.

Bei der Bestandswand mit einer Dicke von z. B. 430 mm liegt der Wärmedurchgangskoeffizient je nach Backsteinart zwischen U = 0.86 und 1.65 W/m^{2}K. Mit dem Backstein HWZ kann bei einem 430 mm starken Mauerwerk ein Wärmedurchgangskoeffizient von U = 1.22 W/m^{2}K bzw. ein Wärmedurchlasswiderstand von R = 0.65 m^{2}K/W erreicht werden. Mit dem Backstein ZC erhält man einen Wärmedurchgangskoeffizient von U = 1.56 W/m^{2}K bzw. ein Wärmedurchlasswiderstand von R = 0.47 m^{2}K/W.

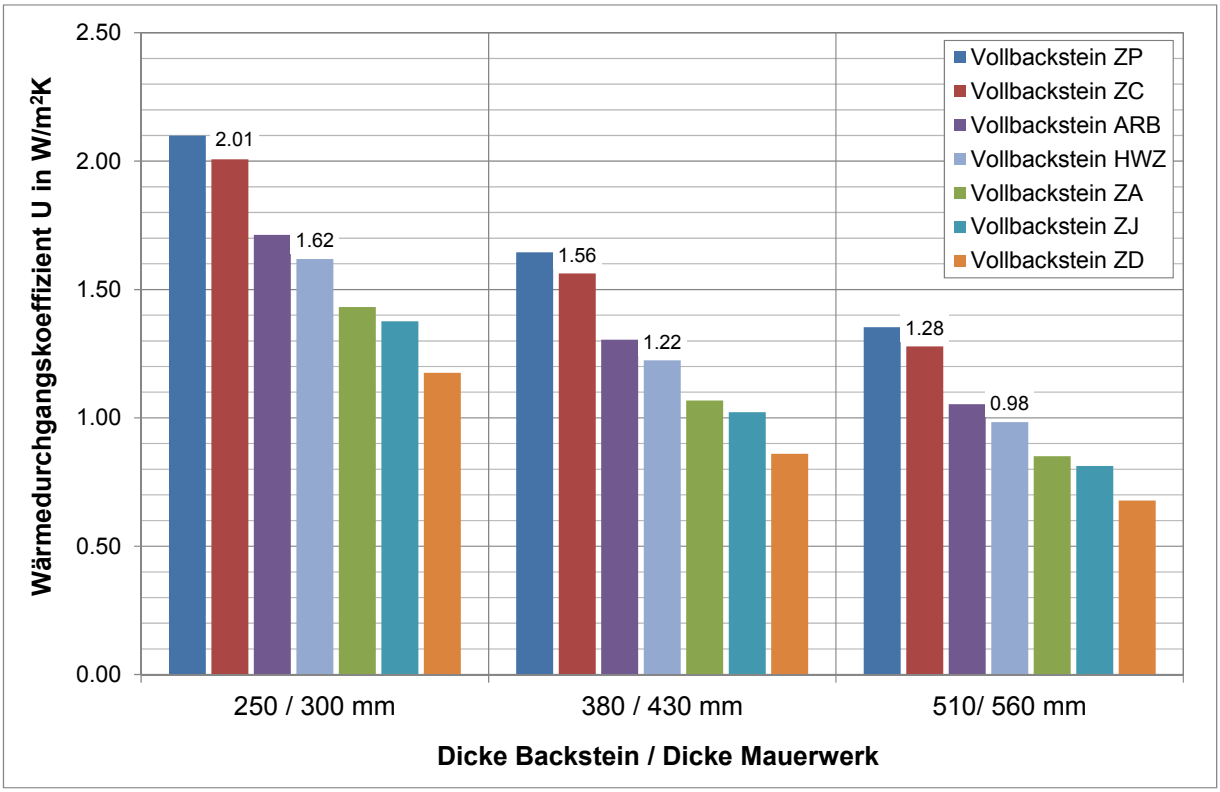


Abbildung 23: Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) von Aussenwänden mit verschiedenen Dicken und unterschiedlichen Backsteinarten

6.3 Frost-Tau-Wechsel in der Bestandswand

Nachfolgend wird auf die Frost-Tau-Wechsel eingegangen. Ein Frost-Tau-Wechsel wird als Unterschreitung der 0 °C-Temperatur definiert.

In Abbildung 24 bis Abbildung 29 sind die Frost-Tauwechsel in Abhängigkeit des gleichzeitig vorhandenen Wassergehalts für die Backsteintypen HWZ, ZC und SuRHiB (aus der Bestandsanalyse des AP1) sowie unterschiedliche Wandstärken dargestellt.

Im Abschnitt 5.2 (Tabelle 10, S. 28) wird für jeden Backsteintyp ein oberer und unterer Grenzwert des Wassergehalts bei 50 Frost-Tau-Wechsel festgelegt. Wenn der Gefrierpunkt unterschritten wird und gleichzeitig ein kritischer Wassergehalt vorhanden ist, kann es durch die Eisbildung und den damit verbundenen Spannungen zu einer Schädigung des Mauerwerks kommen [12]. Um Frostschäden im Mauerwerk zu vermeiden, dürfen daher nur eine geringe Anzahl von Frost-Tau-Wechseln bei kritischen Wassergehalten auftreten.

Die Grenzwerte sind in den Abbildungen als rot schattierte Fläche angezeigt. Im ersten Zentimeter Backstein und den restlichen Backstein wird dieser Grenzbereich nicht überschritten. In den weiteren Backsteinschichten treten bei der Bestandswand keine Frost-Tau-Wechsel mehr auf.

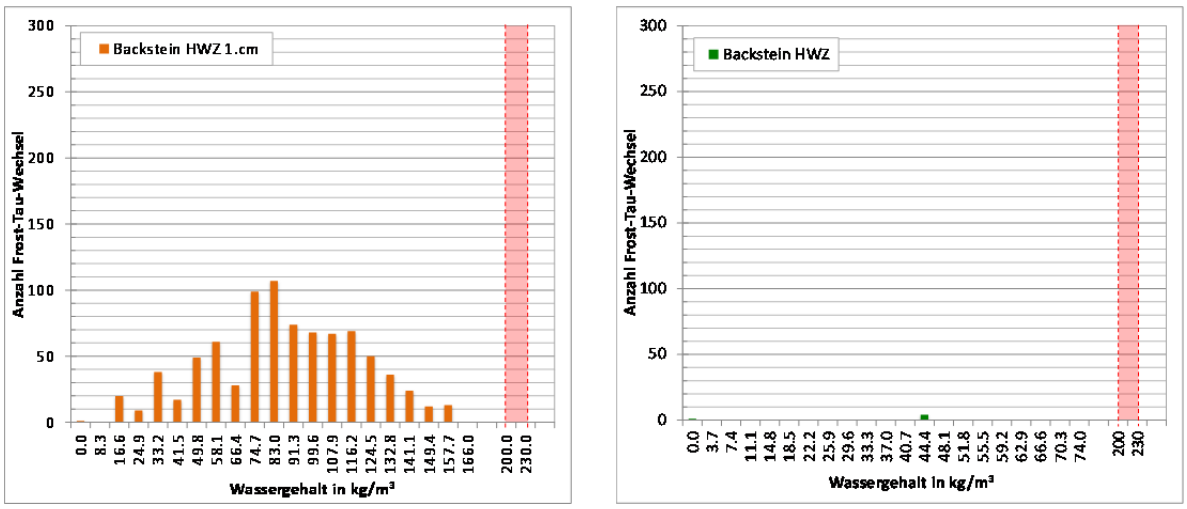


Abbildung 24: Anzahl der vorhandenen Frost-Tau-Wechsel als Funktion des Wassergehalts beim Backsteintyp HWZ mit 300 mm Wanddicke (links: 1. cm des Backsteines, rechts Mitte Backstein). Roter Balken = Grenzbereich

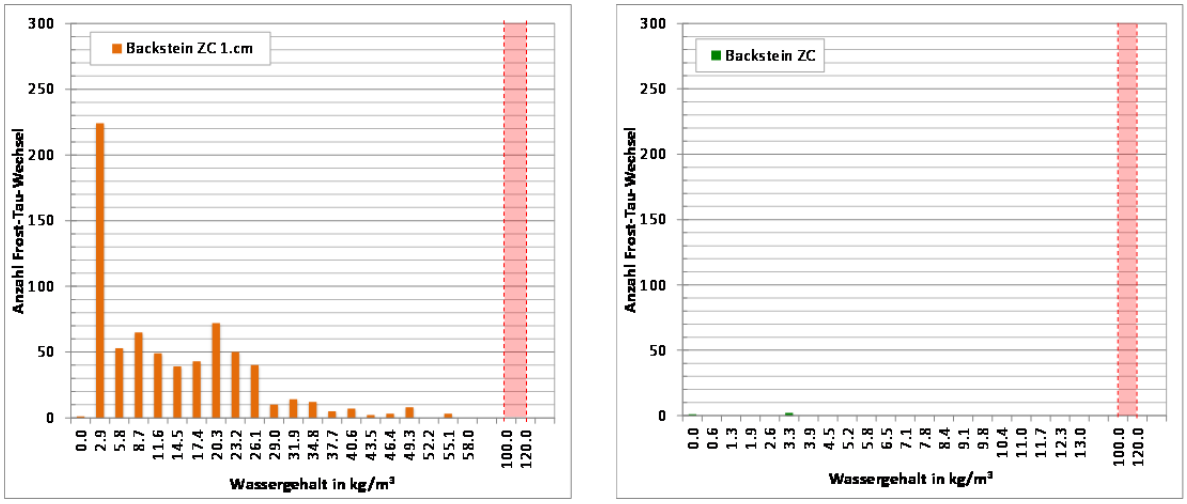


Abbildung 25: Anzahl der vorhandenen Frost-Tau-Wechsel als Funktion des Wassergehalts beim Backsteintyp ZC mit 300 mm Wanddicke (links: 1. cm des Backsteines, rechts Mitte Backstein). Roter Balken = Grenzbereich

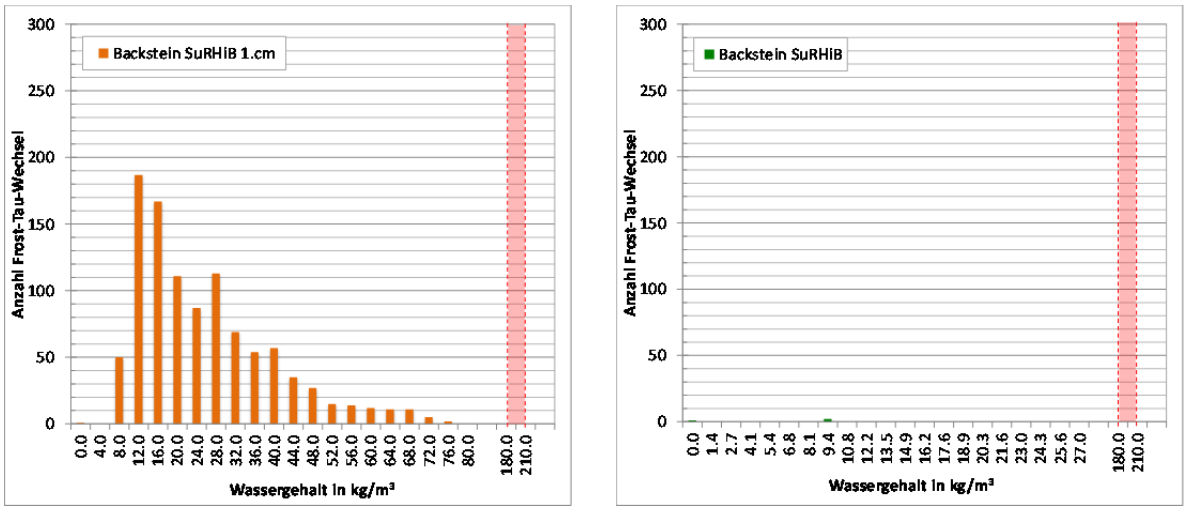


Abbildung 26: Anzahl der vorhandenen Frost-Tau-Wechsel als Funktion des Wassergehalts beim Backsteintyp SuRHib mit 300 mm Wanddicke (links: 1. cm des Backsteines, rechts Mitte Backstein). Roter Balken = Grenzbereich

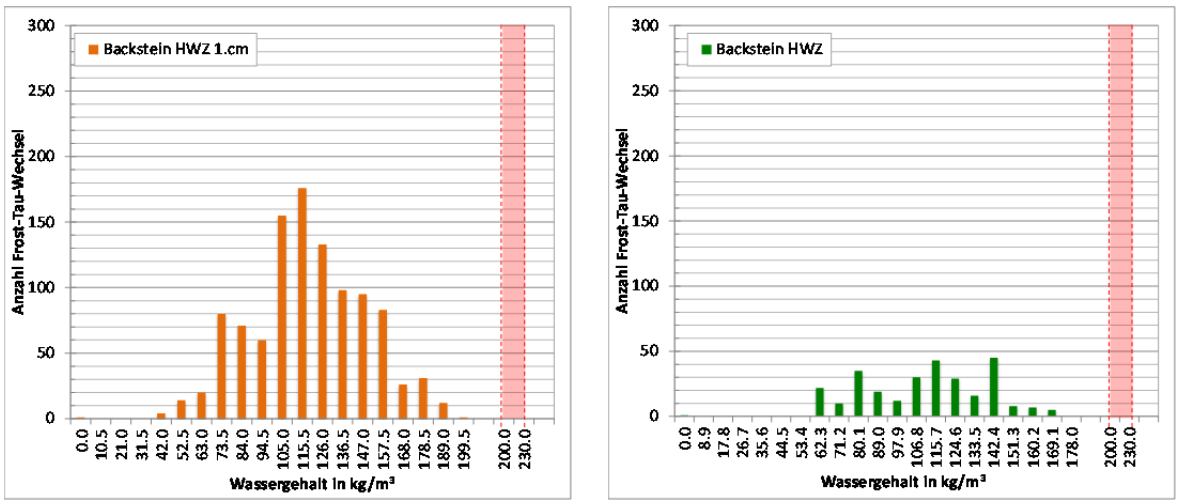


Abbildung 27: Anzahl der vorhandenen Frost-Tau-Wechsel als Funktion des Wassergehalts beim Backsteintyp HWZ mit 560 mm Wanddicke (links: 1. cm des Backsteines, rechts Mitte Backstein). Roter Balken = Grenzbereich

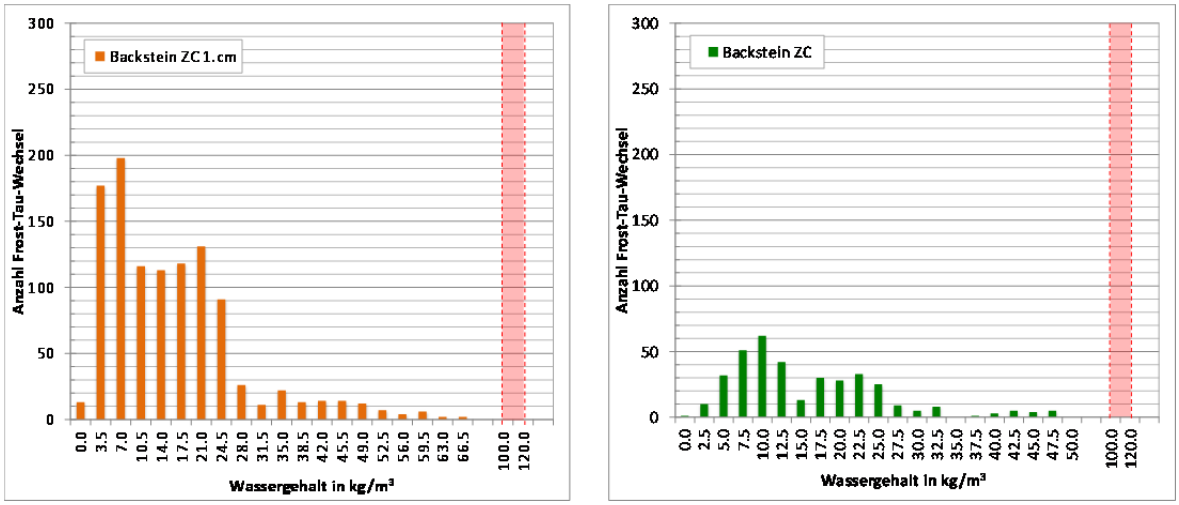


Abbildung 28: Anzahl der vorhandenen Frost-Tau-Wechsel als Funktion des Wassergehalts beim Backsteintyp ZC mit 560 mm Wanddicke (links: 1. cm des Backsteines, rechts Mitte Backstein). Roter Balken = Grenzbereich

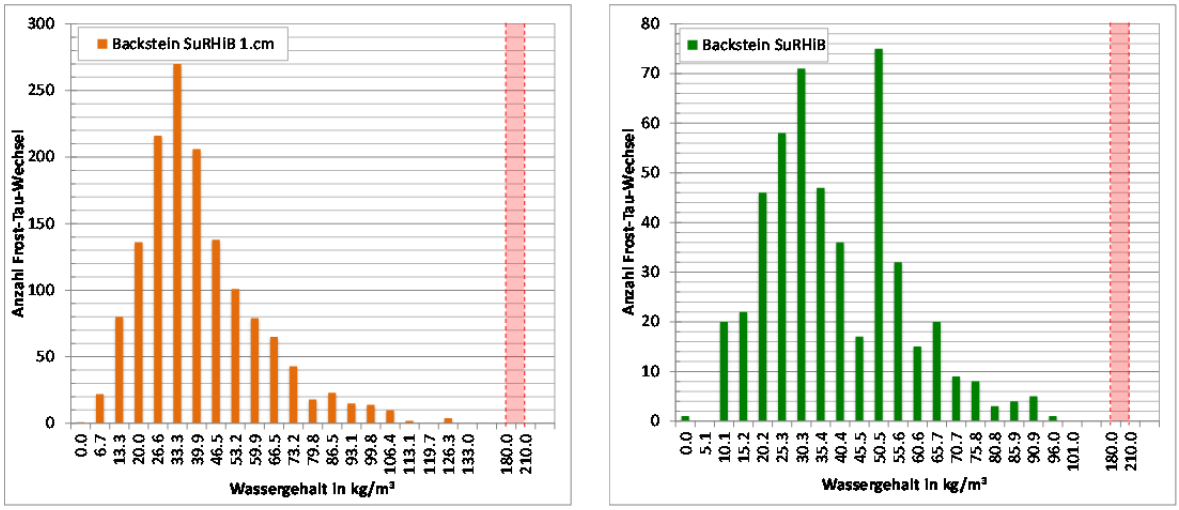


Abbildung 29: Anzahl der vorhandenen Frost-Tau-Wechsel als Funktion des Wassergehalts beim Backsteintyp SuRHiB mit 560 mm Wanddicke (links: 1. cm des Backsteines, rechts Mitte Backstein). Roter Balken = Grenzbereich

7 INNENDÄMMSYSTEME

Auf dem Markt befinden sich zahlreiche Innendämmsysteme. Diese unterscheiden sich in der Art des Dämmstoffes, ihrer Konstruktion und in ihrer bauphysikalischen Funktionsweise.

In nachfolgendem Kapitel wird zunächst der prinzipielle Aufbau eines Innendämmsystems beschrieben, sowie Vor- und Nachteile erläutert. Anschliessend werden die verschiedenen, in diesem Forschungsprojekt untersuchten Innendämmsysteme erläutert.

7.1 Allgemeines

Ein Innendämmsystem besteht aus dem Dämmstoff mit den zusätzlichen erforderlichen Schichten (z.B. Dampfbremsen oder Funktionsschichten), den Befestigungsmitteln und evtl. einer Unterkonstruktion sowie der raumseitigen Bekleidung (s. Abbildung 30).

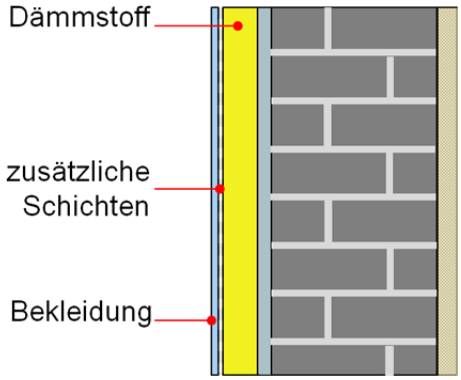


Abbildung 30: Prinzipskizze eines Innendämmsystems

Die Innendämmsysteme (IDS) werden in den Simulationen nach dem verwendeten Wärmedämmstoff wie folgt unterteilt:

- IDS Steinwolle
- IDS Glaswolle
- IDS Zellulose
- IDS Holzfaser
- IDS Schaumglas

7.1.1 Vor- und Nachteile von Innendämmmassnahmen

Immer dann, wenn keine Anordnung von Wärmedämmschichten auf der Aussenseite der Fassade möglich ist, kommen Innendämmungen zum Einsatz. Im Planungsleitfaden zu Innendämmungen des Wissenschaftlichen Technischen Arbeitsdienstes werden einige Vor- und Nachteile von Innendämmsystemen beschrieben [28].

Bei beheizten historischen Gebäuden, die keine bauliche Veränderung der Fassadenansicht erlauben, kann eine energetische Verbesserung der Aussenhülle nur durch eine innenliegende Wärmedämmung erzielt werden. Nachteilig ist aber, dass innengedämmte Aussenwände nicht mehr zum sommerlichen Wärmeschutz beitragen. Dieser Effekt ist aber von untergeordneter Bedeutung, wenn genügend andere massive Bauteile im Innenraum vorhanden sind.

Weitere Einsatzgebiete bei denen Innendämmungen Vorteile aufweisen, sind Sanierungen im dichten Gebäudebestand mit engem Grenzabstand zu Nachbargebäuden. Kosten z.B. für Gerüste können

vermieden werden. Bei einer nachträglichen Sanierung von Kellerräumen zu Wohnzwecken entfallen kostenintensive Aushubarbeiten. Eine schrittweise Sanierung in Eigenleistung ist gut möglich und auch im Winter kann saniert werden, da man nicht von der Witterung abhängig ist.

Dem gegenüber steht aber eine Reduzierung der Wohnfläche durch die Innendämmung, welche vor allem in Ballungsgebieten mit hohen Mietpreisen ein Nachteil sein kann. Zudem ist die Befestigung von Mobiliar an innen gedämmten Wänden aufwendiger.

Hinsichtlich des Schallschutzes sind die Eigenschaften der Dämmplatte und der Befestigung zu beachten. Vollflächige Verklebungen steifer Dämmstoffplatten (hohe dynamische Steifigkeit) verschlechtern die Schallschutzeigenschaften von Aussenwänden und Geschossdecken. Biegeweiche Vorsatzschalen verbessern den Schallschutz hingegen.

Der grösste Nachteil entsteht allerdings, wenn Innendämmsysteme aus hygrothermischer Sicht in Bezug auf Tauwasser, Wärmebrücken und Reduzierung des Trocknungspotenzials nicht einwandfrei funktionieren. Durch unvollständige und fehlerhafte Planung und Ausführung kommt es immer wieder zu Schadensfällen. Das Anbringen einer inneren Wärmedämmung ändert das thermische Verhalten der Gesamtkonstruktion massgeblich. Es kommt zu einem Temperaturabfall innerhalb der Dämmschicht und einer stärkeren Abkühlung des Mauerwerks in der kalten Jahreszeit. Es besteht ein Risiko eines Tauwasserausfalls im Grenzbereich des alten Mauerwerks und der Innendämmung in Folge von Konvektion- und Diffusionsprozessen. Bei diffusionsoffenen Dämmmaterialien, wie Mineralfaser, Zellulose oder Schafwolle, kann die mögliche Tauwasserbildung durch den Einsatz von Dampfbremsen auf ein zulässiges Mass begrenzt werden.

7.1.2 Dampfbremsende und dampfsperrende Schichten

Durch den Einsatz von Dampfbremsen bzw. Dampfsperren soll die Feuchtebelastung des Mauerwerks reduziert werden. Die Anordnung der Folien erfolgt in der Regel raumseitig, das heisst auf der beheizten Seite der Dämmschicht.

Die Einteilung eines Produktes in dampfbremsend oder dampfsperrend erfolgt über die wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke (s_d).

Gemäss DIN 4108, Teil 3 [16] erfolgt folgende Einteilung der Folien:

- $s_d \leq 0.5$ m diffusionsoffen
- $0.5 < s_d \leq 1500$ m diffusionshemmend (Dampfbremse)
- $s_d > 1500$ m diffusionsdicht (Dampfsperre)

Neben den üblichen Folien können auch Holzwerkstoffe wie z.B. OSB-Platten als Dampfbremse dienen. Bei Einblasdämmstoffen wie der Zellulose kommen diese oftmals zum Einsatz, da sie gleichzeitig als Schalung für den Dämmstoff genutzt werden können. Zur Gewährleistung der Luftdichtheit müssen die Stösse luftdicht abgeklebt werden.

Neben Dampfbremsen mit konstantem s_d - Wert kommen seit einigen Jahren auch sogenannte feuchteadaptive Dampfbremsen zum Einsatz, deren Funktionsweise nachfolgend erläutert wird.

Tabelle 12 enthält die Kennwerte zur Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der untersuchten Innendämmsysteme.

Tabelle 12: Wasserdampfdiffussionsäquivalente Luftschichtdicke s_d der untersuchten Innendämmsysteme

Innendämm-system	Wasserdampfdiffusions-widerstandszahl μ [-]	s_d-Wert in m je nach Dicke der Wärmedämmung				
		4 cm / 6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm
IDS Steinwolle	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2
IDS Glaswolle	1.3	65.1	65.1	65.1	65.2	65.2
IDS Zellulose	1.5	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8
IDS Holzfaser	5	6.4	6.6	6.9	7.2	7.4
IDS Schaumglas	100 000	4200	8200	10200	12200	14200

7.1.3 Feuchteadaptive Dampfbremse

Durch die Dampfbremse auf der Innenseite der Wandkonstruktion wird das Austrocknen des Mauerwerks nach innen verringert. Dies kann unter Umständen zu einer unzulässigen Erhöhung der Feuchte im Mauerwerk beispielsweise durch Schlagregen oder aufsteigende Feuchte führen. Um dies zu verhindern, kommen häufig Folien mit einem variablen s_d -Wert zum Einsatz. Diese sogenannten feuchteadaptiven Dampfbremsen gewährleisten den winterlichen Feuchteschutz und erlauben zugleich sommerliche Trocknungsprozesse nach innen, da sie in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte diffusionsdichter oder diffusionsoffener sind (vgl. Abbildung 31). Im Winterfall (Trockenbereich) bei 30 – 50 % Raumluftfeuchte besitzen sie einen hohen s_d-Wert, wodurch der Feuchteintrag reduziert wird. Im Sommerfall (Feuchtbereich) bei 60 - 70 % ist der s_d-Wert entsprechend niedriger, wodurch die Konstruktion austrocknet. Die Folie darf nicht in Räumen eingesetzt werden, in welchen über längere Zeit hohe Raumluftfeuchten vorliegen. Zu diesen zählen beispielsweise Schwimmbäder und Grossküchen. Um die Funktion der Folie zu gewährleisten, ist darauf zu achten, dass ausschliesslich dampfdiffusionsoffene Dämmstoffe und Bauteilschichten auf der Raumseite verwendet werden [29].

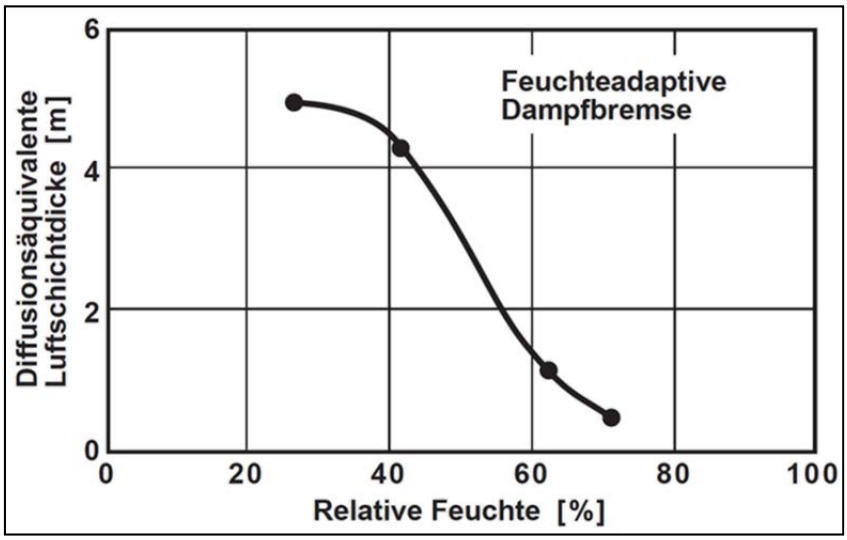


Abbildung 31: Variabler s_d-Wert einer feuchteadaptiven Dampfbremse als Funktion der relative Raumluftfeuchte (entnommen aus [30])

Für die Simulation der Innendämmsysteme kommt in diesem Projekt einerseits die feuchteadaptive Dampfbremse Intello der Firma Pro Clima zum Einsatz, deren Materialkenndaten in der WUFI®-Datenbank hinterlegt sind. Im Winter bietet sie beispielsweise bei 30 % relativer Luftfeuchte einen Diffusionswiderstand von s_d = 16 m. Im Sommer liegt der Diffusionswiderstand der feuchteadaptiven Dampfbremse z.B. bei 70 % relativer Feuchte bei 1.5 m. Ferner wird für die Simulationen mit Glaswolledämmung die feuchtevariable Dampfbremse Vario KM Duplex sowie Vario Xtra Safe von Saint-Gobain Isover SA verwendet. Bei Vario KM Duplex variiert der s_d-Wert zwischen 0.3 und 5 m, bei Vario Xtra Safe variiert der s_d – Wert zwischen 0.3 und 20 m.

7.1.4 Kapillaraktive Dämmstoffe

Bei kapillaraktiven Dämmmaterialien wie z.B. Kalziumsilikatplatten kann auf eine Dampfbremse im klassischen Sinn verzichtet werden. Die über die Dampfdiffusion eindringende Feuchtigkeit kann als Tauwasser zwischen der Innendämmung und Bestandswand ausfallen. Die kapillaraktive Innendämmung sorgt dafür, dass dieses Tauwasser über einen grösseren Bereich verteilt wird. Häufig werden hydrophile Dämmstoffe eingesetzt, an deren inneren Porenwandungen sich die Wassermoleküle anlagern können. Es findet ein Flüssigtransport in Richtung des Gefälles der relativen Feuchte bzw. der vorliegenden kapillaren Saugkräfte statt. Die Wasserdampfsorptionsfähigkeit der Dämmung bewirkt eine Speicherung der Feuchte während des Winters und eine Rücktrocknung der Konstruktion im Sommer [31].

7.1.5 Dämmsysteme ohne Dampfbremse

Bei diffusionsdichten Dämmmaterialien, wie z.B. Schaumglas ist ebenfalls eine Ausführung ohne Dampfbremse möglich [32]. Bei der Montage ist auf eine vollflächige Verklebung auf der Bestandswand zu achten. In vorliegendem Projekt wird als diffusionsdichter Dämmstoff der Einsatz von Schaumglas (vgl. Abschn. 7.3.4) untersucht.

7.2 Wärmeschutz der Innendämmsysteme

Die Mindestdicke der erforderlichen Wärmedämmung, um die Anforderungen an den Wärmeschutz im Winter zu erfüllen, ist je nach Backstein und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes anders. Zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten wird die SIA 180 herangezogen. Tabelle 13 enthält die Kennwerte zur Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien.

Tabelle 13: Wärmeleitfähigkeiten der verwendeten Materialien zur Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte)

Material	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK
Kalkzementputz	0.80
Kalkputz	0.70
Backstein HWZ	0.60
Backstein ZC	0.92
Holz (Unterkonstruktion)	0.13
Gipskartonplatte	0.25
Holzfaserdämmung	0.042
Steinwolledämmung	0.036
Glaswolledämmung	0.035
Zellulosedämmung	0.037
Schaumglas	0.041

Für einen Wärmedurchgangskoeffizienten von U ≤ 0.40 W/m²K werden mind. 80 mm Innendämmung benötigt (s. Tabelle 14). Wenn der Backstein, wie z.B. Typ HWZ eine kleinere Wärmeleitfähigkeit besitzt und eine grössere Mauerstärke vorhanden ist, dann sind nur 60 mm Innendämmung notwendig (s. Tabelle 14, Spalte Backstein HWZ, 56 cm MW).

Um den Primäranforderungen an die Gebäudehülle bei Sanierungen (Einzelbauteilnachweis) gemäss der SIA 380/1 (U-Wert = 0.25 W/m²K) zu genügen, kann bei einer Bestandswand mit U = 1.2 W/m²K mit Wärmedämmstoffdicken von mind. 12 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von λ_T = 0.032 W/m²K gerechnet werden. Bei einer Bestandswand mit U = 2.1 W/m²K wäre eine Dicke der Wärmedämmstoffschicht von mind. 14 cm notwendig.

Tabelle 14: Mindestdicke der Wärmedämmung, um die Anforderungen des Wärmeschutzes nach SIA 180:1999 zu erfüllen

U-Wert = 0.4 W/m²K	Backstein ZC		Backstein HWZ	
	30 cm MW[1]	56 cm MW	30 cm MW	56 cm MW
IDS Holzfaserplatte λ = 0.042 W/mK	80 mm	80 mm	80 mm	60 mm
IDS Steinwolle λ = 0.036 W/mK (inkl. Holz-Unterkonst.)	80 mm	60 mm	80 mm	60 mm
IDS Glaswolle λ = 0.035 W/mK (inkl. Holz-Unterkonst.)	80 mm	60 mm	80 mm	60 mm
IDS Zellulose λ = 0.037 W/mK (inkl. Holz-Unterkonst.)	80 mm	80 mm	80 mm	60 mm
IDS Schaumglas λ = 0.041 W/mK	80 mm	80 mm	80 mm	60 mm

[1] MW = Mauwerk (Backstein inkl. Aussen- und Innenputz)

7.3 Innendämmsysteme

In vorliegendem Projekt werden Innendämmsysteme (IDS) Steinwolle, Glaswolle, Zellulose, Holzfaser und Schaumglas untersucht. Die Innendämmsysteme Steinwolle und Glaswolle gehören zum Typ Mineralwolledämmung.

Die Dämmstoffe wurden aus zwei Gründen gewählt. Erstens werden diese fünf Wärmedämmstoffe häufig für den Einsatz im Innenraum verwendet. Ihre Wärmeleitfähigkeit liegt im Bereich von 0.035 bis 0.045 W/(mK), in welchem sich die meisten Dämmstoffe bewegen. Zweitens gehören sie zu den bestklassifizierten nach den vier Ökoindikatoren der KBOB *Ökobilanzdaten im Baubereich* (vgl. Tabelle 15). Darüber hinaus verfügen zwei der untersuchten Dämmstoffe über eine Umwelt-Produktdeklaration nach EN ISO 14025 bzw. EN 15804. Diese sind PAVATEX Holzfaserdämmstoffe und ISOVER Glaswolle. Die Umwelt-Produktdeklaration beinhaltet die Ergebnisse einer nach EN ISO EN ISO 14025:2010 durchgeführten Ökobilanz. Die Ökobilanz umfasst die Rohstoff- und Energiegewinnung, Rohstofftransporte, die eigentliche Herstellungsphase einschliesslich der Verpackung und deren energetischer Verwertung sowie das „End of Life“ in einem Biomassekraftwerk mit Energierückgewinnung. Die deklarierten Ergebnisse der Ökobilanz sind somit produktspezifisch.

Tabelle 15: Auszug aus dem KBOB Merkblatt Ökobilanzdaten in Baubereich, Stand Juli 2012

Wärmedämmstoffe	UBP [1]	Primärenergie Gesamt in MJ pro kg	Graue Energie in MJ pro kg	Treibhausgas-emissionen in kg CO_2 pro kg
Schaumglas	903	26.5	19.7	1.17
Weichfaserplatte	884	23.4	11.0	0.432
Zellulosefasern (eingeblasen)	1270	10	7.43	0.392
Steinwolle	1080	16.9	15.2	1.04
Korkplatte	2020	52.3	25	1.27
Glaswolle	2240	49.7	45.8	1.51
Polystyrol expandiert (EPS)	5220	106	105	7.36
Polyurethan (PUR/PIR)	6100	104	101	6.79
Polystyrol extrudiert (XPS)	8490	101	100	14.3

[1] Umweltbelastungspunkte

7.3.1 Mineralwolledämmung

Mineralwolle ist ein Dämmstoff mit wolliger Beschaffenheit, der aus flüssigem Stein, Schlacke oder Glas hergestellt wird [33]. Mineralwolle ist der Oberbegriff für Dämmstoffe aus Steinwolle oder Glaswolle. Mineralwolldämmstoffe sind in Europa die am weitesten verbreiteten Dämmprodukte. Durch die Variabilität der Rohstoffe und Zusatzstoffe sowie auch durch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum.

Die Mineralwolldämmstoffe können kaum Feuchtigkeit in flüssiger Form aufnehmen und zählen daher zu den nicht sorptiven Dämmstoffen. Gemäss SIA 279 [33] besitzt Mineralwolle die in Tabelle 16 aufgeführten Eigenschaften.

Tabelle 16: Materialkennwerte von Mineralwolle gemäss SIA 279 [33]

Materialkennwert	Produkt	Wert
Rohdichte ρ	Steinwolle (Platten, Matten, Rollen)	15 - 200 kg/m³
	Glaswolle (Platten, Matten, Rollen)	10 - 120 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit λ (Bemessungswert)	alle	0.055 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	alle	2 [-]
Wärmespeicherkapazität C_p	Steinwolle (Platten, Matten, Rollen)	0.23 Wh/(kgK)
	Glaswolle (Platten, Matten, Rollen)	0.23 – 0.37 Wh/(kgK)

7.3.1.1 IDS Steinwolle

Steinwolle ist Mineralwolle, die vornehmlich aus natürlich vorkommenden vulkanischen Gesteinen gewonnen wird [33]. Steinwolle ist leicht zu verarbeiten und vielseitig einsetzbar. Sie ist diffusionsoffen und nichtbrennbar. Steinwollefasern sind gegen Schimmel, Fäulnis und Ungeziefer resistent. Der Dämmstoff besitzt eine gute Wärmeleitfähigkeit, eine geringe Wärmespeicherfähigkeit und kann kaum Feuchtigkeit aufnehmen.

Ein Forschungspartner im Projekt SuRHiB ist die Flumroc AG. Für die Simulationen wird aus der WUFI®-Datenbank eine Steinwollplatte gewählt, welche die wichtigsten feuchtetechnischen Kennwerte für die Berechnung enthält. In Tabelle 17 sind die für die Simulation wichtigsten Materialkenndaten aufgeführt, welche den Werten einer Steinwolleplatte der Firma Flumroc AG entsprechen.

In Abbildung 32 ist eine Konstruktion des Innendämmsystems Steinwollplatte dargestellt, welche so in der Praxis häufig umgesetzt wird. In der Simulation werden die Installationsebene sowie die Innenverkleidung nicht berücksichtigt. Für die Dampfbremse wird ein s_d-Wert von 1 m bzw. eine feuchtevariable Dampfbremse (Intello von pro clima) angenommen. Es werden Dämmstärken zwischen 60 und 140 mm untersucht.

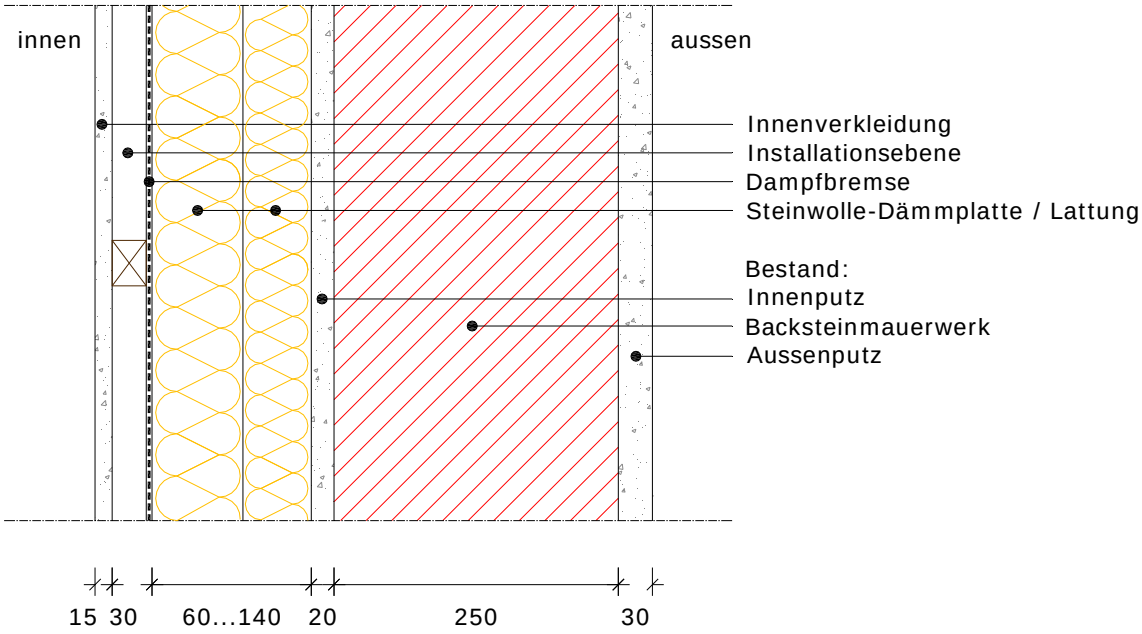


Abbildung 32: Konstruktiver Aufbau des Innendämmsystems mit Steinwolle am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

Tabelle 17: In der Simulation verwendete Materialkennwerte einer Steinwolleplatte gemäss der WUFI® Datenbank

Materialkennwert	Wert
Rohdichte ρ	30 kg/m^3
Porosität	0.95 m^3/m^3
Wärmespeicherkapazität Cp	850 J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit λ	0.036 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	1.1 [-]

7.3.1.2 IDS Glaswolle

Glaswolle ist Mineralwolle, die aus geschmolzenem Glas hergestellt wird [33]. Glaswolle besitzt im Prinzip die gleichen Eigenschaften wie Steinwolle. So ist sie ebenfalls leicht zu verarbeiten, vielseitig einsetzbar, diffusionsoffen, nichtbrennbar und gegen Schimmel, Fäulnis und Ungeziefer resistent. Glaswolle besitzt eine gute Wärmeleitfähigkeit, jedoch eine geringe Wärmespeicherfähigkeit (vgl. Abschn. 7.3.1.1). Glaswolle kann kaum Feuchtigkeit aufnehmen und die Dämmfähigkeit wird durch Feuchte stark herabgesetzt (s. Abschn. 5.5.3).

Saint-Gobain ISOVER unterstützt das Forschungsprojekt als Projektpartner. Dem Produktdatenblatt der untersuchten Glaswolledämmplatte sind untenstehende Materialkennwerte zu entnehmen (vgl. Tabelle 18), welche auch in die Simulation übernommen werden. In Abbildung 33 bis Abbildung 34 sind in der Praxis gängige Konstruktionen des Innendämmsystems mit Glaswolledämmung gezeigt. Für die Simulationen wird die Konstruktion der Abbildung 34 verwendet. Die Dicke der Glaswolledämmung wird zwischen 40 und 160 mm variiert. Als feuchtevariable Dampfbremse wird die Vario KM Duplex bzw. Vario Xtra Safe von Saint-Gobain ISOVER eingesetzt. Die Dicke der Glaswolledämmung wird zwischen 40 und 160 mm variiert.

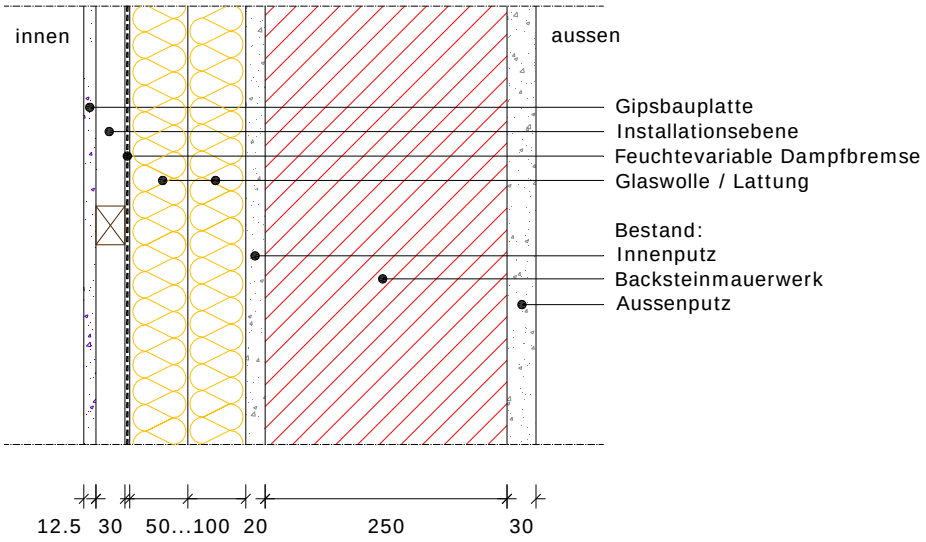


Abbildung 33: Konstruktiver Aufbau mit Installationsebene des Innendämmsystems mit Glaswolle am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

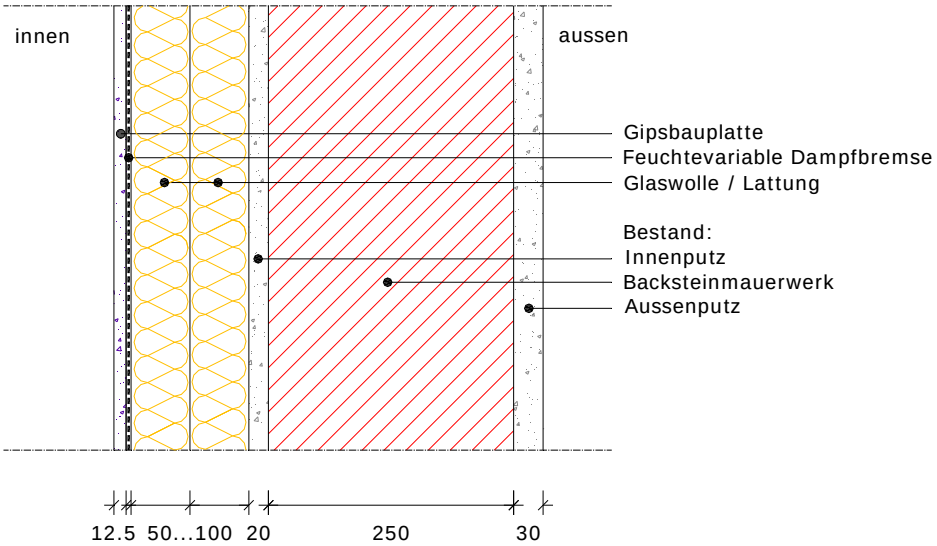


Abbildung 34: Konstruktiver Aufbau ohne Installationsebene des Innendämmsystems mit Glaswolle am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

Tabelle 18: In der Simulation verwendete Materialkennwerte einer Glaswolleplatte gemäss WUFI® Datenbank

Materialkennwert	Wert
Rohdichte ρ	20 kg/m^3
Porosität	0.99 m^3/m^3
Wärmespeicherkapazität Cp	840 J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit λ	0.035 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	1.3 [-]

7.3.2 Zellulosedämmung

Zellulose ist ein fasriger Dämmstoff aus Papier, Rohpappe oder Holz, mit oder ohne Bindemittel, flammhemmenden Mitteln oder Zusätzen [33]. Die Zusätze wie Borsalze verhindern Schädlingsbefall und verbessern die brandschutztechnischen Eigenschaften. Der Dämmstoff hat hygroskopische Eigenschaften und kann demnach gut Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufnehmen und wieder abgeben. Die Zellulosefasern werden in die zu dämmenden Bauteile eingeblasen.

Gemäss SIA 279 [33] besitzt Zellulosedämmung die in Tabelle 19 aufgeführten Eigenschaften.

Tabelle 19: Materialkennwerte von Zellulose gemäss SIA 279 [33]

Materialkennwert	Produkt	Wert
Rohdichte ρ	Zellulose (lose)	30 - 80 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit λ (Bemessungswert)	Zellulose (lose)	0.060 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	Zellulose (lose)	1 - 2 [-]
Wärmespeicherkapazität Cp	Zellulose (lose)	0.54 – 0.61 Wh/(kgK)

7.3.2.1 IDS Zellulose

Für die WUFI® - Simulationen wird eine Zellulosedämmung des Herstellers Isofloc AG verwendet. Die Dämmung besteht standardmässig zu 92 % aus Zeitungspapier und zu 8 % aus Zusätzen für einen verbesserten Brandschutz und zur Konservierung. Sie ist diffusionsoffen, schwer entflammbar und besitzt eine hohe Wärmekapazität. In der WUFI®-Datenbank ist eine Zellulosedämmung mit allen relevanten wärme- und feuchtetechnischen Grössen des Herstellers Isofloc hinterlegt, welche die in Tabelle 20 aufgeführten Materialeigenschaften aufweist. Jedoch liegt eine zusätzliche Untersuchung zum kapillaren Rückleitungsvermögen des Dämmstoffes vor. Die Messergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass der Flüssigtransport der Zellulosefaser in Bereich des kapillaren Feuchtetransportes mit den Kennwerten der numerischen Simulationen etwas unterschätzt wird [26]. Dadurch liegt die Beurteilung des Versagenskriteriums 5.4 auf der sicheren Seite.

In Abbildung 35 ist eine Variante des Innendämmsystems Zellulose dargestellt. Als dampfbremsende Schicht kommt in den Simulationen eine OSB-Platte zum Einsatz, die gleichzeitig als Begrenzung für den Dämmstoff genutzt wird. Zur Gewährleistung der Luftdichtheit ist es notwendig, die Stösse abzukleben. Die Dicke der Zellulosedämmung wird zwischen 40 und 140 mm variiert.

Als zweite Variante wird eine feuchtevariable Dampfbremse (Intello von pro clima) und eine Gipsbauplatte als innere Bekleidung untersucht (s. Abbildung 36). Die Dicke der Zellulosedämmung wird zwischen 40 und 140 mm variiert.

Das Isofloc-Innendämmsystem muss laut Hersteller auf eine trockene Wand (Feuchteprofil 2, s. Abschn. 3.2.6) aufgebracht werden.

Tabelle 20: Materialkennwerte einer Zelluslosedämmung der Firma Isofloc gemäss der WUFI®-Datenbank

Materialkennwert	Wert
Rohdichte ρ	50 kg/m^3
Porosität	0.95 m^3/m^3
Wärmespeicherkapazität Cp	2150 J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit λ	0.037 W/(mk)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	1.5 [-]

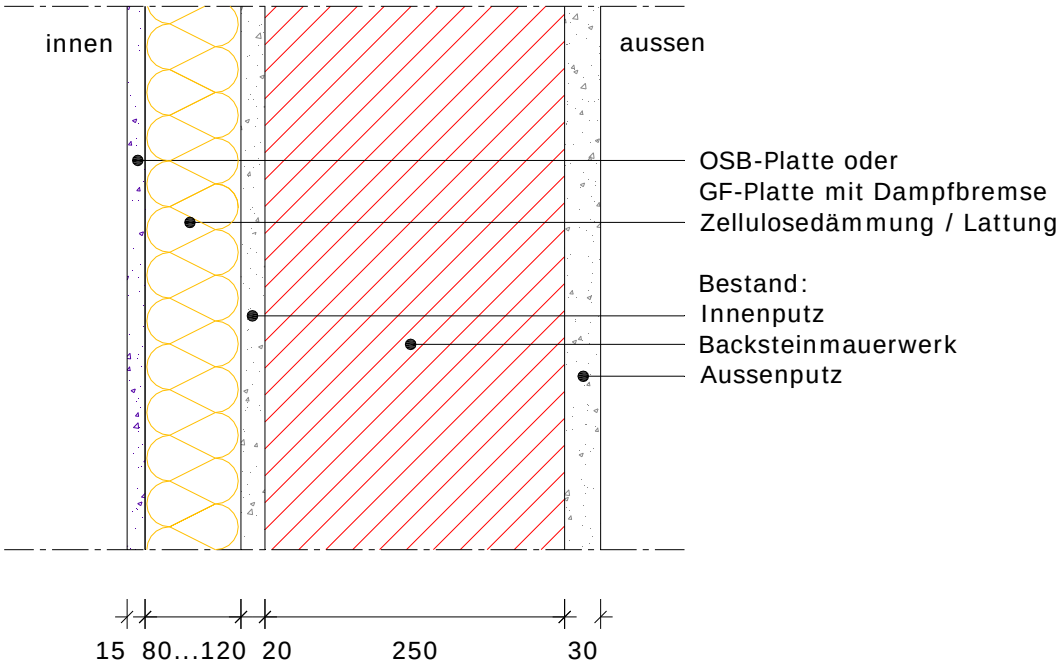


Abbildung 35: Konstruktiver Aufbau des Innendämmsystems Zellulose mit OSB als innere Beplankung am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

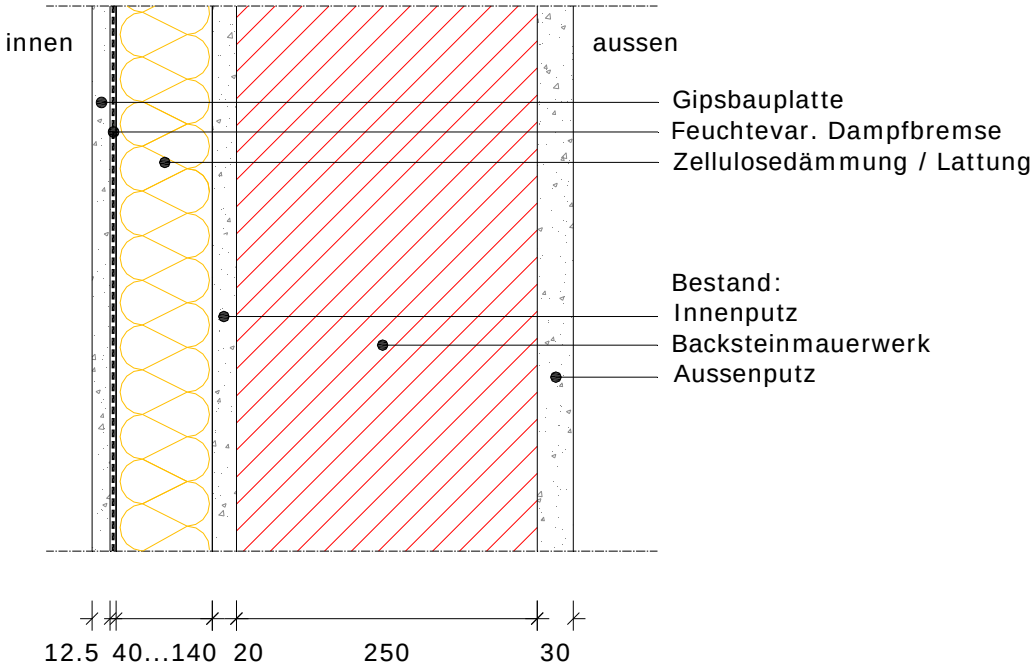


Abbildung 36: Konstruktiver Aufbau des Innendämmsystems Zellulose mit feuchtevariabler Dampfbremse und Gipskartonplatte als innere Beplankung am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

7.3.3 Holzfaserdämmplatte

Eine Holzfaserdämmplatte ist ein Produkt aus Holzfasern, mit oder ohne Bindemittel, welches mit oder ohne Hitzeeinwirkung in Plattenform gepresst wird [33].

Holzfaserplatten, welche in der Regel aus Nadelholznebenprodukten hergestellt werden, haben einen vielseitigen Einsatzbereich. Sie besitzen gute Wärme- und Schalldämmeigenschaften. Durch die hohe Wärmespeicherfähigkeit und Dichte eignen sich Holzfaserdämmplatten besonders für Leichtbaukonstruktionen und zeigen ein günstiges Verhalten hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes.

Tabelle 21: Materialkennwerte von Holzfaserdämmplatte gemäss SIA 279 [33]

Materialkennwert	Produkt	Wert
Rohdichte ρ	Holzfaserdämmplatten	120 - 300 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit λ (Bemessungswert)	Holzfaserdämmplatten	0.080 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	Holzfaserdämmplatten	5 - 10 [-]
Wärmespeicherkapazität Cp	Holzfaserdämmplatten	0.59 Wh/(kgK)

7.3.3.1 IDS Holzfaser

Für die WUFI®-Simulationen kommt ein Holzfaser-Innendämmsystem der Firma Pavatex zum Einsatz. Die kapillaraktive Dämmplatte verfügt über eine mineralische Funktionsschicht, welche den Wasserdampftransport in der Dämmebene abbremst. Feuchtespitzen werden in der Holzfaserplatte gepuffert und durch gerichtete Kapillarkräfte wird ein Grossteil des Kondensats wieder an die Raumluft abgeben. Die Dämmplatte ist mit kapillar leitfähigen Putzen auf Lehm- und Kalkbasis zu kombinieren. Die Materialkenndaten der Holzfaserdämmplatte sowie der Funktionsschicht (s. Tabelle 22 und Tabelle 23) werden vom Projektpartner Pavatex als WUFI®-Materialien zur Verfügung gestellt. In Abbildung 37 ist die Bestandswand mit der Holzfaserdämmung Pavadentro dargestellt. Für die Simulation wird als Innenputz ein Lehmputz und als Kopplungsschicht ein Kalkputz verwendet. Die Dicke der Dämmung wird zwischen 40 und 140 mm variiert.

Beim Anbringen des Pavadentro-Innendämmsystems werden folgenden Bedingungen vom Hersteller angegeben:

- Durch vollflächige Aufbringen einer Kopplungsschicht zwischen dem Bestand und dem Innendämmsystem wird das Entstehen von Lufthohlräumen und somit das Risiko eines Schimmelpilzwachstums in diesem Bereich minimiert.
- Die Kopplungsschicht muss zwingend auf eine trockene Wand (Feuchteprofil 2, s. Abschn. 3.2.6) aufgebracht werden.
- Bei unebenen Oberflächen ist vorher eine Ausgleichsschicht aufzubringen.

Um die Schimmelpilzfreiheit zwischen Bestand und Innendämmung zu gewährleisten, garantiert der Hersteller der Holzfaserdämmung Pavadentro nur bis zu einem oberen Grenzwert der relativen Feuchte von 90 % im Grenzbereich zwischen Innendämmsystem und Bestandswand (vgl. Abschn. 5.4.2).

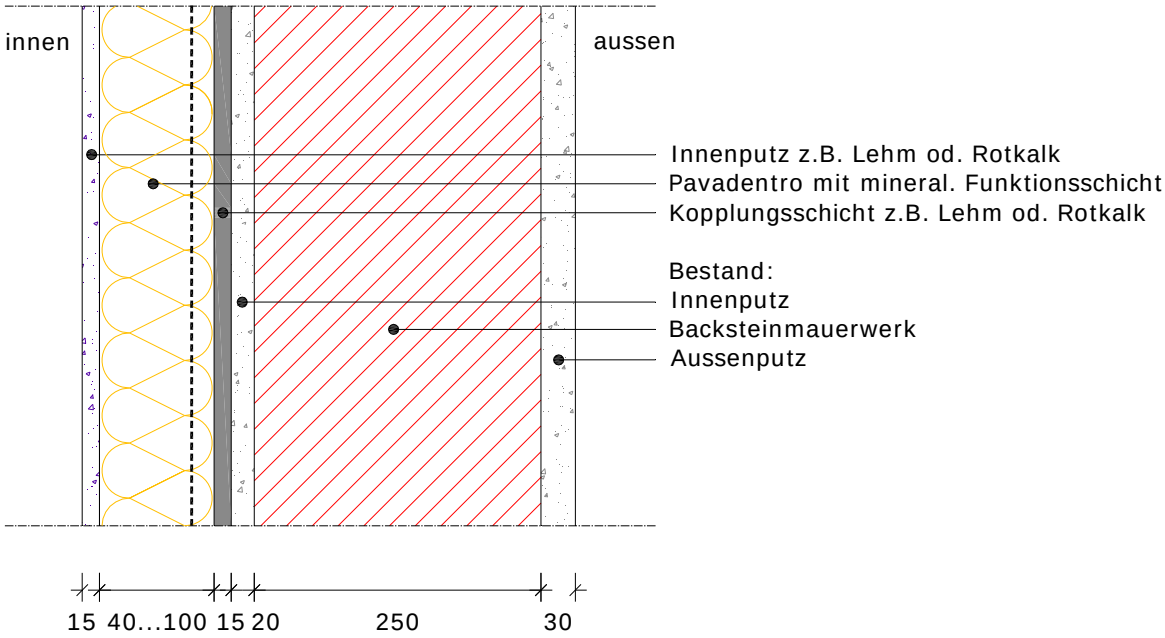


Abbildung 37: Konstruktiver Aufbau des Innendämmsystems Holzfaserplatte am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

Tabelle 22: Materialkennwerte einer Holzfaserdämmplatte der Firma Pavatex gemäss der WUFI®-Datenbank

Materialkennwert	Wert
Rohdichte ρ	175 kg/m^3
Porosität	0.931 m^3/m^3
Wärmespeicherkapazität Cp	1600 J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit λ	0.042 W/(mk)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	5 [-]

Tabelle 23: Materialkennwerte einer Funktionsschicht der Firma Pavatex gemäss der WUFI®-Datenbank

Materialkennwert	Wert
Rohdichte ρ	1500 kg/m^3
Porosität	0.257 m^3/ m^3
Wärmespeicherkapazität Cp	850 J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit λ	0.93W/(mk)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	600 [-]

7.3.4 Schaumglasdämmung

Schaumglas ist ein fester Dämmstoff aus geschäumtem Glas mit einer geschlossen Zellstruktur [33]. Es handelt sich um einen nicht sorptiven Dämmstoff, der druckfest, formstabil, schädlingssicher, fäulnisresistent, alterungsbeständig, chemikalienbeständig und nichtbrennbar ist. Das Dämmmaterial ist praktisch diffusionsdicht.

Tabelle 24: Materialkennwerte von Schaumglas gemäss SIA 279 [33]

Materialkennwert	Produkt	Wert
Rohdichte ρ	Schaumglas (Platte)	100 - 150 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit λ (Bemessungswert)	Schaumglas (Platte)	0.064 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	Schaumglas (Platte)	∞ [-]
Wärmespeicherkapazität Cp	Schaumglas (Platte)	0.23 Wh/(kgK)

7.3.4.1 IDS Schaumglas

Für die Simulationen wird das Material Schaumglas gemäss der WUFI®-Datenbank verwendet (s. Tabelle 25).

Abbildung 38 zeigt einen möglichen Wandaufbau mit einem Schaumglas-Innendämmsystem. In der Simulation werden der dünnschichtige Bitumen-Kaltkleber auf der Kaltseite der Dämmung sowie der Kaltkleber-Voranstrich (Bitumen-Kaltkleber) innen berücksichtigt. Die Dicke der Schaumglasdämmung variiert zwischen 40 und 140 mm.

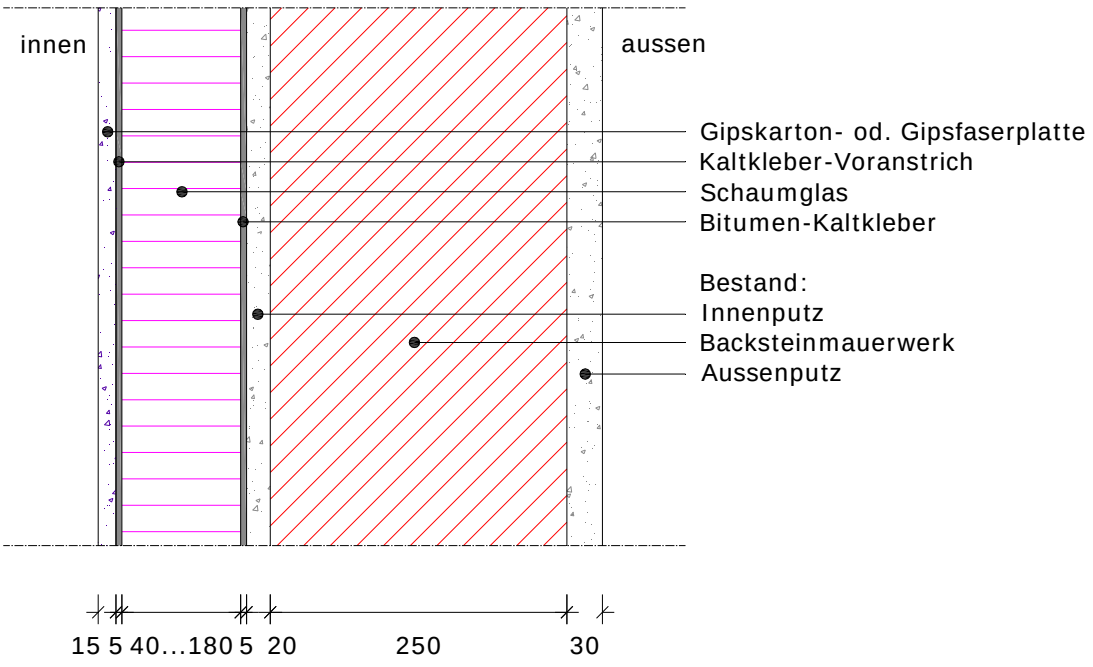


Abbildung 38: Konstruktiver Aufbau des Innendämmsystems Schaumglas am Beispiel des 300 mm starken Mauerwerks

Tabelle 25: Materialkennwerte der Schaumglasdämmplatte gemäss der WUFI®-Datenbank

Materialkennwert	Wert
Rohdichte ρ	120 kg/m^3
Porosität	0.25 m^3/ m^3
Wärmespeicherkapazität Cp	850 J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit λ	0.041 W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstand μ	100 000 [-]

7.4 Berechnete Varianten des Bestands mit Innendämmsystemen

Als Grundaufbauten für die Bestandswand werden zwei Konstruktionen ausgewählt. Diese sind ein 300 mm und ein 560 mm dickes Mauerwerk, jeweils mit dem Backsteintyp HWZ und ZC berechnet. Dies entspricht vier Simulationen, die für zwei Zeitperioden (10 mittlere Jahre und 25 Jahre) durchgeführt werden. Insgesamt werden acht Berechnungen pro Variante des Innendämmsystems durchgelaufen und die Dämmdicken variiert.

Ferner wird ein w-Wert des Aussenputzes *von* 0.5 kg/(m^2 h$^{0.5}$) sowie 0.1 kg/(m^2 h$^{0.5}$) betrachtet. Zusätzlich wird bei einer 120 mm dicken Innendämmung eine Nord-West Orientierung der Aussenwand untersucht. Die anderen Varianten werden mit einer West-Ausrichtung simuliert.

8 ERGEBNISSE DER SIMULATIONEN

Es werden für die ausgewählten Backsteinsorten und Innendämmsysteme Simulationen der Feuchte- und Wärmeströme der energetisch sanierten Aussenwände durchgeführt. Die Innendämmsysteme werden dadurch in Bezug auf ihre Funktionstüchtigkeit untersucht.

Bei den Simulationen werden zwei unterschiedliche Wassergehalte der Bestandswand zu Beginn der Simulation betrachtet (s. Abschn. 3.2.6):

FEUCHTEPROFIL 1: Feuchteprofil für den eingeschwungenen Zustand der Bestandswand mit einem *w*-Wert des Aussenputzes von 2 kg/($m^2h^{0.5}$). Die berechnete Anfangsfeuchte entspricht dem Profil einer nach Westen orientierten Bestandswand nach acht Jahren Bewitterung. Damit soll das Feuchteprofil einer Bestandswand beim Aufbringen des Innendämmsystems simuliert werden.

FEUCHTEPROFIL 2: Anfangsfeuchte der Bestandswand mit 80 % relativer Feuchte konstant über das Bauteil. Dies ist das übliche Anfangsprofil bei der Durchführung von WUFI®-Simulationen.

In den Anhängen A 3 bis A 7 sind die Auswertungsergebnisse für jedes untersuchte Innendämmsystem und die dafür berechneten Varianten zusammengefasst:

- Anhang A 3: Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Steinwolledämmung
- Anhang A 4: Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Glaswolledämmung
- Anhang A 5: Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Zellulosedämmung
- Anhang A 6: Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Holzfaserdämmung
- Anhang A 7: Ergebniskatalog Innendämmsystem mit Schaumglasdämmung

Im Folgenden werden die berechneten Varianten bezüglich der Grenzkriterien aus Kap. 5 zusammenfassend beurteilt.

Der Wasseraufnahmekoeffizient w des Aussenputzes

Die vorliegende Forschungsarbeit zeigte, dass die Ergebnisse stark abhängig vom Wert der kapillaren Regenwasseraufnahme des Aussenputzes sind. Mit Ausnahme der Innendämmsysteme mit Schaumglas erfüllte bei einem *w*-Wert des Aussenputzes von 0.5 kg/($m^2h^{0.5}$) keines der untersuchten Innendämmsysteme die in Kap. 5 definierten Kriterien. Daher wurden die Innendämmsysteme mit Steinwolle-, Glaswolle-, Holzfaser- und Zellulosedämmung zusätzlich mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten *w* des Aussenputzes von 0.1 kg/($m^2h^{0.5}$) simuliert.

8.1 Auswertung der Versagenskriterien

8.1.1 Vergleich West und Nord-West Orientierung

Um die Ausrichtung von Bauteilen zu vergleichen, werden Simulationen mit 120 mm Innendämmung mit einer West und Nord-West Orientierung durchgeführt. Betrachtet man den Gesamtwassergehalt, stellt man fest, dass bei einer Nord-West Ausrichtung der Gesamtwassergehalt geringer ist. Dies ist in Abbildung 39 beispielhaft für den Backstein HWZ mit 560 mm Mauerwerksdicke und einer Holzfaserdämmung mit 120 mm dargestellt. Dies kann man bei allen anderen Innendämmungen auch feststellen. Somit stellt die Auswertung der West-Orientierung den kritischeren Fall dar. Die Versagenskriterien werden daher nur bei den Bauteilen mit einer West-Orientierung beurteilt.

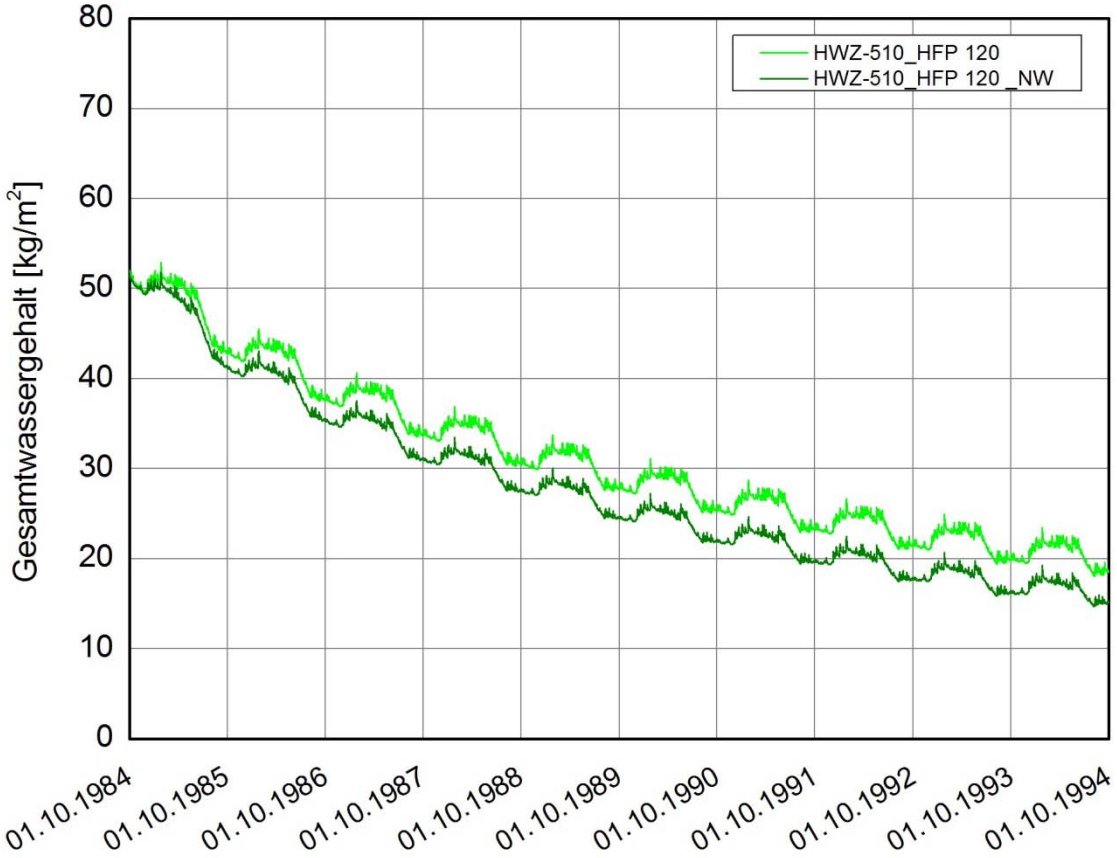


Abbildung 39: Gesamtwassergehalt für Variante Backstein HWZ 510 mm und 120 mm Holzfaserdämmung (Wasseraufnahmekoeffizient vom Aussenputz w = 0.5 kg/(m²h^0.5)); hellgrüne Linie = West Orientierung, dunkelgrüne Linie = Nord-West Orientierung

8.1.2 Frostsicherheit im Bauteil

Wie Abschnitt 6.3 zeigt, treten in der Bestandswand in tieferen Bauteilschichten keine Frost-Tau-Wechsel auf und der Grenzwert des Versagenskriteriums für die Frostsicherheit wird nicht überschritten. Dies ändert sich jedoch bei der Anbringung einer Innendämmung.

In Tabelle 26 werden für eine 300 mm dicke Bestandswand aus dem Backsteintyp HWZ die Wassergehalte bei den auftretenden Forst-Tau-Wechseln der Bestandswand und der Wand mit Innendämmsystem gegenüber gestellt. In den Diagrammen sind die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bei einem bestimmten Wassergehalt und die Grenzwerte des Frost-Versagenskriteriums für die einzelnen Backsteinschichten dargestellt. Tabelle 26 zeigt die Werte für ein IDS mit einer 60 mm dicken Steinwolledämmung. Für die Beurteilung dieser Varianten wird in der Simulation für den Aussenputz ein für historische Putze typischer Wasseraufnahmekoeffizient von w = 2.0 kg/(m²h$^{0.5}$) angesetzt. Es zeigt sich, dass im ersten Zentimeter des Backsteins mehrere hundert Frost-Tau-Wechsel bei kritischen Wassergehalten auftreten und damit ein hohes Risiko einer Frostschädigung der Mauerwerkswand besteht. Für ein IDS mit 140 mm dicker Wärmedämmung ist die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel mit kritischen Wassergehalten noch grösser (s. Tabelle 27). Deshalb muss der Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes reduziert werden, um die Regenwasseraufnahme der Wand und damit die Wassergehalte bei den Frost-Tau-Wechseln zu reduzieren.

Wird der Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes auf w = 0.5 kg/(m²h$^{0.5}$) reduziert, treten selbst bei einer 140 mm dicken Steinwolldämmung keine Frost-Tau-Wechsel bei kritischen Wassergehalten mehr auf. In Tabelle 28 ist die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel als Funktion der auftretenden Wasser-

gehalte für ein Innendämmsystem mit einer 60 mm und 140 mm dicken Steinwolledämmung und 300 mm Wandstärke mit dem Backsteintyp HWZ für die einzelnen Backsteinschichten dargestellt.

Auch bei den anderen untersuchten Innendämmsystemen treten mit dem reduzierten Wasseraufnahmekoeffizienten keine kritischen Frost-Tau-Wechsel mehr auf.

Je kleiner der *w*-Wert des Aussenputzes ist, desto weniger Regenwasser dringt in das Mauerwerk ein, was dazu führt, dass der Wassergehalt des Mauerwerks sinkt.

Da mit einem Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes von $w = 0.5$ kg/($m^2h^{0.5}$) bei keinem IDS Frost-Tau-Wechsel bei kritischen Wassergehalten auftreten, werden bei einem verminderten Wasseraufnahmekoeffizient der Aussenwand keine Frost-Tau-Wechsel bei kritischen Wassergehalten erwartet. Daher wird bei einem Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes von $w = 0.1$ kg/($m^2h^{0.5}$) auf eine Auswertung der Frost-Tau-Kriteriums verzichtet.

Tabelle 26: Auftretender Wassergehalt bei vorhandenen Frost-Tau-Wechseln beim Backsteintyp HWZ mit 300 mm Wanddicke. (1. Spalte: Bauteilschicht, 2.Spalte: Bestandswand, 3. Spalte: mit 60 mm Steinwolledämmung). Randbedingung: Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes w = 2.0 kg/(m²h^0.5)

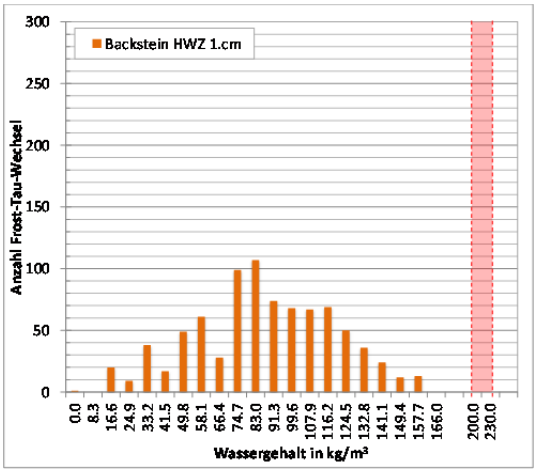
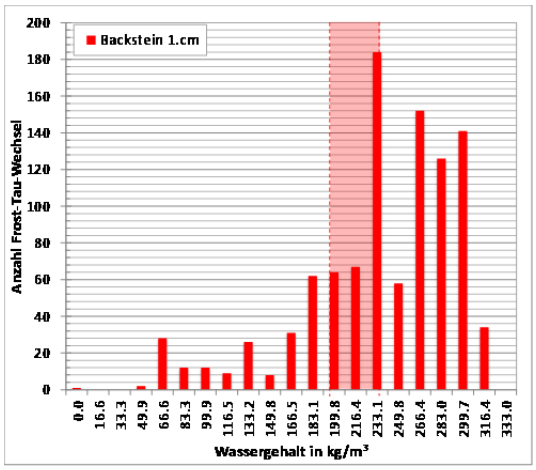
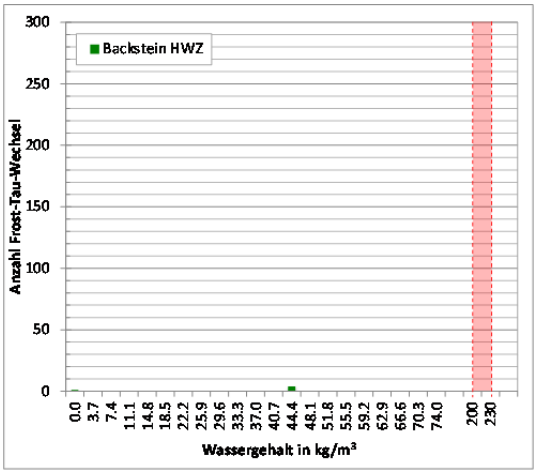
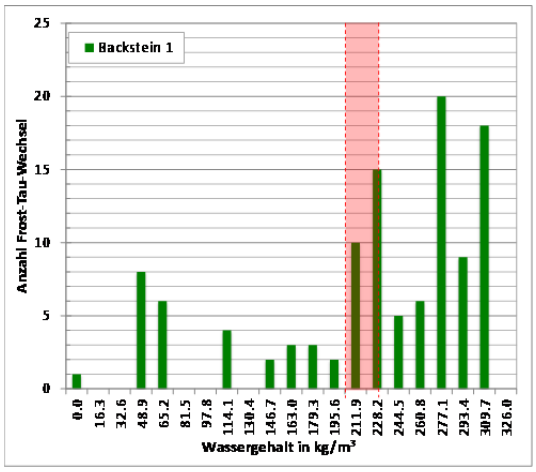
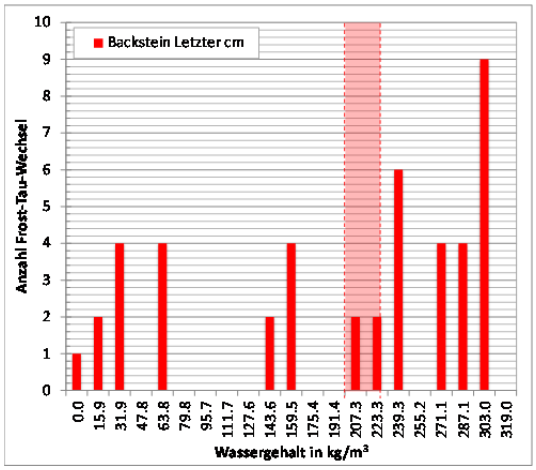
Backstein HWZ 300 mm		
Schicht	**Bestand**	**60 mm Steinwolle**
Backstein 1. cm		
Back-stein 1		
Backstein letzter cm	kein Frost-Tau-Wechsel	

Tabelle 27: Auftretender Wassergehalt bei vorhandenen Frost-Tau-Wechseln beim Backsteintyp HWZ mit 300 mm Wanddicke. (1. Spalte: Bauteilschicht, 2.Spalte: Bestandswand, 3. Spalte: mit 140 mm Steinwolledämmung). Randbedingung: Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes w = 2.0 kg/(m²h^0.5)

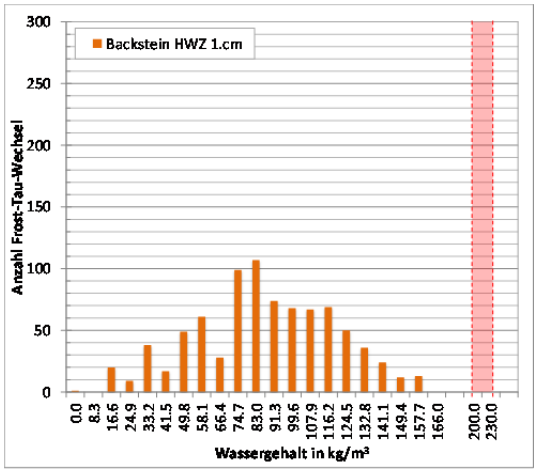
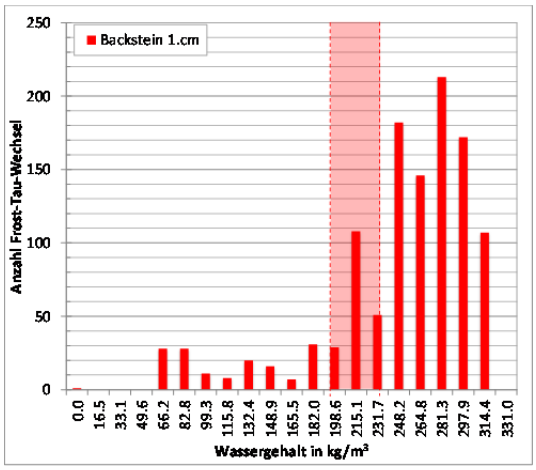
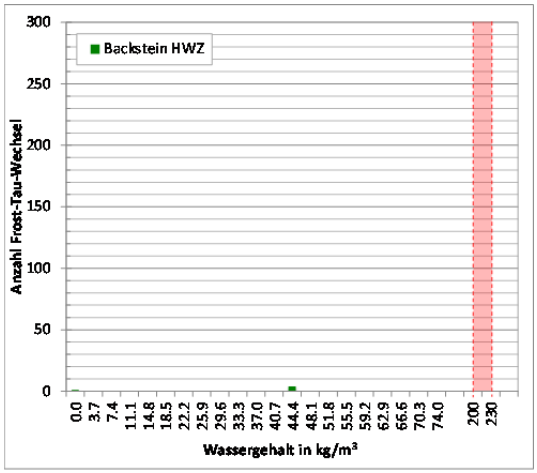
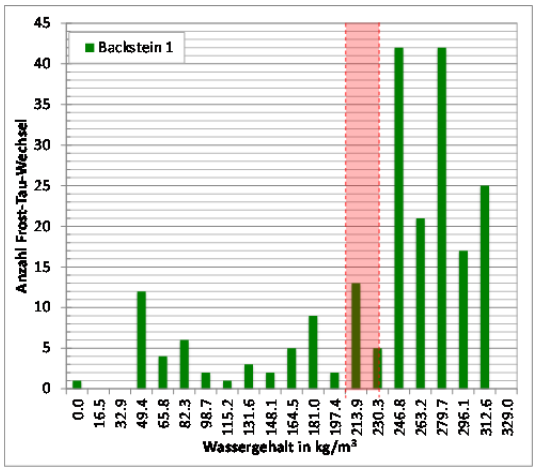
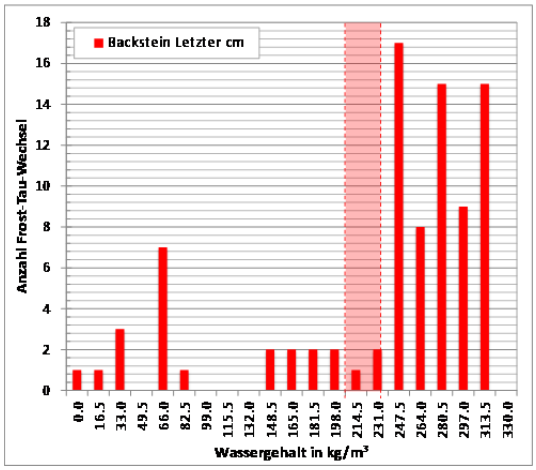
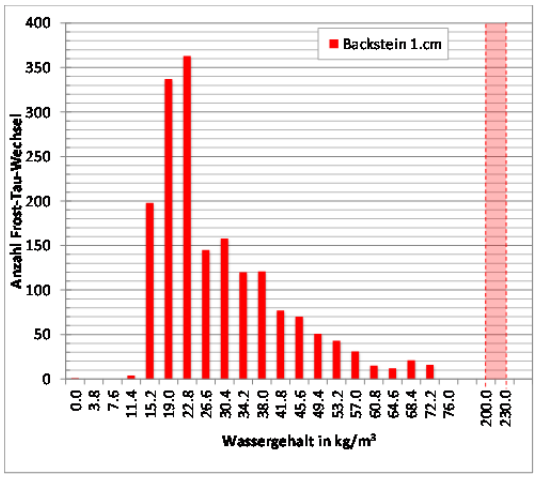
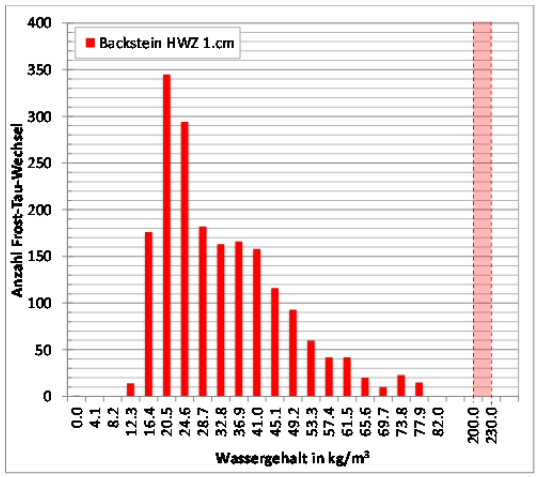
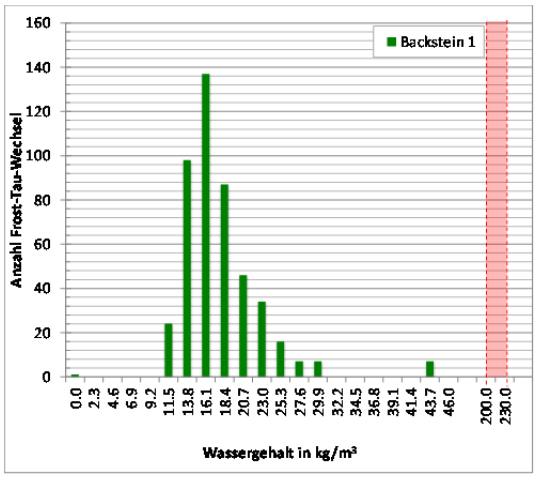
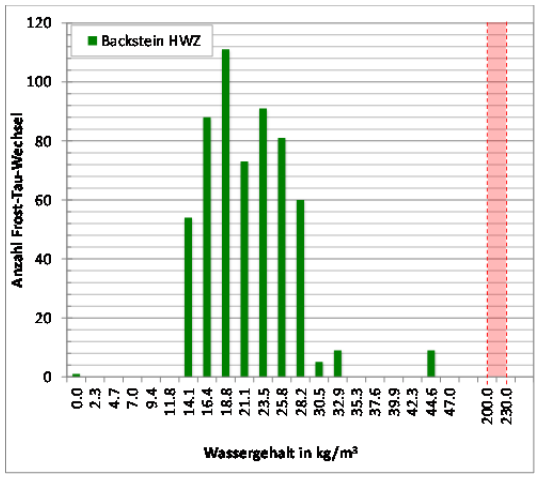
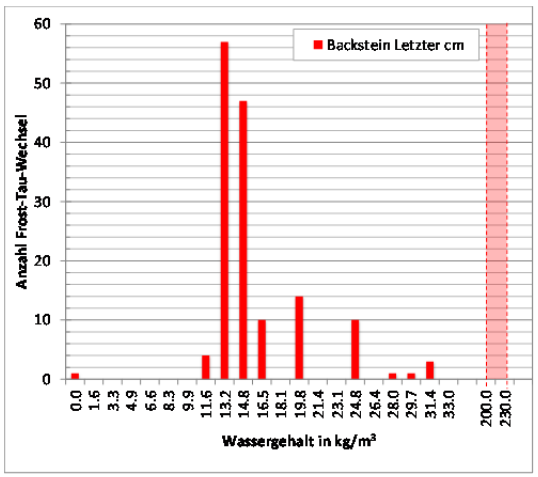
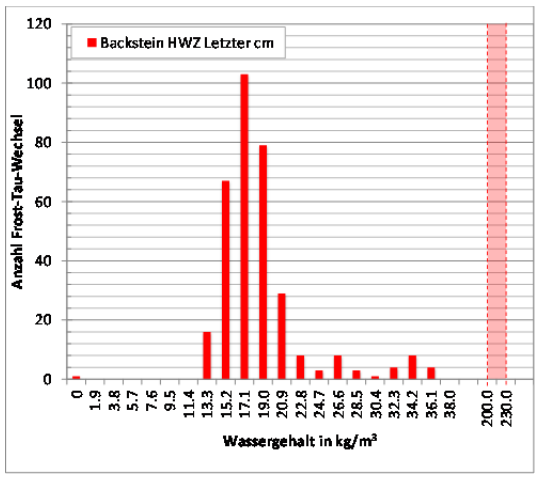
Backstein HWZ 250 mm		
Schicht	**Bestand**	**140 mm ID**
Backstein 1. cm		
Back-stein 1		
Backstein letzter cm	kein Frost-Tau-Wechsel	

Tabelle 28: Auftretender Wassergehalt bei vorhandenen Frost-Tau-Wechseln beim Backsteintyp HWZ mit 300 mm Wanddicke. (1. Spalte: Bauteilschicht, 2.Spalte: mit 60 mm Steinwolledämmung, 3. Spalte: mit 140 mm Steinwolledämmung; hellrot schraffiert = Grenzbereich) Randbedingung: Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes w = 0.5 kg/(m²h$^{0.5}$)

Backstein HWZ 250 mm		
Schicht	**60 mm Steinwolle**	**140 mm Steinwolle**
Backstein 1. cm		
Back-stein 1		
Backstein letzter cm		

8.1.3 Vermeidung von Kondensat und Schimmelpilz an der inneren Oberfläche

Das Anbringen eines raumseitigen Dämmsystems bewirkt in erster Linie die Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstands des Bauteils. Das verursacht die entsprechende Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperatur. Bei allen untersuchten Varianten kann an der Innenoberfläche keine Schimmelpilzbildung bei normaler Feuchtelast im Wohnraum festgestellt werden. Dies ist beispielhaft in Abbildung 40 für den Backsteintyp ZC mit 560 mm Mauerwerksstärke und 40 mm Zellulosedämmung dargestellt. Die LIM B I – Kurve des Isoplethenmodells (s. Abschn. 5.3.2) wird nicht überschritten. Damit ist keine Schimmelpilzaktivität auf der Oberfläche möglich. Das Kriterium wird für alle Varianten anhand der Simulationen überprüft. Niedrige Oberflächentemperaturen treten aber zuerst im Bereich von Wärmebrücken auf. Daher ist die Schimmelpilzfreiheit im Bereich von Wärmebrücken separat zu beurteilen.

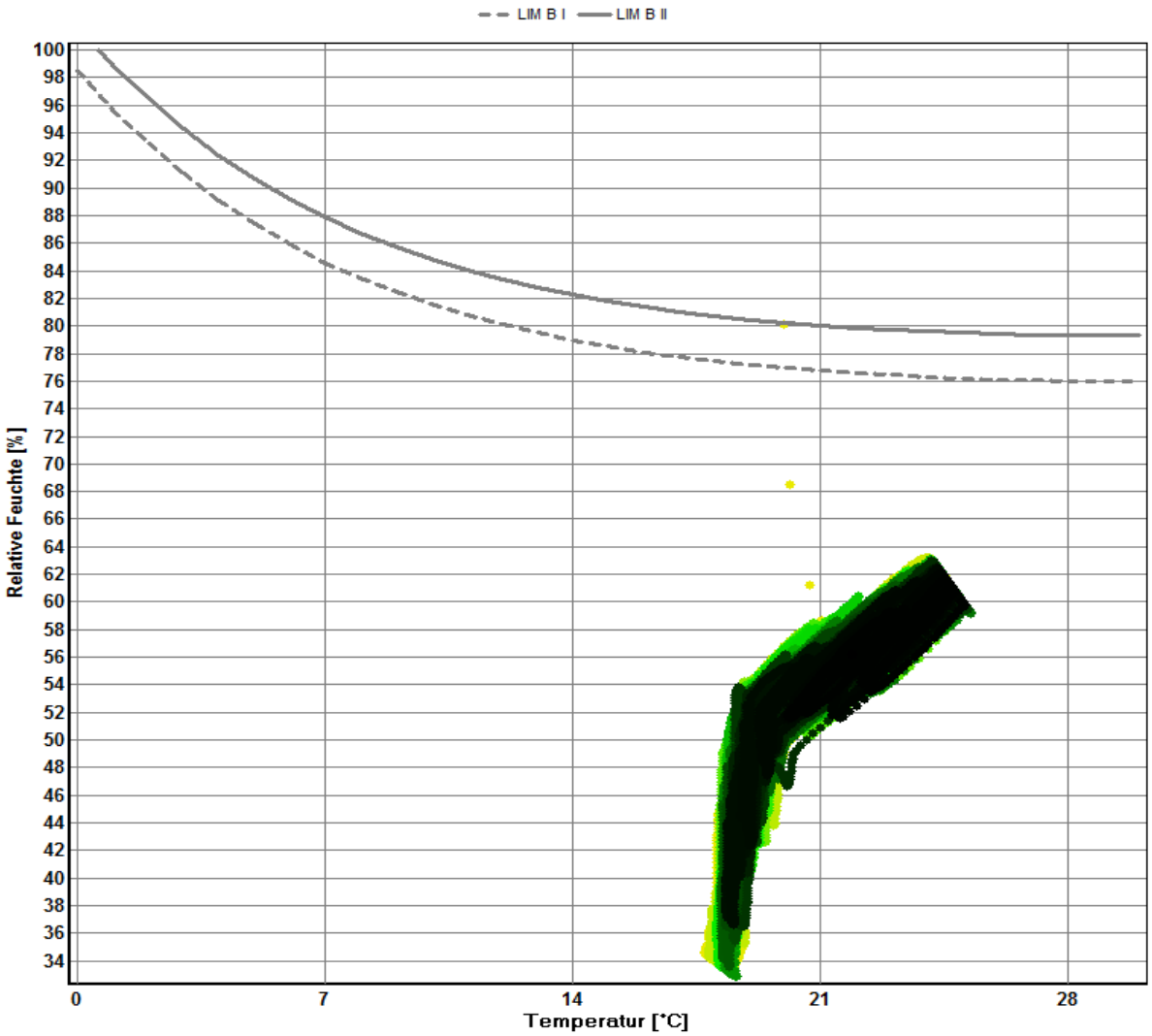


Abbildung 40: Relative Feuchten an der Oberfläche bei den Oberflächentemperaturen der Innenoberfläche im Vergleich mit den LIM-Kurven des Isoplethenmodells für eine 510 mm dicke Mauerwerkswand aus Backstein ZC mit 40 mm Zellulosedämmung

8.1.4 Gesamtwassergehalt im Bauteil

Dieser Abschnitt erläutert die Resultate des Vorkriteriums *Jahresverlauf des Gesamtwassergehalt des Bauteils* (s. Abschn. 5.1). Der Gesamtwassergehalt der Aussenwand soll langfristig nicht ansteigen. Idealerweise soll der Gesamtwassergehalt einer Aussenwand abnehmen und nach einigen wenigen Jahren einen niedrigen eingeschwungenen Zustand erreichen. Das bedeutet, dass das Bauteil im Jahresverlauf immer wieder austrocknet.

<u>Auswirkung des Wasseraufnahmekoeffizienten des Aussenputzes auf den Gesamtwassergehalt der Aussenwand</u>

Es wurde eine 30 cm starke Aussenwand mit einem ausgewählten mittleren Klimajahr für eine nach Westen orientierte Fassade simuliert. Das Mauerwerk ist mit Backstein ZA aufgebaut, da dieser die mittleren Kennwerte zwischen HWZ und ZC Backstein aufweist. Wie in Abbildung 41 zu sehen ist, hat der w-Wert eine grosse Auswirkung auf den Gesamtwassergehalt der Aussenwand.

Verhindert man in der Simulation das Austrocknen der Wand nach innen durch Einfügen einer dampfbremsenden Schicht, so steigt der Gesamtwassergehalt bei einem w-Wert des Aussenputzes von $2{,}0\ \mathrm{kg/(m^2 \cdot h^{0{,}5})}$ stark an. Mit Hilfe des Gesamtwassergehalts kann also festgestellt werden, dass bei einem saugfähigen Aussenputz diffusionsdichte Innendämmsysteme nicht geeignet sind.

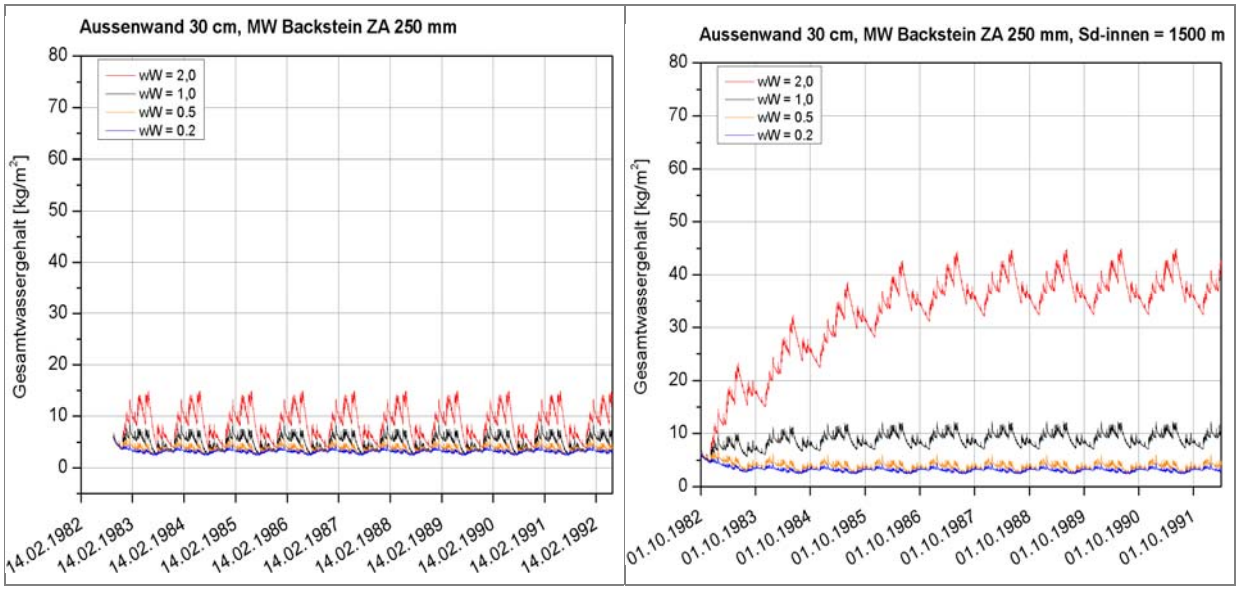


Abbildung 41: Berechneter zeitlicher Verlauf des Gesamtwassergehaltes einer 30 cm dicken Bestandsaussenwand (Backstein ZA) mit verschiedenen Wasseraufnahmekoeffizienten des Aussenputzes. Rechts mit einer raumseitigen Dampfbremse mit einer wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke s_d = 1500 m für ein mittleres Aussenklima

Bei dem Innendämmsystem mit Schaumglaswärmedämmung ist der Gesamtwassergehalt, für die Beurteilung der Tauglichkeit des Innendämmsystems das entscheidende Kriterium. Da Schaumglas keine Feuchtigkeit aufnimmt, entfällt die Auswertung hinsichtlich der relativen Feuchte und des Wassergehalts in der Dämmschicht. Ebenso wird Schaumglas beidseitig, d.h. an der Bestandswand sowie an der raumseitigen Verkleidung, mit einem Bitumen-Kaltkleber luftdicht und hohlraumfrei befestigt. Dadurch wird das Schimmelpilzwachstum durch diese bauliche Massnahme verhindert. Auf diesen Grund entfällt gleichfalls die Auswertung der relativen Feuchte an der Trennschicht zwischen Bestand und Innendämmung.

Der Gesamtwassergehalt wird im Ergebniskatalog Schaumglasdämmung (s. Anhang A 7) mit dem Anfangsfeuchte Profil 1 und für zwei Werte der Wasseraufnahmekoeffizienten des Aussenputzes, w = 0.5 kg/(m^2 h $^{0.5}$) und w = 0.1 kg/(m^2 h $^{0.5}$), ausgewertet. Zusammenfassend ergibt die Auswertung für eine Aussenwand mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten des Aussenputzes w = 0.5 kg/(m^2 h $^{0.5}$) folgende Resultate (s. Abbildung 42):

- Das Backsteinmauerwerk HWZ weist einen höheren Gesamtwassergehalt als das Backsteinmauerwerk ZC auf, nimmt aber im Verlauf der Simulation in allen Varianten ab.
- Das Backsteinmauerwerk ZC weist einen niedrigeren Gesamtwassergehalt auf, der aber in alle Varianten ansteigt. Ausser beim Backstein ZC mit 510mm Dicke und Wärmedämmdicken von 40 und 80 mm nimmt er ab.

Dieses Verhalten weist wieder auf die hohe Dichte des Steins ZC, sowie den geringeren Wert des Flüssigtransportes hin. Das führt zu langsameren Trocknungsvorgängen.

Wird der Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes auf w = 0.1 kg/(m^2 h $^{0.5}$) reduziert, steigt der Gesamtwassergehalt bei keiner Backsteinsorte mit Schaumglas als Innendämmung mehr an.

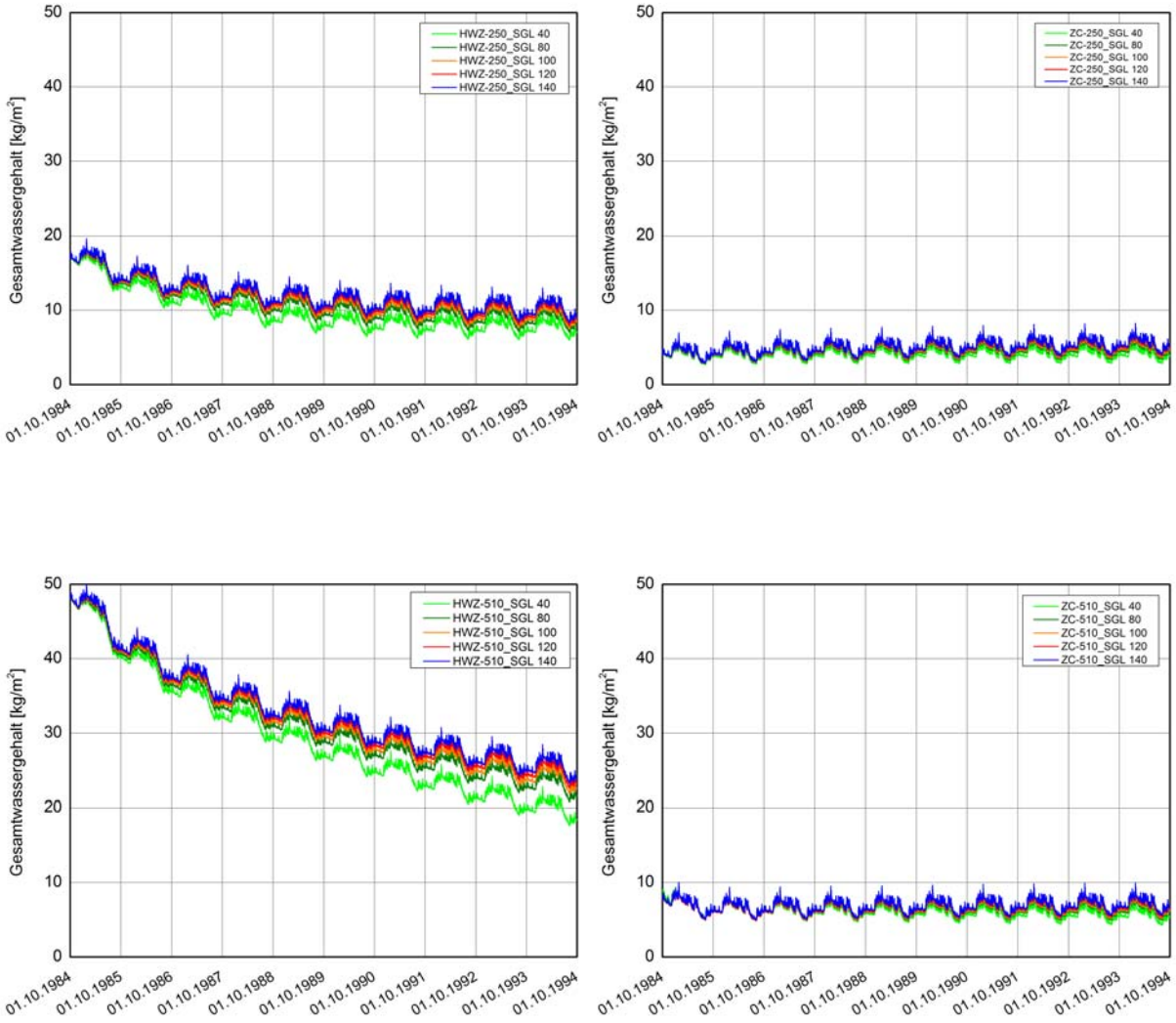


Abbildung 42: Gesamtwassergehalt der vier Varianten Backsteinsorte HWZ und ZC mit 250 und 510 mm mit jeweils IDS Schaumglas von 40 bis 140 mm Dicke (Aussenputz w = 0.5 kg/(m^2 h $^{0.5}$))

8.1.5 Maximal zulässiger Wassergehalt und Vermeidung von Schimmelpilz im Dämmsystem

Dieses Versagenskriterium bestimmt Grenzwerte, damit das neu angebrachte Innendämmsystem während seiner gesamten Lebensdauer schadensfrei bleibt. Dafür sind zwei Bereiche des Innendämmsystems zu untersuchen: Einerseits die relative Feuchte zwischen dem Bestand und dem Innendämmsystem (Trennschicht) und andererseits der Wassergehalt, sowie die relative Feuchte in der Dämmschicht selbst. Die Ergebnisse der Berechnungen für diese beiden Bereiche werden anschliessend erläutert.

8.1.5.1 Relative Feuchte in der Trennschicht zwischen Mauerwerk und Dämmschicht

Wie im Abschnitt 5.4.2 ausgeführt, kann aufgrund des aktuellen Erkenntnisstandes die Schimmelpilzbildung an der Grenzschicht zwischen Bestand und Innendämmsystem nicht abschliessend beurteilt werden.

Ist eine luftdichte und hohlraumfreie Ausführung bei der Anbringung des Innendämmsystems möglich, darf eine relative Feuchte von 95 % nicht überschritten werden. Das Kriterium wird bei allen Innendämmsystemen ausser bei Schaumglas ausgewertet, da dieser Dämmstoff keine Feuchtigkeit aufnimmt. Zudem werden Schaumglasplatten an der Bestandswand durch eine fachgerechte Verklebung mit Bitumen-Kaltkleber hohlraumfrei befestigt.

Das Kriterium der 95 % relativen Feuchte in der Trennschicht war das kritischste und somit das entscheidende Kriterium bei der Beurteilung der Innendämmsysteme mit Zellulose-, Holzfaser-, Steinwolle- und Glaswolledämmung.

Bei einer erhöhten Anfangsfeuchte in der Bestandswand (Feuchteprofil 1) und einem Wasseraufnahmekoeffizient von w = 0.5 kg/(m^2 h $^{0.5}$) bzw. w = 0.1 kg/(m^2 h $^{0.5}$) wird das Kriterium von fast allen Varianten erfüllt. Eine Ausnahme stellen folgende Varianten dar:

- Backstein HWZ mit 560 mm Mauerwerksdicke: Bei dieser Variante überschreitet jedes Innendämmsystem die Grenze von 95 % relativer Feuchte mehr als 3 Jahre.
- Holzfaserdämmung: Beim IDS Holzfaserdämmung können Dämmdicken bis 100 mm verwendet werden. Eine Ausnahme stellt ebenfalls der Backstein HWZ mit 560 mm Mauerwerksdicke dar. Hier können max. 40 mm Holzfaserdämmung angebracht werden.

Die Berechnungen wurden daher mit einem weiteren Feuchteprofil mit geringeren Feuchtegehalten zu Beginn der Simulationen durchgeführt (Feuchteprofil 2). Diesem Feuchteprofil liegt ein Wassergehalt entsprechend der Ausgleichfeuchte bei 80 % relativer Feuchte zur Grunde. Für die Simulationen mit dem Feuchteprofil 2 wurde nur eine Variante pro Innendämmsystem untersucht. Folgende Varianten sind mit dem Feuchteprofil 2 und einem w-Wert des Aussenputzes von w = 0.1 kg/(m^2 h $^{0.5}$) untersucht worden:

- IDS Glaswolledämmung bis 140 mm Dicke und feuchtevariabler Dampfbremse (Vario Xtra-Safe)
- IDS Steinwolledämmung bis 140 mm Dicke und feuchtevariabler Dampfbremse (Intello)
- IDS Zellulose bis 140 mm Dicke und feuchtevariabler Dampfbremse (Intello)
- IDS Holzfaserdämmung (Pavadentro) bis 140 mm Dicke

Alle Simulationen dieser vier Innendämmsysteme auf Mauerwerken der Backsteinsorten HWZ und ZC mit den Mauerwerksdicken von 300 mm und 560 mm ergeben relative Feuchten unter 95 %.

Die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchung sind in im Ergebniskatalog im Anhang detailliert dargestellt.

8.1.5.2 Maximal zulässiger Wassergehalt und relative Feuchte in der Dämmschicht

Der Wassergehalt und die relative Feuchte in der Dämmschicht werden nur bei den Innendämmsystemen mit Zellulose- und Holzfaserdämmung ausgewertet. Der Wassergehalt bei Dämmstoffen mit Holz- oder Zelluloseanteilen wird also mit folgenden Grenzwerten beurteilt:

- Der Wassergehalt in der Dämmschicht bei Holzfaser- und Zellulosedämmung darf einen Grenzwert von 20 M.-% nicht überschreiten. Zudem darf die relative Feuchte in der Dämmschicht nicht über 95 % liegen.
- Bei Verwendung einer OSB-Platte als innere Beplankung darf der Wassergehalt in der OSB-Platte einen Grenzwert von 16 M.-% nicht überschreiten.

Die Ergebnisse der rechnerischen Untersuchung sind in den Ergebniskatalogen zu den Zellulose- und Holzfaserdämmstoffen im Anhang detailliert dargestellt. Zusammenfassend kann man folgende Aussage zu Holzfaser- und Zellulosedämmung beim Feuchteprofil 1 treffen:

- **IDS Holzfaserdämmung:** Bei allen Varianten bleibt der Wassergehalt in der Dämmschicht vor und nach der Funktionsschicht unter dem Grenzwert von 20 M.-%. Ausser beim Backstein HWZ mit 510 mm mit 140 mm Holzfaserdämmung überschreitet die Dämmschicht vor der Funktionsschicht den Grenzwert um 2 M.-% im zweiten Winterhalbjahr (unabhängig vom Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes). Das Kriterium zur relativen Feuchte in der Dämmschicht wird ebenfalls von allen Varianten erfüllt.
- **IDS Zellulosedämmung:** Bei der Variante Zellulose mit OSB mit 40 mm Innendämmung erfüllen alle Varianten das Kriterium zum Wassergehalt und der relativen Feuchte in der Dämmschicht, ausgenommen der Backstein HWZ mit 510 mm Dicke (unabhängig vom Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes). Bei 140 mm Innendämmung wird das Grenzkriterium bei allen Varianten überschritten. Bei der Variante mit der feuchtevariablen Dampfbremse kann eine geringe Verbesserung bei manchen Varianten festgestellt werden.

Die Berechnungen mit dem Feuchteprofil 2 ergeben positive Resultate für die Varianten Holzfaserdämmung 40 bis 140 mm Dicke sowie Zellulosedämmung mit feuchtevariabler Dampfbremse mit Dicken von 40 bis 140 mm.

8.1.6 Wärmeschutz

Die Anforderung des Wärmeschutzes im Winter nach SIA 180:1999 fordert einen max. Wärmedurchgangskoeffizienten von $U \leq 0.40$ W/(m^2K). Die SIA 380/1:2009 verlangt für den Einzelbauteilnachweis bei Umbauten einen max. Wärmedurchgangskoeffizienten von $U \leq 0.25$ W/(m^2K). In Abbildung 43 bis Abbildung 48 sind die Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung für die verschiedenen IDS mit unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken dargestellt. Um einen U-Wert von 0.40 W/m^2K zu erreichen, ist bei den meisten IDS eine Dicke von 80 mm notwendig. Für einen U-Wert von 0.25 W/(m^2K) sind mind. 120 Innendämmung notwendig.

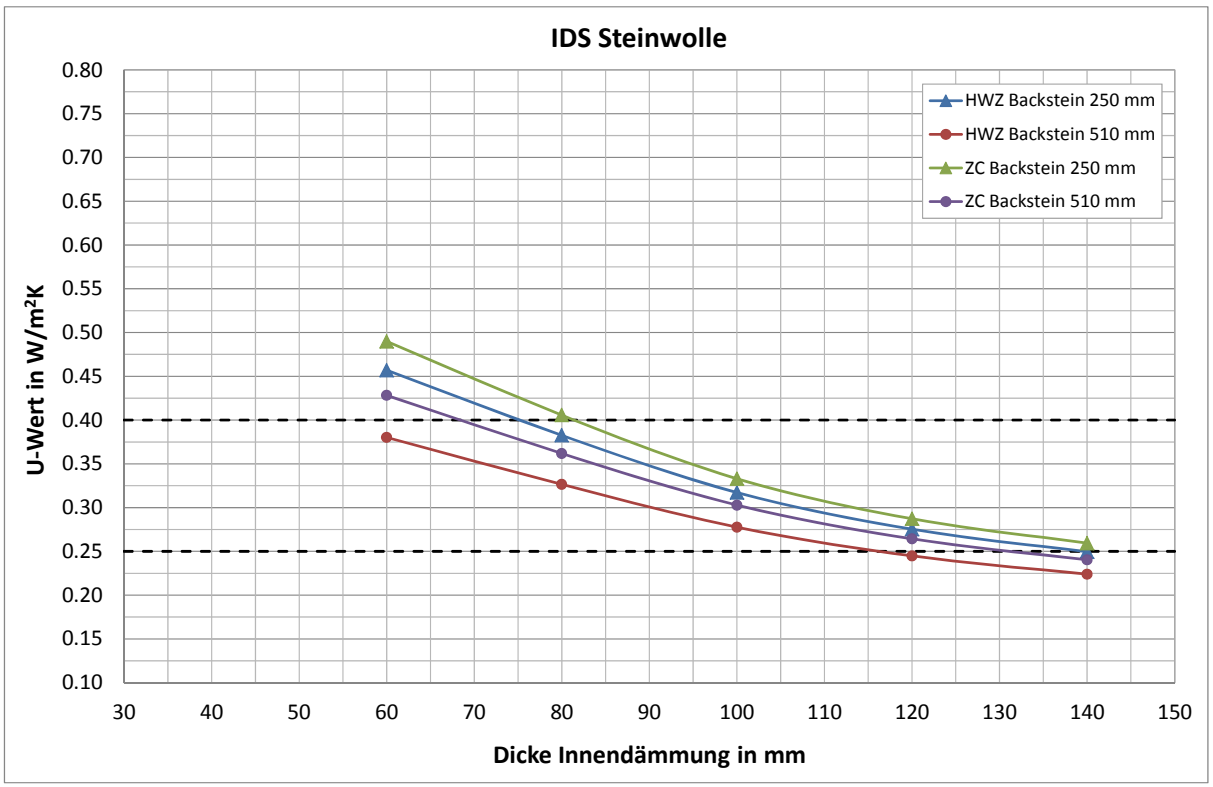


Abbildung 43: Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, der sanierten Aussenwand in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung in mm für das IDS Steinwolle mit unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken

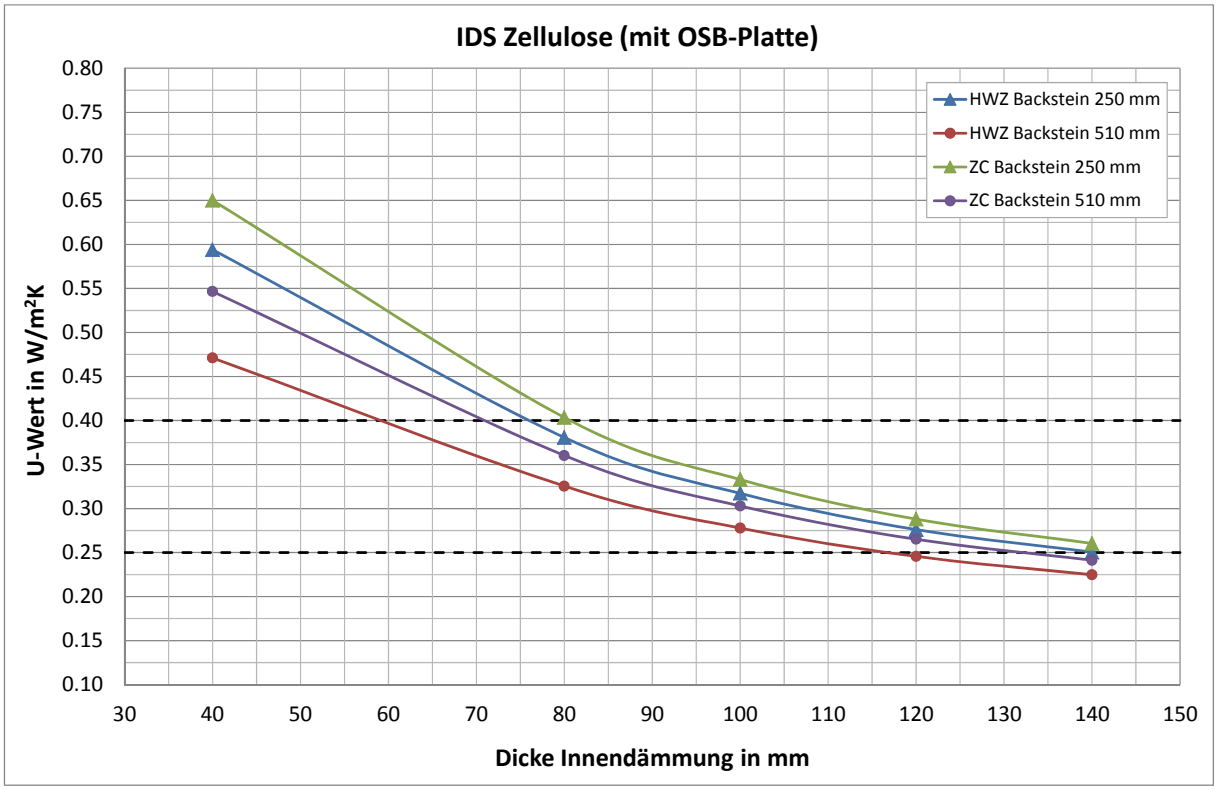


Abbildung 44: Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, der sanierten Aussenwand in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung in mm für das IDS Zellulose mit OSB-Platte und unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken

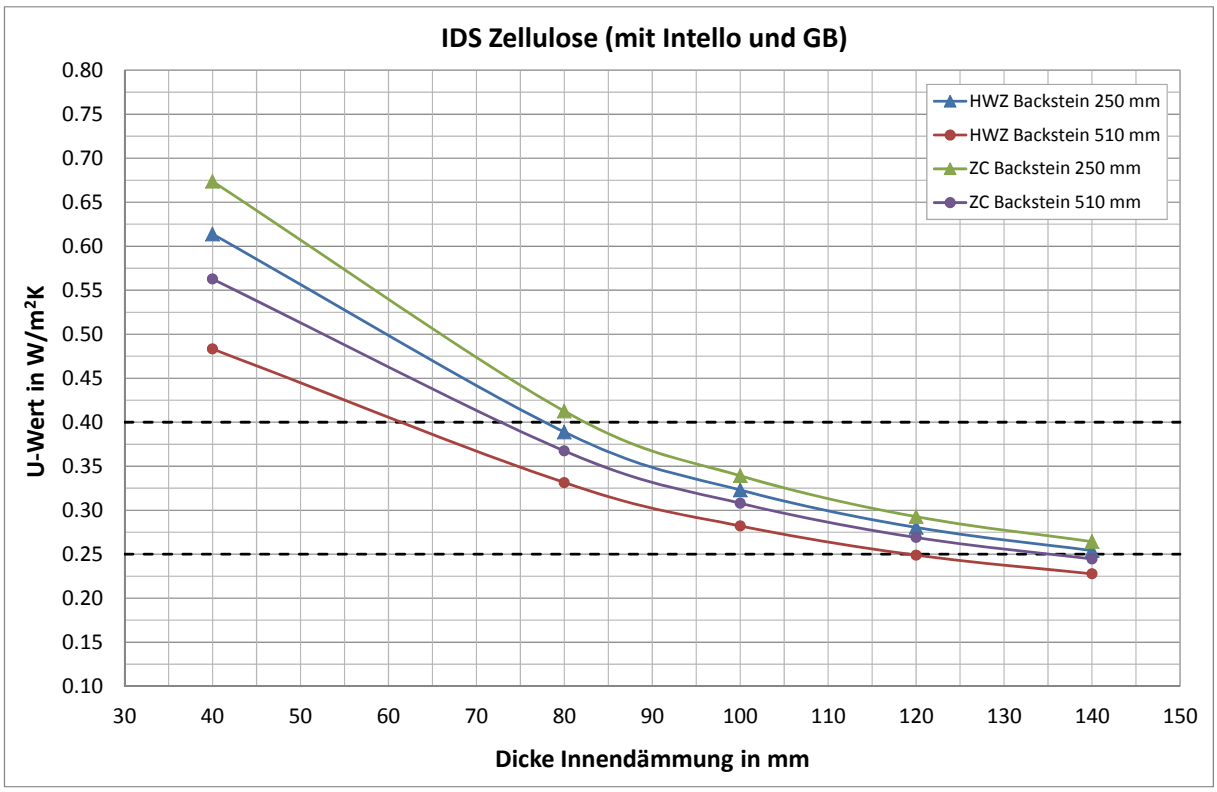


Abbildung 45: Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, der sanierten Aussenwand in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung in mm für das IDS Zellulose mit feuchtevariabler Dampfbremse und unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken

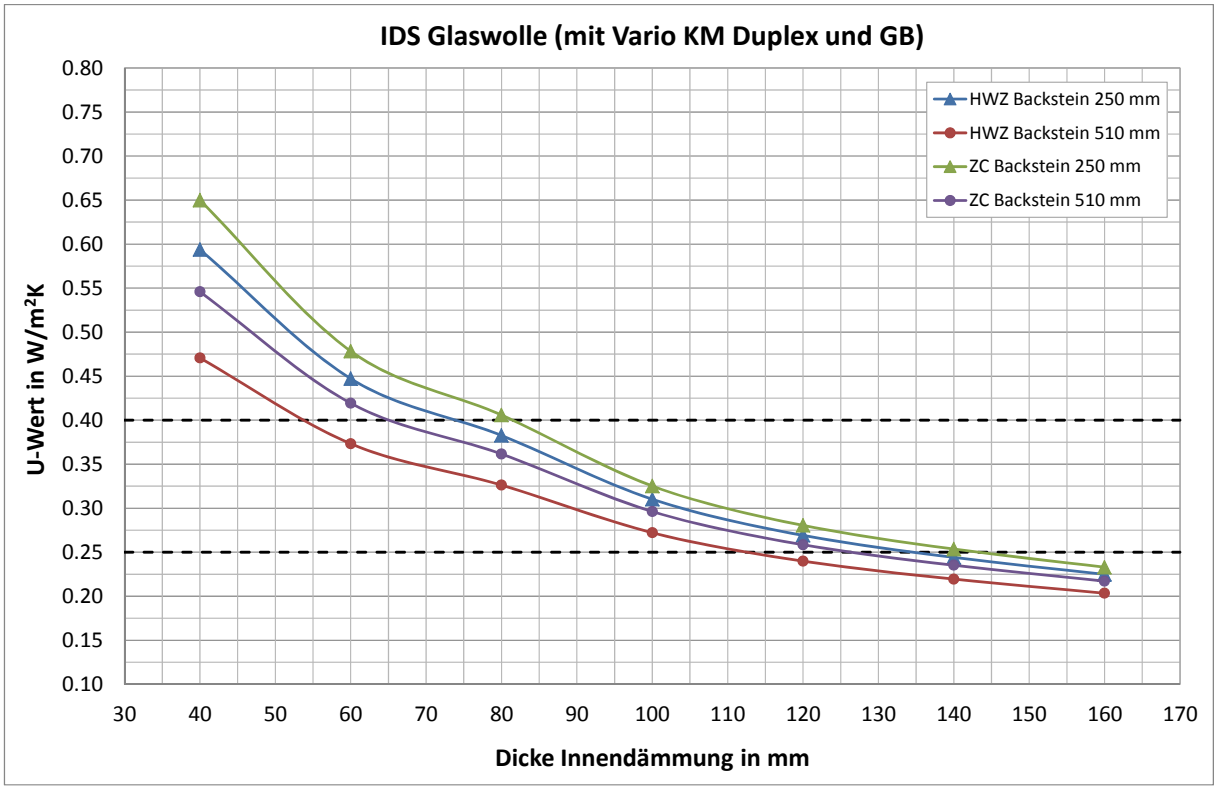


Abbildung 46: Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, der sanieren Aussenwand in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung in mm für das IDS Glaswolle mit feuchtevariabler Dampfbremse und unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken

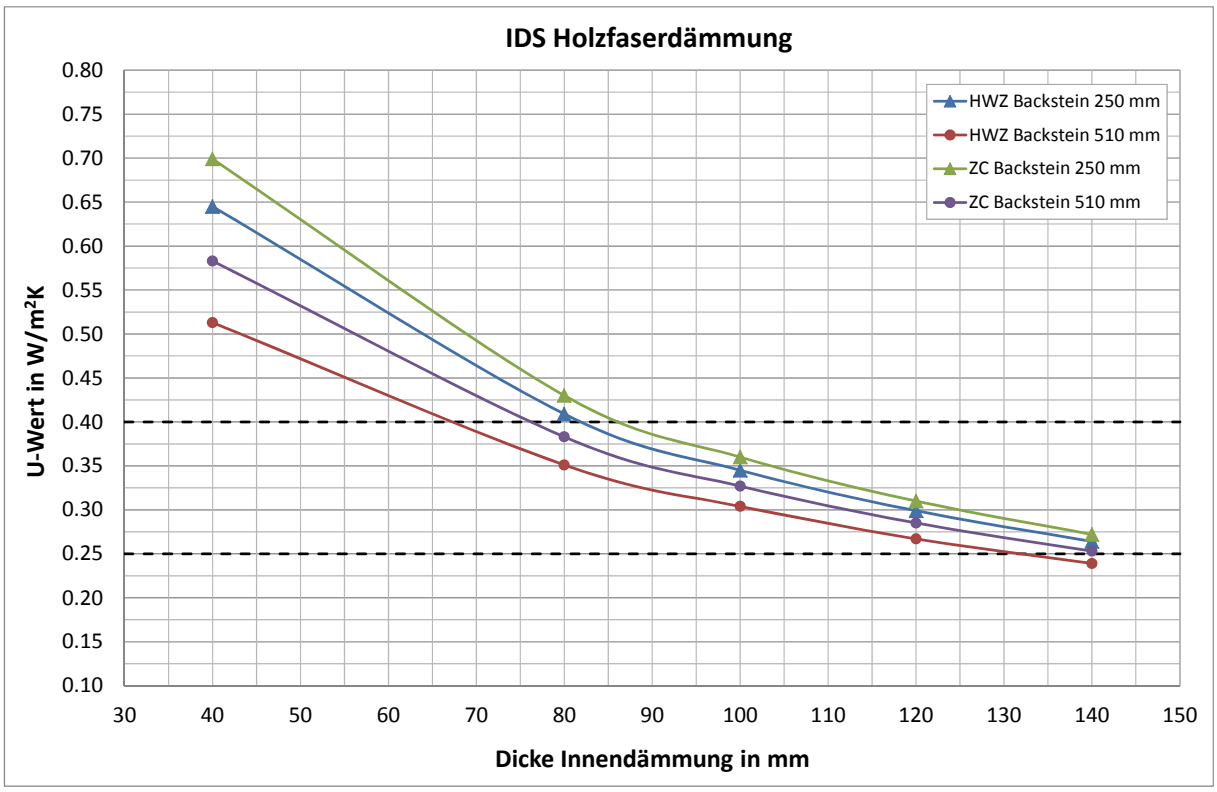


Abbildung 47: Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, der sanierten Aussenwand in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung in mm für das IDS Holzfaserdämmung mit unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken

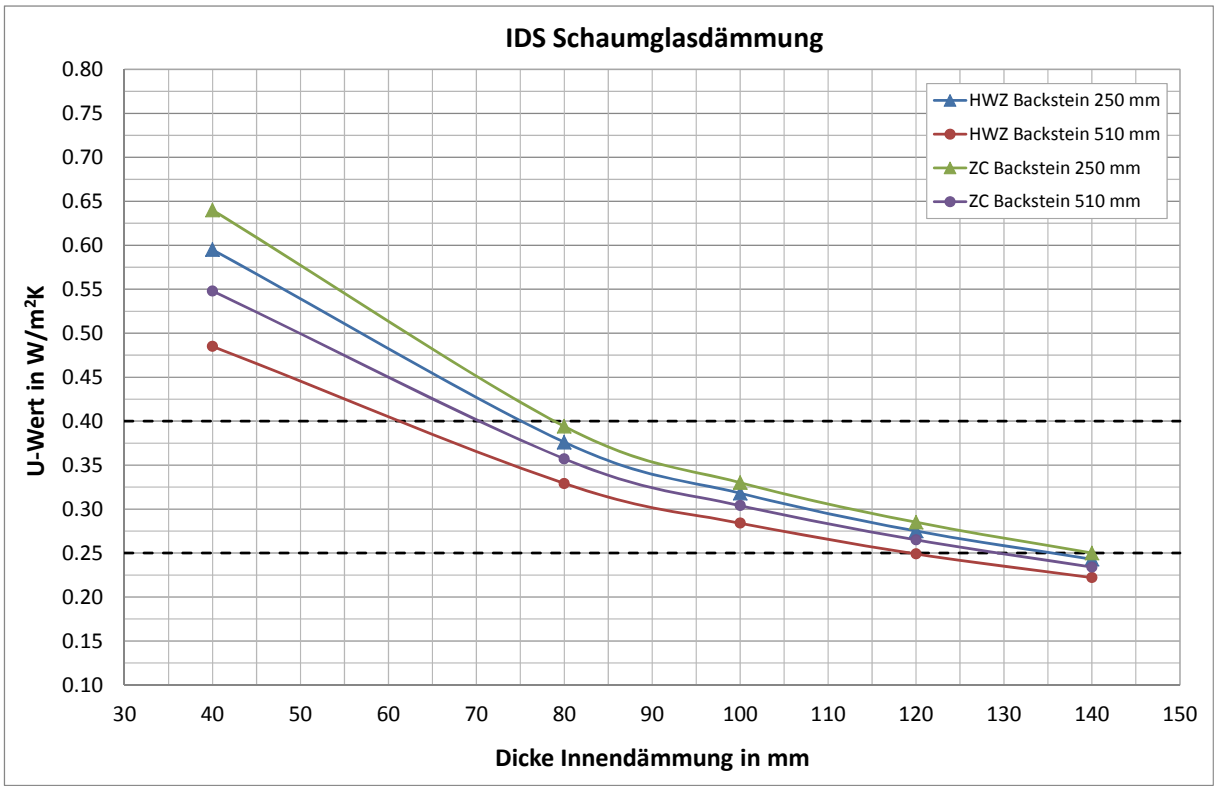


Abbildung 48: Wärmedurchgangskoeffizient, U-Wert, der sanierten Aussenwand in Abhängigkeit der Dicke der Innendämmung in mm für das IDS Schaumglasdämmung mit unterschiedlichen Backsteintypen und Mauerwerksdicken

8.2 Allgemeine Planungshinweise

Die folgenden Hinweise ergänzen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen, welche nur die Funktionsfähigkeit des Wärme- und Feuchteschutzes des Regelquerschnitts berücksichtigen können. Für ein funktionsfähiges Innendämmsystem ist aber die Beachtung sowohl der Simulationsergebnisse als auch der Planungshinweise zwingend erforderlich.

8.2.1 Bestandsaufnahme

Wie bei allen Sanierungen, kommt der Bestandsaufnahme eine besondere Bedeutung zu. Im Rahmen dieser müssen die baulichen Randbedingungen für den Einbau des Innenwärmedämmsystems geklärt werden.

8.2.1.1 Zustand der Aussenwände

Besonders wichtig sind der Aufbau und der Zustand der Aussenwände, an deren Innenseite das Innenwärmedämmsystem eingebaut werden soll. Es sind folgende Punkte zu klären:

- Aufbau der bestehenden Aussenwand (Dicke des Mauerwerks, Dicke von Putzschichten)
- Art des Backsteins, wenn möglich Bestimmung der Rohdichte, der Wärmeleitfähigkeit und der Porosität des Backsteins

Darüber hinaus muss der Feuchtegehalt des Backsteinmauerwerks bestimmt werden, da eine Wand mit einem hohen Wassergehalt in die innen aufgebrachte Wärmedämmung trocknet und diese über mehrere Jahre durchfeuchtet. Dies kann bei faserförmigen Wärmedämmungen zu einem stark erhöhten Risiko eines Schimmelbefalls der Wärmedämmung führen. Daher dürfen Innenwärmdämmsysteme nicht an Aussenwänden angebracht werden, deren Feuchtegehalt 80 % übersteigt.

8.2.1.2 Zustand des Aussenputzes

Entscheidend für die Funktionsfähigkeit eines Innenwärmedämmsystems ist die Schlagregenbelastung der Aussenwand. Neben einem eventuell vorhandenen konstruktiven Regenschutz, wie z. B. Dachüberständen, wird der Wetterschutz einer Mauerwerkswand durch den Aussenputz gewährleistet.

Geht man von einer mittleren Schlagregenbeanspruchung der Aussenwand aus, so muss die Wasseraufnahme des Putzes reduziert werden, da sonst zu viel Wasser in die Wärmedämmung des Innendämmsystems gelangt. Die Simulationen haben gezeigt, dass der Wasseraufnahmekoeffizient von historischen Putzen mit einem Wert von w = 2 bis 5 kg/(m²h$^{0.5}$) für eine Wand mit Innenwärmedämmsystem zu dauerhaft zu hohen Wassergehalten in der Wärmedämmung führt.

Daher muss der Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes auf einen Wert von $_{W =}$ 0.1 kg/(m²h$^{0.5}$) reduziert werden, um die Wasseraufnahme der Aussenwand zu begrenzen. Hierfür ist in der Regel der Ersatz des Aussenputzes durch einen Aussenputz mit einer reduzierten Wasseraufnahme erforderlich.

Der historische Aussenputz kann nur dann beibehalten werden, wenn durch konstruktive Massnahmen der Schlagregenschutz der Aussenwand z. B. durch Dachüberstände, Bekleidungen sichergestellt wird, dass keine Schlagregenbeaufschlagung der Aussenwand erfolgt. Ist dies nicht möglich, so ist von dem Aufbringen eines Innenwärmedämmsystems abzuraten.

Wird der historische Putz beibehalten, so ist dieser auf Risse, Putzabplatzungen und andere Fehlstellen hin zu untersuchen, da über diese grosse Wassermengen in das Mauerwerk gelangen können. Diese Putzfehlstellen sind zu sanieren.

8.2.1.3 Holzbalkenköpfe in der Aussenwand

Durch das Anbringen eines Inndämmsystems reduzieren sich die Temperaturen an den Holzbalkenköpfen in der Aussenwand. Es besteht auch das Risiko, dass die Feuchtegehalte der Holzbalkenköpfe nach dem Aufbringen eines Innendämmsystems ansteigen. Diese Thematik wurde im Rahmen des Arbeitspakets 5 nicht untersucht.
Wie stark dieser Anstieg der Wassergehalte der Holzbalkenköpfe ausfällt, ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge konnte dieser Aspekt im laufenden Forschungsprojekt nicht abschliessend untersucht werden. Solange sich aus den laufenden Forschungsarbeiten keine allgemeinen Auslegungsregeln für Innendämmungssysteme ableiten lassen, kann das Risiko der Schädigung der Balkenköpfe durch das Anbringen eines Innendämmsystems nicht zuverlässig eingeschätzt werden. Es wird daher empfohlen,

- den Zustand der Balkenköpfe und insbesondere den Feuchtegehalt der Balkenköpfe vor der Sanierung im Rahmen der Bestandsaufnahme zu erfassen und zu dokumentieren
- und bauliche Massnahmen, wie z. B. Inspektionsöffnungen oder Feuchtemesssonden in den Balkenköpfen zu installieren, um ein Anwachsen der Feuchtegehalte rechtzeitig zu erkennen und somit rechtzeitig Gegenmassnahmen einleiten zu können.

8.2.2 Innere Bauteilschichten

Materialien auf der Innenseite von Mauerwerkswänden sind in der Regel nur für typische Raumluftfeuchten und Raumlufttemperaturen geeignet. Durch das Aufbringen eines Innendämmsystems werden diese nach der Sanierung wesentlich höheren Feuchten und tieferen Temperaturen ausgesetzt. Daher sind feuchte- und frostempfindliche Baustoffe an der Innenseite der bestehenden Aussenwand, wie z.B. Holzverkleidungen oder Gipsputze zu entfernen.

8.2.3 Unterkonstruktion des Innendämmsystems

Der innere Abschluss eines Innendämmsystems ist in der Regel als plattenförmige Verkleidung oder Putzschicht ausgebildet. Falls die Wärmedämmung und die innere Verkleidung nicht durch eine Verklebung befestigt werden, ist eine Unterkonstruktion erforderlich.

Diese Unterkonstruktion durchdringt die Wärmedämmebene des Innendämmsystems und besteht in der Regel aus Baustoffen, die eine wesentlich grössere Wärmeleitfähigkeit aufweisen, als die Wärmedämmung. Hierdurch entsteht eine materialbedingte Wärmebrücke. Diese Wärmebrücke verursacht erhöhte Energieverluste und verringert örtlich die raumseitigen Oberflächentemperaturen. Die Unterkonstruktion ist daher so auszubilden, dass ihre Wärmebrückenwirkung minimiert wird.

Holzunterkonstruktionen wurden in der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten berücksichtigt. Bei Metallunterkonstruktionen ist der zusätzliche Wärmeverlust über die Unterkonstruktion durch eine Wärmebrückenberechnung zu bestimmen und durch einen Wärmebrückenzuschlag ΔU bei der Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten der sanierten Aussenwand zu berücksichtigen. Ferner ist darauf zu achten, dass eine thermische Trennung, z. B. durch den Einbau einer Wärmedämmschicht zwischen dem Ständerwerk und der Aussenwand, eingebaut wird.

8.2.4 Luftdichtheitsebene

Bei Innendämmsystemen, deren Konstruktionselemente nicht hohlraumfrei miteinander verklebt werden, wird in der Regel auf der Raumseite eine Dampfbremse mit Folien hergestellt. Durch Fehlstellen in dieser Folienschicht können durch das Einströmen feuchtwarmer Raumluft grosse Wassermengen in das Innendämmsystem transportiert werden und Bauschäden, wie Schimmelpilzbildung in der Wärmedämmung oder die Schädigung von Holzbauteilen durch Mikroorganismen, verursachen.

Um einen Wassertransport durch das Eindringen feuchtwarmer Raumluft in das Innendämmsystem zu verhindern, muss diese Folienschicht als luftdichte Ebene ausgebildet werden. Daher müssen die Folienstösse luftdicht verklebt werden. Die Folie muss ausserdem an allen Durchdringungen und Rändern luftdicht angeschlossen werden.

8.2.5 Feuchtevariable Dampfbremsen in Feuchträumen

Feuchtevariable Dampfbremsen verringern ihren Wasserdampfdiffusionswiderstand, wenn sie einer hohen Luftfeuchtigkeit ausgesetzt werden. Daher dürfen feuchtevariable Dampfbremsen nicht in Räumen eingesetzt werden, in denen aufgrund der Nutzung mit höheren Raumluftfeuchten als bei einer Wohnungsnutzung gerechnet werden muss, da es sonst zu einem erhöhten Feuchteeintrag in das Innendämmsystem kommt.

8.2.6 Wärmebrücken an Bauteilanschlüssen

Durch den Einbau eines Innendämmsystems entstehen zwangsläufig Wärmebrücken an allen in die Aussenwand einbindenden Bauteilen wie Geschossdecken oder Innenwände. Dies gilt auch für die Fensterlaibungen. Diese Wärmebrücken müssen durch den Einbau von geeigneten Wärmebrückendämmungen reduziert werden. Durch die zusätzliche Wärmebrückendämmung wird der zusätzliche Energieverlust über diese Wärmebrücken begrenzt und die raumseitigen Oberflächentemperaturen im Wärmebrückenbereich soweit angehoben, dass die Tauwasserfreiheit und damit die Mindestwärmeschutz sichergestellt wird. Für typische Innendämmsystem wurde ein Wärmebrückenkatalog erarbeitet (s. Kap. 11).

8.2.7 Einfluss des Innendämmsystem auf den Schallschutz

Je nach Innendämmsystem kann sowohl die Schalldämmung der Aussenwand, als auch die Flankenschallübertragung der Aussenwand vergrössert und somit der Schallschutz von einbindenden Geschossdecken oder Innenwänden reduziert werden. Besonders kritisch sind vollflächig verklebte steife Wärmedämmstoffplatten, wenn diese verputzt oder mit verklebten Platten verkleidet werden. Es ist daher zu empfehlen, in Gebäuden mit Schallschutzanforderungen die schalltechnische Eignung des Innendämmsystem von einem Akustiker überprüfen zu lassen.

9 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Historische Backsteine weisen sehr unterschiedliche wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften auf. In der Folge ergeben die Simulationen für die unterschiedlichen Backsteinsorten eine grosse Schwankungsbreite, sowohl für den Gesamtwassergehalt des Mauerwerks, als auch für den Wassergehalt der einzelnen Schichten des Mauerwerks.

Für eine genaue Prognose der Funktionstüchtigkeit eines Innendämmsystems ist daher die Kenntnis der Eigenschaften der Bestandskonstruktion unentbehrlich. Besonders wichtig sind der Aufbau und der Zustand der Aussenwände, an deren Innenseite das Innenwärmedämmsystem eingebaut werden soll. Es sind folgende Punkte zu klären:

- Aufbau der bestehenden Aussenwand (Dicke des Mauerwerks, Dicke von Putzschichten)
- Art des Backsteins, wenn möglich Bestimmung der Rohdichte, der Wärmeleitfähigkeit und der Porosität des Backsteins
- Feuchtegehalt der Bestandswand

Eine Innendämmung behindert das Austrocknen des Mauerwerks nach innen. In Abhängigkeit von der Backsteinsorte der Bestandwand kann dies unter Umständen zu einer Feuchteakkumulation, d.h. zu einem langfristigen Anstieg des Gesamtwassergehalts im Bauteil, führen. Daher muss die Wasseraufnahme des Putzes reduziert werden, da sonst zu viel Wasser in die Wärmedämmung des Innendämmsystems gelangt. Hierfür ist in der Regel der Ersatz des historischen Aussenputzes durch einen Aussenputz mit einer reduzierten Wasseraufnahme erforderlich. Falls dies nicht möglich ist, ist die Treibwasserbelastung der Aussenwand durch andere technische Massnahmen zu reduzieren.

Das Versagenskriterium *Maximal zulässiger Wassergehalt und Vermeidung von Schimmelpilz im Dämmsystem* stellt das kritischste und somit entscheidende Kriterium bei der Beurteilung der Innendämmsysteme mit Zellulose, Holzfaser, Steinwolle und Glaswolle dar. Bei einer erhöhten Anfangsfeuchte der Bestandswand, entsprechend einem Feuchtezustand nach acht Jahren Bewitterung mit West-Orientierung, treten zu hohe Feuchtegehalte im Innendämmsystem auf. Der Grund hierfür ist die Austrocknung der Bestandswand in die Innendämmung während der ersten Jahre nach dem Aufbringen des Innendämmsystems. Die feuchteschutztechnische Funktionsfähigkeit von Innendämmsystemen mit Faserdämmstoffen kann erst nachgewiesen werden, wenn der Wassergehalt der Bestandswand auf 80 % relativer Feuchte begrenzt wird. Dies zeigt die grosse Bedeutung der Anfangsfeuchte der Bestandswand für die feuchtetechnische Funktionsfähigkeit der mit Faserdämmstoffen sanierten Aussenwände. In diesen Fällen muss vor Aufbringen eines Innendämmsystems der vorhandene Feuchtegehalt der Bestandswand messtechnisch festgestellt werden. Bei Feuchtegehalten von mehr als 80 % wird von einem Innendämmsystem mit Faserdämmstoffen ohne Austrocknung der Wand abgeraten.

Es hat sich auch gezeigt, dass bei einem geringen Wasseraufnahmekoeffizient des Aussenputzes und niedrigeren Anfangsfeuchten im Bestandsmauerwerk die Diffusionsprozesse der Raumluftfeuchte entscheidender werden. Daher muss auch der Wasserdampftransport vom Raum in das Innendämmsystem begrenzt werden.

10 AUSBLICK

Im Zuge eines Forschungsprojektes können nicht alle notwendigen Untersuchungen vollständig abgedeckt werden, weshalb hier auf weiteren Forschungsbedarf in verschiedenen Bereichen hingewiesen wird.

Bei der konstruktiven Analyse des Bestandes hat sich gezeigt, dass nicht ausreichende Informationen zur Wasseraufnahmefähigkeit von Aussenputzen vorhanden sind. Hier besteht Bedarf unterschiedliche Prüfmethoden näher zu analysieren und historische Konstruktionen genauer zu betrachten. Ferner haben die Ergebnisse gezeigt, dass bei der Anbringung von Innendämmsystemen die Wasseraufnahmefähigkeit des Aussenputzes reduziert werden sollte. Der Ersatz von historischen Putzen wird jedoch von der Denkmalpflege kritisch betrachtet. Aber auch bei Anstrichen und Hydrophobierungen, die die Wasseraufnahme des Aussenputzes reduzieren sollten, traten in den letzten Jahren einige Probleme auf. In diesem Bereich besteht daher auch weiterer Forschungsbedarf.

Die Simulationen beschränkten sich auf einschalige Backsteinmauerwerke. Hier könnten weitere Simulationen mit anderen Mauerwerkssteinen, wie z. B. Natur- oder Sandsteinen, sowie andere Konstruktionen, wie z. B. zweischalige Mauerwerke, durchgeführt werden.

Bei der Beurteilung der verschiedenen Innendämmsysteme hat sich gezeigt, dass hinsichtlich des Frost-Tau-Wechsels von Mörtelfugen und Innenputzen noch keine umfangreichen Analysen durchgeführt wurden. Ferner gestaltet sich auch die Beurteilung des Schimmelpilzwachstums an der Trennschicht zwischen Bestand und Innendämmung als schwierig. Für diese Beurteilung stehen derzeit noch nicht die notwendigen Werkzeuge zur Verfügung. Hier besteht ein Forschungsbedarf, um zu klären, ob die Schimmelpilzmodelle, welche für die Oberflächen entwickelt wurden, auch im Bauteilinneren angewandt werden können.

Wichtig ist auch die Validierung der numerischen Simulationen mit Messungen. Durch Monitoring-Systeme könnten hier Vergleiche mit den Simulationsergebnissen aufgestellt werden.

11 WÄRMEBRÜCKENKATALOG

Ein Nachteil von Innendämmsystemen sind die konstruktionsbedingten Wärmebrücken. Wärmebrücken entstehen zwangsläufig an den in die Aussenwände einbindenden Innenwänden und Geschossdecken, ebenso an Fensterlaibungen.

Es müssen mit Hilfe von Wärmebrückenberechnungen zwei Aspekte des Wärmeschutzes der Wärmebrücken untersucht werden:

- Zur Beurteilung des Mindestwärmeschutzes wird die minimale Oberflächentemperaturen bzw. der f_{Rsi}-Wert im Wärmebrückenbereich bestimmt.
- Zur Beurteilung des energiesparenden Wärmeschutzes wird der zusätzliche Energieverlust über die Wärmebrücke in Form des ψ-Wertes berechnet

Diese Berechnungen wurden für typische Wärmebrücken der Innendämmsysteme durchgeführt. Die Ergebnisse für die zusätzlichen Wärmeverluste der linienförmigen Wärmebrücken an den Bauteilanschlüssen und die minimalen, raumseitigen Oberflächentemperaturen in Form der Ψ-Werte bzw. der f_{Rsi}-Werte sind im Wärmebrückenkatalog detailliert beschrieben, der als Anhang A 2 beigefügt ist.

12 LITERATURVERZEICHNIS

[1] M. Kost, „Schweizerische Energie-Stiftung," 2006. [Online]. Available: http://www.energiestiftung.ch/energiethemen/energieeffizienz/gebaeude/. [Zugriff am 11 02 2013].

[2] Institut für Denkmalpflege und Bauforschung IDB ETH Zürich, «WP1 Documentation of reference buildings Constructions of massive built residential buildings during the period 1850 to 1920,» 2011.

[3] Empa Building Science and Technology Lab, „WP3 Climate Load Assessment," EMPA, Zürich, 2010.

[4] A. Holm, K. Sedlbauer und H. Künzel, „Moderne Rechenverfahren für die Diagnostik," in *Hanseatische Sanierungstage*, Kühlungsborn, 2000.

[5] H. M. Künzel, «Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten,» Stuttgart, 1994.

[6] prEN 15026, *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation,* 2004.

[7] S. Schmitz, „Innendämmung im Gebäudebestand, Projektarbeit," Berner Fachhochschule, 2011.

[8] D. Zirkelbach, T. Schmidt, H. Künzel und M. Kehrer, „WUFI® Pro Kurzeinführung," [Online]. Available: http://www.hoki.ibp.fhg.de/download/WUFI-Pro-5_Kurzeinfuehrung.pdf. [Zugriff am 11 02 2013].

[9] R. Imesch, „Energetische Modernisierung historisch wertvoller Gebäude, Teil 2 Wärmebrückenkatalog," Berner Fachhochschule, 2010.

[10] Fraunhofer-IBP, ZUB Kassel und Institut für Bauklimatik TU Dresden, „MASEA - Geprüfte Datenbank - Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung," [Online]. Available: http://www.masea-ensan.de. [Zugriff am 11 02 2012].

[11] H.-M. Fischer, H. Freymuth, P. Häupl, M. Homann, R. Jenisch, E. Richter und M. Stohrer, Lehrbuch der Bauphysik - Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008.

[12] H. M. Künzel, „Frostschäden an Putz und Mauerwerk – Ursachen und Vermeidung," 2004.

[13] H. Künzel, Aussenputz, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003.

[14] M. Krus, „Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken," Dissertation, 1995.

[15] H. Künzel und B. Schwarz, „Feuchtigkeitsaufnahme und -Abgabe von Baustoffen und Bauteilen," Ernst & Sohn, Berlin, 1972.

[16] DIN 4108-3, *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung,* Berlin: Beuth, 2012.

[17] D. Everett, „The thermodynamics of frost damage to porous solids.," *Trans. Faraday Soc. 57,* pp. S.1541-1551, 1961.

[18] G. Rosenthal, „Über das Gefrierverhalten von Wasser in Ziegeln.," *Ber. Dtsch. Keram. Ges. 39,* pp. Nr. 5. S. 304-309, 1962.

[19] H. Bentrup, „Untersuchungen zur Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer," Shaker, Aachen, 1992.

[20] H. Lehmann und W. Ohnemüller, „Die Frostprüfung mit Hilfe physikalischer Messgrössen," *TIZ-Zbl 84, Nr.19,* pp. 457-471, 1960.

[21] J. Hirschwald, „Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit," 1908.

[22] A. Winkler, Die Putzarbeiten, Stuttgart: Julius Hoffmann, 1947.

[23] SIA 180, *Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau,* Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, 1999.

[24] K. Sedlbauer, „Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen - Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele.," Dissertation Universität Stuttgart, 2001.

[25] H. Viitanen, „Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures," *Journal of Building Physics,* pp. 33:201-224, January 2010.

[26] A. Binder und D. Zirkelbach, „Untersuchungen zum kapillaren Rückleitungsvermögen der Zellulosefaserdämmung "Isofloc L"," IBP-Kurzbericht HTB-04/2011, Holzkirchen, 2011.

[27] T. Schmidt, Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, [Online]. Available: http://www.wufi.de/. [Zugriff am 11 02 2013].

[28] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, *WTA Merkblatt 6-4-09 Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden,* München: Fraunhofer IRB Verlag, 2009.

[29] P. Feddeck, „Neue Wege in die Innendämmung," *BINE Informationsdienst, Herausgeber: FIZ Karlsruhe,* pp. 1-4, 2000.

[30] H. M. Künzel und A. Kaufmann, IBP-Mitteilung 268: Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmung, Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik, 1995.

[31] H. M. Künzel, A. Binder und D. Zirkelbach, „Bemessung von Innendämmungen," in *Innendämmung im Bestand*, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2010, pp. 18-40.

[32] K. Schild, M. Weyers und W. M. Willems, Handbuch Fassadendämmsysteme, Grundlagen - Produkte - Details, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010.

[33] SIA 279, *Wärmedämmstoffe,* Zürich: Schweizer Ingenieur und Architektenverein, 2004.

A 1 ANHANG

A 1.1 Materialkenndaten für die Simulation

Material	Rohdichte ρ in kg/m^3	Wärmekapazität cp in J/kg K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK	Diffusionswiderstand μ [-]	Sorption u (80) in kg/m^3	Freie Wassersättigung u(f) in kg/m^3	Wasseraufnahmekoeffizient Aw in kg/m^{2}h$^{0.5}$	Offene Porosität Φ in Vol.-%
Kalkzementputz	1900	850	0.80	19.0	45.0	210	2.0	24
Kalkzementmörtel	1910	850	0.80	45.89	24.65	200	5.1	25
Kalkputz	1600	850	0.70	7.00	30.0	250	2.82	30
Backstein HWZ	1560	850	0.60	14.93	11.8	369	0.58	38
Backstein ZC	1985	836	0.908	23.0	3.10	188	10.8	28.5
Steinwolle	30	850	0.036	1.1	-	-	-	95
Glaswolle	20	840	0.035	1.3	-	-	-	99
Zellulose	50	2150	0.037	1.5	-	-	-	95
Holzfaser	175	1600	0.042	5	-	-	-	93.1
Schaumglas	120	850	0.041	100 000	-	-	-	25
OSB	615	1500	0.13	175	-	-	-	90
Lehmputz	1514	1000	0.59	11	-	-	-	42
Gipskartonplatte	850	850	0.2	8.3	-	-	-	65
Bitumentumenkaltkleber	1100	1500	0.17	40 000	-	-	-	-
Vario KM Duplex bzw. Xtra-Safe	83	1800	1.0	-	-	-	-	-
Intello	115	2500	2.4	-	-	-	-	-

A 2 ANHANG WÄRMEBRÜCKENKATALOG

A 3 ANHANG ERGEBNISKATALOG INNENDÄMMSYSTEM MIT STEINWOLLE-DÄMMUNG

A 4 ANHANG ERGEBNISKATALOG INNENDÄMMSYSTEM MIT GLASWOLLE-DÄMMUNG

A 5 ANHANG ERGEBNISKATALOG INNENDÄMMSYSTEM MIT ZELLULOSE-DÄMMUNG

A 6 ANHANG ERGEBNISKATALOG INNENDÄMMSYSTEM MIT HOLZFA-SERDÄMMUNG

A 7 ANHANG ERGEBNISKATALOG INNENDÄMMSYSTEM MIT SCHAUMGLAS-DÄMMUNG

A 8 PLANUNGSHINWEISE