



Innenliegende Wärmedämmung

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Sanierung

*Díguele Jiménez, Elisa
Dipl. Ing. FH Innenarchitektin
Berner Fachhochschule
Forschung und Entwicklung
Bereich Bauphysik
Biel, Schweiz*

Autoren:

Forschungsgruppe unter der Leitung von Prof. Dr. Christoph Geyer:
Barbara Wehle
Anna Schusser
Josef Pichler
Elisa Díguele Jiménez

Innenliegende Wärmedämmung

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Sanierung

Einleitung

Der aktuelle Primärenergieverbrauch des schweizerischen Gebäudeparks liegt bei knapp 50 % des gesamten Energieverbrauchs, 30 % davon wird zum Heizen verwendet.

Die energetische Sanierung von historischen erhaltenswerten Wohnbauten ist wegen der heutigen Problematik des Klimawandels ein Muss. Die hohen Ziele zur Senkung des CO₂-Ausstosses, sowie die notwendige Energieeinsparung für die nachhaltige Entwicklung der Schweiz, laufen auf die Notwendigkeit hinaus Altbauten energetisch zu optimieren.

Altbauten von 1850 bis 1920 umfassen nur 20 % der beheizten Räume. Wenn die restlichen 80 % der bestehenden beheizten Räume nach den Energievorschriften der Schweiz saniert würden, würden diese 20 % Altbauten rund 60 % des gesamten Heizenergiebedarfs verursachen. Um die Frage nach möglichen Sanierungsmassnahmen zu beantworten, wurde das Forschungsprojekt SuRHib (*Sustainable Renovation of Historical Buildings*) von dem CCEM (*Competence Center Energy and Mobility*) initiiert und wird gefördert von Bundesamt für Energie (BFE). Das Projekt ist in sieben Arbeitspakete (Work package, WP) unterteilt. Die in diesem Artikel vorgestellten Untersuchungen beziehen sich auf WP 5 „Internal insulation and adapted insulation systems“. Als Grundlagen dienen die in WP1 (ETHZürich, 2011) durchgeführten Bestandsuntersuchungen erhaltenswerter Wohnbauten sowie die in WP3 durchgeführte Analyse verschiedener Klimastandorte der Schweiz.

Viele Wohnbauten aus diesem Zeitraum haben erhaltenswerte Fassaden deren Struktur geschützt ist. Bei diesen Bauten sind Aussendämmmassnahmen oft nicht wirtschaftlich machbar bzw. aus Denkmalschutzgründen nicht erlaubt. Eine Möglichkeit um solche Bauten energetisch zu verbessern und das Einsparpotential zu nutzen, ist das Anbringen von einer Dämmung auf der Innenseite der Aussenwände. Diese Massnahme hat einige Auswirkungen auf die bestehende Konstruktion, die bauphysikalisch besonderes zu beachten sind. Diese für herkömmliche Dämmsysteme zu untersuchen und sichere Lösungen zu finden, ist Aufgabe von AP 5 des SuRHib Projektes. Mittels hygrothermischer Bauteilsimulation wurden Berechnungen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports durchgeführt. Hinsichtlich des Feuchteschutzes ist zu beachten, dass Oberflächenkondensation, Wärmebrücken sowie ein langfristiges Ansteigen des Gesamtwassergehaltes des Bauteils verhindert werden müssen.

Eine Herausforderung des Projekts war, aus der Bestandsanalyse eine repräsentative Auswahl an Konstruktionsaufbauten zu treffen, Randbedingungen und Einflussparameter auf realistische Weise in der Simulation abzubilden und diese bauphysikalisch zu beurteilen.

Ziel ist die Entwicklung schadensfrei funktionierender Innendämm Lösungen. Im Fokus der Untersuchungen steht die Klärung der Risiken durch Feuchtebelastung von Mauerwerk und Wärmebrücken unter Berücksichtigung der Konstruktion und Exposition der Fassade.

Ausgangslage

Das Forschungsprojekt konzentriert sich auf den Erhalt historischer Massivbauten der Schweiz aus der Zeit von 1850 bis 1920, die ursprünglich als Wohngebäude erstellt wurden. Diese tragen zum kulturellen Erbe und Stadtbild wesentlich bei, stehen jedoch meist nicht unter Denkmalschutz.

Es sollen Lösungen entwickelt werden, welche das Erscheinungsbild dieser Bauten erhalten, den Energieverbrauch reduzieren und gleichzeitig die Gebäude vor dem Zerfall schützen.

Randbedingungen und Methodik

Randbedingungen

Angesichts der Tatsache, dass es von 1850 bis 1920 eine grosse Anzahl an unterschiedlicher Konstruktionen gibt und es nicht möglich ist, alle Arten von Mauersteinen, Wanddicken und Ziegelmassen zu berücksichtigen bzw. tiefgründig zu untersuchen, sind die Untersuchungen vorliegender Arbeit auf die häufigsten und aussagekräftigsten Randbedingungen und Varianten fokussiert. Für das Aussenklima wird ein Standort bei Zürich mit der Bezeichnung „SMA“ verwendet. Von diesem werden Wetterdaten des Zeitraums 1.10.1984 bis 30.9.2009 bezogen. Für das Innenklima wird ein Raumklima mit normaler Feuchtelast nach der europäischen Norm EN 15026 angenommen.

Simulationsrechnungen in AP 3 ergaben für den Standort SMA, dass die Ausrichtung der Wände nach Westen feuchtetechnisch am kritischsten ist. Mit dieser Ausrichtung erfolgt die höchste Wasseraufnahme durch Schlagregen. Eine nach Norden ausgerichtete Wand erhält am wenigsten Sonneneinstrahlung, was die Austrocknung verringern und das Frostrisiko im Winter erhöhen kann.

Methodik

Verwendete Software für die Simulationen

Die feuchtetechnische Untersuchung der flächigen Wandaufbauten im Projekt „SuRHIB“ erfolgt mit dem Programm WUFI Pro® (*Wärme und Feuchte instationär*) aus der Softwarefamilie WUFI®. Mit diesem Programm lässt sich der Wärme- und Feuchtetransport und somit das Feuchteverhalten von mehrschichtigen Bauteilaufbauten unter nicht stationären Klimabedingungen bestimmen (Künzel H., 1994). Für die Berechnung der durch die Sanierungsmaßnahmen entstehenden Wärmebrücken wurde das Programm Flixo® angewendet.

Vorgehensweise

Die Durchführung der hygrothermische Simulationen wurde in zwei Schritte untergliedert. Ausgehend von der Bestandsanalyse wurde zunächst eine Auswahl von drei Bestandskonstruktionen (siehe Abs. 2.4), ermittelt in AP1, mit WUFI Pro® berechnet und anschliessend wurden die Simulationsdaten ausgewertet. Die Bestandssimulationen starten am 1.10.1984 und enden am 1.10.2009, umfassen also insgesamt einen Zeitraum von 25 Jahren mit den oben erwähnten klimatischen Randbedingungen.

In einem zweiten Schritt wurden die ausgewählten Konstruktionen mit verschiedenen Innendämmsystemen simuliert und bauphysikalisch beurteilt.

Materialkenndaten

Bei der hygrothermischen Bauteilsimulation ist eine möglichst genaue Kenntnis der Materialkenndaten notwendig. Als Quellen für die vorliegende Arbeit dienen hauptsächlich die Materialdatenbank des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP), die MASEA-Datenbank (Materialdatensammlung für energetische Altbausanierung) sowie Messdaten der TU-Wien.

Aussen- und Innenputz

Der Bestandsanalyse des AP1 (ETHZürich, 2011) zu Folge sind die Wände aussen in der Regel mit einem Kalkzementputz (30mm) versehen. Die Bestandsanalyse ergab weiterhin, dass der Mörtel der untersuchten Wände in vielen Fällen zementhaltig ist, weshalb in der Simulation Kalkzement mit einem groben Zuschlag verwendet wird. Als Innenputz wurde Kalkputz mit einer Dicke von 20 mm verwendet.

Der Ausdruck $W'w$ wird nach Künzel als Wassereindringkoeffizient $W'w$ bezeichnet (Klopfer & Homann, 2008).

$$h^1 = W'w \cdot \sqrt{t}$$

Eine entscheidende Eigenschaft der äusseren Putzschicht ist die kapillare Regenwasseraufnahme des Baustoffes. Wenn die bestehende Fassade eine Putzschicht aufweist, die einen hohen Wassereindringkoeffizient $W'w$ hat, kann durch Kapillarwirkung eine grössere Wassermenge in das Bauteil der bestehenden Wand eindringen. Bei starkem Wind ist der kapillaren Wasseraufnahme noch höher. Ist das Wasser einmal in die Porenräume Kalkzementputz eingedrungen, so besteht die Gefahr, dass es bei tiefen Temperaturen zur Eisbildung und zu Schäden durch Abplatzungen der Fassade kommt.

Der Wasseraufnahmekoeffizienten (kurz w -Wert) wird dazu benutzt, die kapillare Saugfähigkeit von Baustoffen zu klassifizieren, wobei die folgenden Begriffe Verwendung finden (Klopfer & Homann, 2008): Als wasserhemmend gelten Schichten mit einem w -Wert von $0,5 < w \leq 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ und die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s_d \leq 2 \text{ m}$ ist. Wasserabweisend sind Schichten, wenn das Produkt $w \cdot s_d$ einen Wert von höchstens $0,12 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ aufweist, d.h. wenn der w -Wert $0,001 < w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ und $s_d \leq 2 \text{ m}$ ist.

Die Wetterschutzwirkung von Putzen und Beschichtungen wird durch deren Wasseraufnahmekoeffizient w , deren wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d und durch das Produkt aus beiden Grössen ($w \cdot s_d$) nach (DIN 4108-3:2001-07) Tabelle 2 bestimmt. Darüber hinaus sind der Literatur folgende Werte von Wassereindringkoeffizienten von Kalkzement- und Kalkputzen entnommen:

Tabelle 1 Wasseraufnahmekoeffizienten w der verwendeten Putze (nach Künzel und Schwarz), deren wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d und das Produkt aus beiden Grössen

Material	Wasseraufnahmekoeffizient w		Wasserdampf-diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d (m)	$w \cdot s_d$ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{h}^{0,5})$
	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$		
Kalkzementputz	2 bis 4	0,03 bis 0,07	$\leq 2,0$	4 bis 8
Zementputz	2 bis 3	0,03 bis 0,05	$\leq 2,0$	4 bis 6

Die Wasseraufnahmefähigkeit des Aussenputzes bestimmt in hohem Masse den Wassergehalt des Mauerwerkes. Es wurde in Anlehnung an die Ergebnisse einer Putzuntersuchung mit Putzproben des Bio-Grundputzes (nach DIN V 18550 $wW = 0,165 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$) und des Restaurier-Grundputzes (nach DIN V 18550 $wW = 1,083 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$) einen relativ hohen Wert des Wasseraufnahmekoeffizient (wW) von $1,8 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ herausgefunden (Schmitz, Berner Fachhochschule, 2011). Infolgedessen wurde $wW = 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ als Ausgangswert für die Simulationen des Bestands angenommen. Dieser Wert entspricht vermutlich einem Aussenputz mit den technischen Eigenschaften von historischem Putz.

¹ Die Eindringtiefe h nimmt mit der Wurzel der Zeit zu, da mit zunehmender Eindringtiefe der viskose Fließwiderstand des Wassers immer grösser wird.

Mauersteine

Für die Simulation des Bestandes werden aus einer Grundgesamtheit von 25 Ziegeln insgesamt 7 Ziegel zur weiteren Untersuchung ausgesucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die Ziegel hinsichtlich ihrer Materialkennwerten möglichst unterscheiden, um eine grosse Bandbreite abzudecken.

Folgende Kennwerte wurden dabei vor allem berücksichtigt:

- Rohdichte
- Wärmeleitfähigkeit
- Wasseraufnahmekoeffizient w
- Offene Porosität

Die unter diesen Kriterien ausgewählten Mauersteine sind folgende Vollziegel: ZC, ZP, ZA, ARB, ZJ und ZD aus der MASEA Datenbank und die Vollziegel HWZ (Historischer Wiener Vollziegel) aus einer Untersuchung der TU-Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz.

Tabelle 2: Charakteristische Materialkennwerte der Ziegel (Quelle: Materialdatenbank der Simulationssoftware WUFI des Fraunhofer IBP, Holzkirchen, Deutschland).

Bezeichnung	Rohdichte ρ	Wärmekapazität c_p	Wärmeleitfähigkeit λ_T	Diffusionswiderstand μ	Bezugsfeuchtegehalt $u_{(80)}$	Freie Wassersättigung $u_{(f)}$	Wasseraufnahmekoeffizient A_w	Offene Porosität Φ
	[kg/m ³]	[J/kg K]	[W/mK]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ² *.h]	[Vol.-%]
ZP	1979	834	0.990	45.0	2.50	82.0	3.00	25.0
ZC	1985	836	0.908	23.0	3.10	188.0	10.98	28.0
ZA	1845	794	0.518	16.0	5.20	216.0	10.98	30.0
ARB	1807	861	0.695	10.0	1.50	161.0	15.00	32.0
ZJ	1767	868	0.492	17.0	3.40	192.0	10.98	33.0
ZD	1611	953	0.393	10.0	3.60	216.0	10.98	39.0
Hist Wiener Vollz. HWZ	1560	850	0.600	15.0	11.80	369.0	34.98	38.0

Um den Aufwand der weiteren Untersuchungen in einem angemessenen Rahmen zu halten soll die Auswahl für die Simulation der Innendämmsysteme weiter eingeschränkt werden (vgl. dazu Abschnitt 3.1). Dafür werden die zwei Ziegel mit dem höchsten und niedrigsten Wassergehalt im Winterhalbjahr, also von Anfang Oktober bis Ende März, ermittelt. Dieser Zeitraum des Jahres wird hinsichtlich einer Schädigung der Ziegel durch Frosteinwirkung als kritisch erachtet. Frostschäden sind ein häufig auftretender Schadensfall bei Ziegelmauerwerken. Das Vorhandensein von Feuchtigkeit ist dabei eine entscheidende Voraussetzung für die Entstehung von Frostschäden. Durch häufige Frost-Tauwechsel kann es zu Abplatzungen des Außenputzes, zur Schädigung der Mörtelfugen sowie der Ziegelsteine selbst kommen. Zudem verringert sich die Austrocknung des Mauerwerkes aufgrund der kühlen Temperaturen im Winterhalbjahr, weswegen der Gesamtwassergehalt des Bauteils häufig ansteigt. Eine erhöhte Feuchte des Mauerwerks bei gleichzeitig niedrigeren Temperaturen erhöht die Gefahr der Tauwasserbildung zwischen Innendämmung und Bestandswand.

Für alle Mauersteine wurden die drei häufige Grundkonstruktionen (siehe Abs.2.4) simuliert, um das feuchtetechnische Verhalten des Bestands zu untersuchen.

Grundkonstruktionen

Die Untersuchungen beschränken sich auf einschalige Backsteinmauerwerke.

Ausgegangen wird von Vollziegeln mit folgenden Ziegelmassen: Länge 250 mm, Breite 120 mm und Höhe 60 mm (ETHZürich, 2011).

Aus oben genannten Ziegelmassen resultieren folgende Dicken der Mauerwerkverbände ohne Aussen- und Innenputz: 25 cm, 38 cm und 51 cm.

Aus diesen Massen entstehen folgende Grundkonstruktionen:

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

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

Resultate

Ergebnisse der Analyse und Simulationen von Bestandskonstruktionen

Als Grundlage der Untersuchungen der sanierten Wände mit innenliegenden Wärmedämmsystemen ist zunächst eine genaue Analyse des Bestands notwendig, um die Zusammenhänge des Wärme- und Feuchtetransportes in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften besser verstehen zu können.

Die Materialeigenschaften des Ziegels bestimmen sein feuchtetechnisches Verhalten. Der Ziegelstein ist ein poröser mineralischer Baustoff. Der Feuchtehaushalt dieser Baustoff wird durch die Feuchtespeichereigenschaften sowie die im Baustoff in flüssiger und gasförmiger Phase ablaufenden Feuchtetransportvorgänge bestimmt. Die Feuchtespeicherung und der Feuchtetransport finden bei mineralischen Baustoffen im Porenraum statt. (Krus, 1995) Die Feuchtespeicher- und Feuchtetransportphänomene sind sehr komplex und häufig nur mit hohem messtechnischem Aufwand untersuchbar. Aufgrund der Komplexität ist es schwierig, eine präzise Aussage darüber zu treffen, welche Stoffkennwerte im Detail ein Ziegel aufweisen sollte, damit er für Innendämmmaßnahmen geeignet ist. Aus der Bestandssimulation lassen sich aber einige Aussagen ableiten, welche Ziegel besser sind als andere.

Bei der Simulation des Bestandes wurde der Gesamtwassergehalt des Bauteils (kg/m^2) sowie der Wassergehalt in den einzelnen Materialschichten untersucht. WUFI berechnet für jede Materialschicht den Wassergehalt in kg/m^3 . Um die unterschiedlichen Wandkonstruktionen besser miteinander vergleichen zu können wurde auf der Aussen- und Innenseite des Mauerwerks eine Ziegelschicht von jeweils 1cm eingefügt. Im Folgenden werden diese als innere und äussere Ziegelschicht bezeichnet.

Die Auswertung der Bestandssimulation zeigt, dass die Aussenwand mit dem Ziegelstein HWZ, welcher die niedrigste Rohdichte und die zweithöchste Porosität aller untersuchten Ziegelsorten aufweist, den höchsten Gesamtwassergehalt des Bauteils insgesamt (vgl. Abb. 2 bis 5) sowie der äusseren und inneren Ziegelschichten (vgl. Abb. 6 bis 9) zufolge hat. Aus den Liniendiagrammen sowie den unten dargestellten Boxplots²-Diagrammen ist zudem ersichtlich, dass die Wassergehalte dieses Ziegels eine starke jährliche Schwankungsbreite aufweisen. Es werden sehr hohe Wassergehalte erreicht, aber der Stein trocknet auch schnell wieder aus.

Der Ziegel ZC mit der höchsten Rohdichte und einer relativ niedrigen Porosität enthält die geringste Gesamtwassermenge sowie Ziegelwassermenge der äusseren Schicht. Die innenliegende Ziegelschicht weist deutlich geringere Schwankungsbreiten der Wassergehalte auf, da sie hauptsächlich durch das Innenklima und weniger durch Schlagregeneinflüsse bestimmt ist. Die Ziegelwassergehalte der Steine ZC, ZP und ARB liegen eng beieinander. Die Zeigelsorte ARB weist den niedrigsten Medianwert auf (vgl. Tab. 7). Aus den Boxplots-diagrammen (vgl. Abb. 8 und 9) wird deutlich, dass der Wassergehalt der inneren Schicht in sehr feuchten Winterhalbjahren vor allem bei den porösen Ziegeln stark ansteigt. Dadurch kann sowohl der Innenputz als auch später die Wärmedämmung Schaden nehmen. Beim Ziegel ZC ist dieser Effekt am wenigsten stark ausgeprägt, wie sich aus dem niedrigen Maximalwerten des Ziegelwassergehalts erkennen lässt.

Für die Analyse der Innendämmsysteme wird in der weiteren Ausarbeitung der Stein ZC als „bester“ Ziegel und der Stein HWZ als „schlechtester“ Ziegel verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass das feuchtetechnische Verhalten der übrigen Steine dazwischen liegt und

² Ein Boxplot besteht aus einem Rechteck, genannt Box, und zwei Linien, die dieses Rechteck verlängern. Diese Linien stellen den Minimal- und Maximalwert des jeweiligen Datensatzes dar.

Die Box entspricht dem Bereich, in welchem die mittleren 80% der Daten liegen. Sie wird durch das obere 90%- und das untere 10%-Dezil begrenzt. Der Median ist als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet. Dieser Strich teilt das gesamte Diagramm in zwei Hälften, in denen jeweils 50 % der Daten liegen.

somit die Grenzen abgesteckt sind. Der Ziegel ZA wird angewendet, wenn ein Backstein mit einem mittleren Wert für die Simulation benötigt wird. Die Simulationsergebnisse werden sowohl durch Liniendiagramme dargestellt als auch statistisch ausgewertet und durch Übersichtstabellen und Boxplots aufbereitet.

In der Auswertung der Simulationsergebnisse entspricht die Box dem Intervall, in welchem 80% der Daten liegen. Sie wird durch das obere 90%- und das untere 10%-Dezil begrenzt.

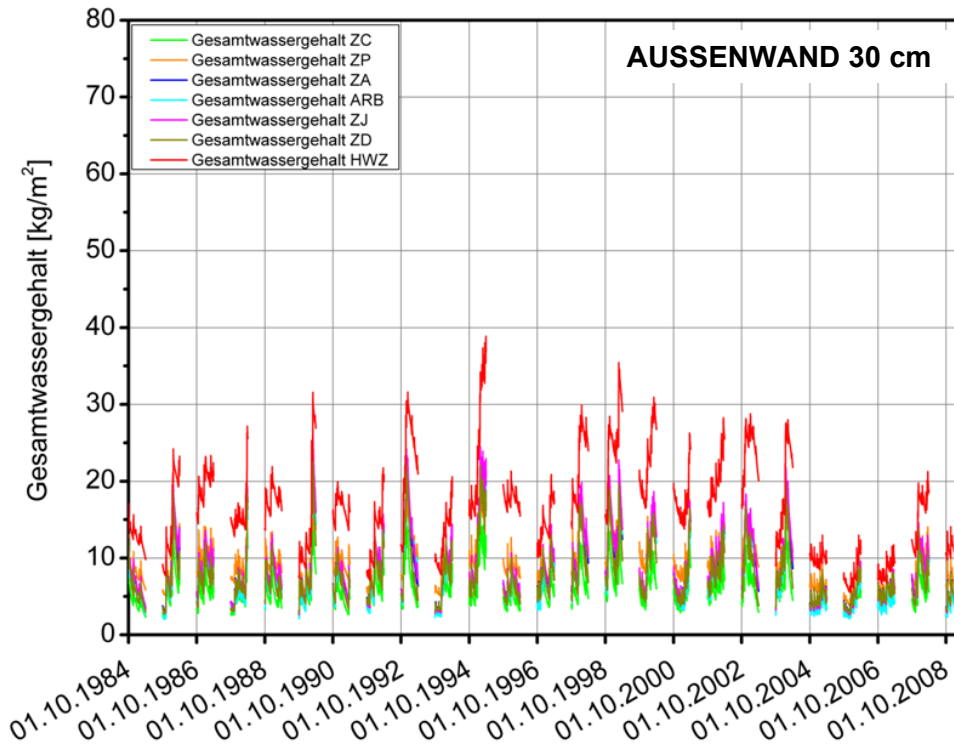


Abbildung 2: Gesamtwassergehalt einer 30 cm starken Aussenwand berechnet für 25 Jahre. Der Wassergehalt ist jeweils nur für das Winterhalbjahr dargestellt

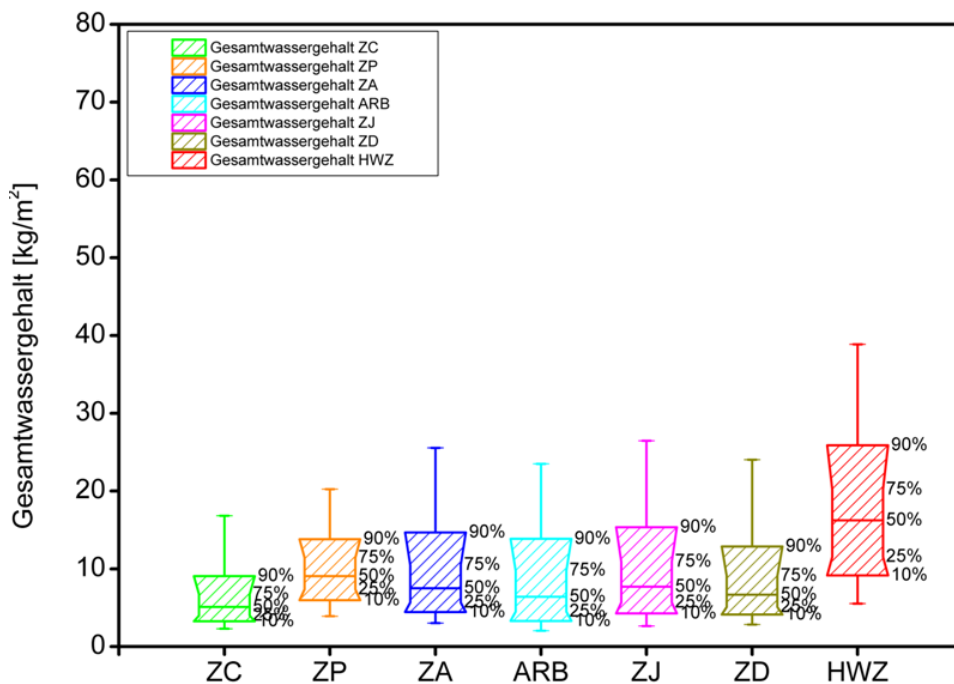


Abbildung 3: Darstellung des berechneten Gesamtwassergehalts für eine 30 cm dicke Aussenwand für die untersuchten Ziegelsorten

Tabelle 3: Statistische Auswertung des Gesamtwassergehalts der 30 cm starken Aussenwand

Statistik	Name [Einheit]	Mittelwert	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
	ZC [kg/m ²]	109825	2.3	5.1	16.82	14.52	3.25	9.05
	ZP [kg/m ²]	109825	3.9	9.06	20.23	16.33	5.97	13.8
	ZA [kg/m ²]	109825	3.01	7.51	25.56	22.55	4.44	14.66
	ARB [kg/m ²]	109825	2.04	6.41	23.49	21.45	3.31	13.86
	ZJ [kg/m ²]	109825	2.64	7.69	26.46	23.82	4.26	15.34
	ZD [kg/m ²]	109825	2.84	6.68	24.03	21.19	4.11	12.87
	HWZ [kg/m ²]	109825	5.53	16.23	38.86	33.33	9.14	25.87

Das nachfolgende Diagramm fasst die Simulationsergebnisse für die 56 cm dicke Aussenwand zusammen.

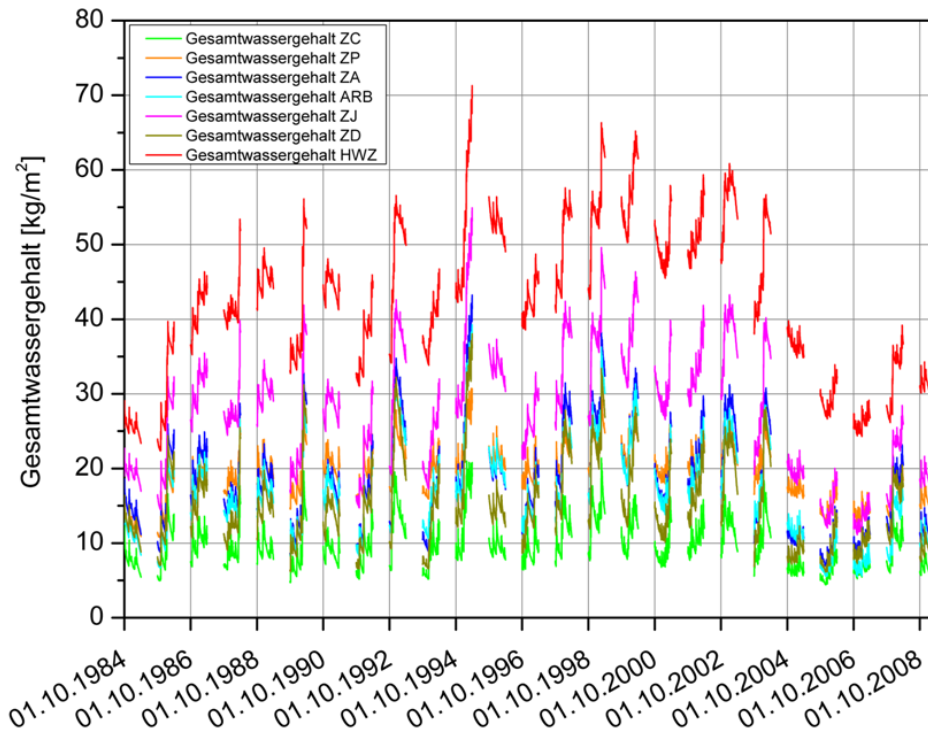


Abbildung 4: Gesamtwassergehalt einer 56 cm starken Aussenwand berechnet für 25 Jahre. Der Wassergehalt ist jeweils nur für das Winterhalbjahr dargestellt

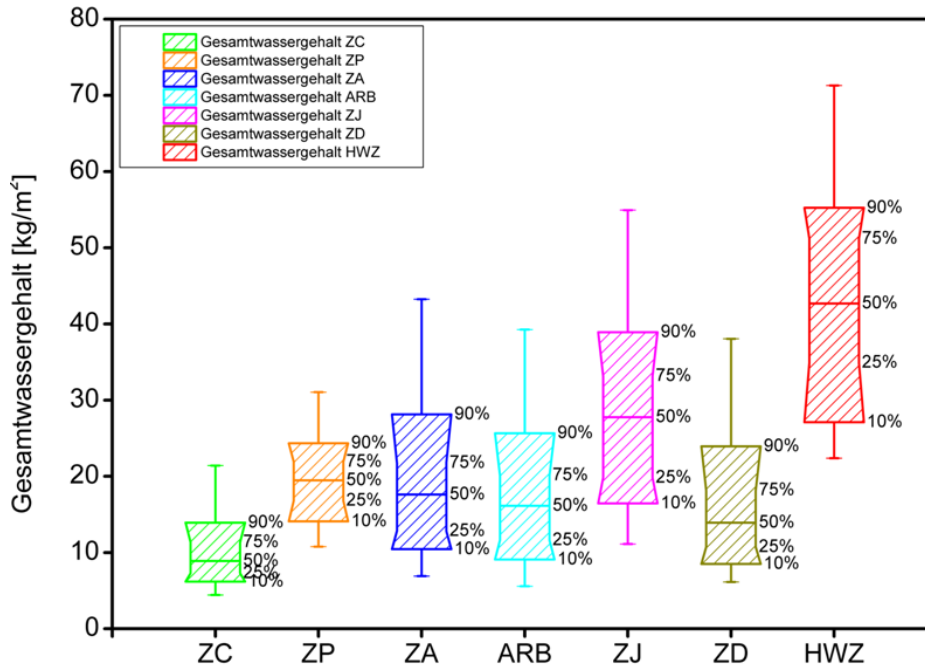


Abbildung 5: Darstellung des berechneten Gesamtwassergehalts für eine 56 cm dicke Aussenwand für die untersuchten Ziegelsorten

Tabelle 4: Statistische Auswertung des Boxplots für die verschiedenen Ziegelsorten

Name [Einheit]	Mittelwert	Minimum	Median	Maximum	Spanne	P10	P90
ZC [kg/m ²]	109825	2.3	5.1	16.82	14.52	3.25	9.05
ZP [kg/m ²]	109825	3.9	9.06	20.23	16.33	5.97	13.8
ZA [kg/m ²]	109825	3.01	7.51	25.56	22.55	4.44	14.66
ARB [kg/m ²]	109825	2.04	6.41	23.49	21.45	3.31	13.86
ZJ [kg/m ²]	109825	2.64	7.69	26.46	23.82	4.26	15.34
ZD [kg/m ²]	109825	2.84	6.68	24.03	21.19	4.11	12.87
HWZ [kg/m ²]	109825	5.53	16.23	38.86	33.33	9.14	25.87

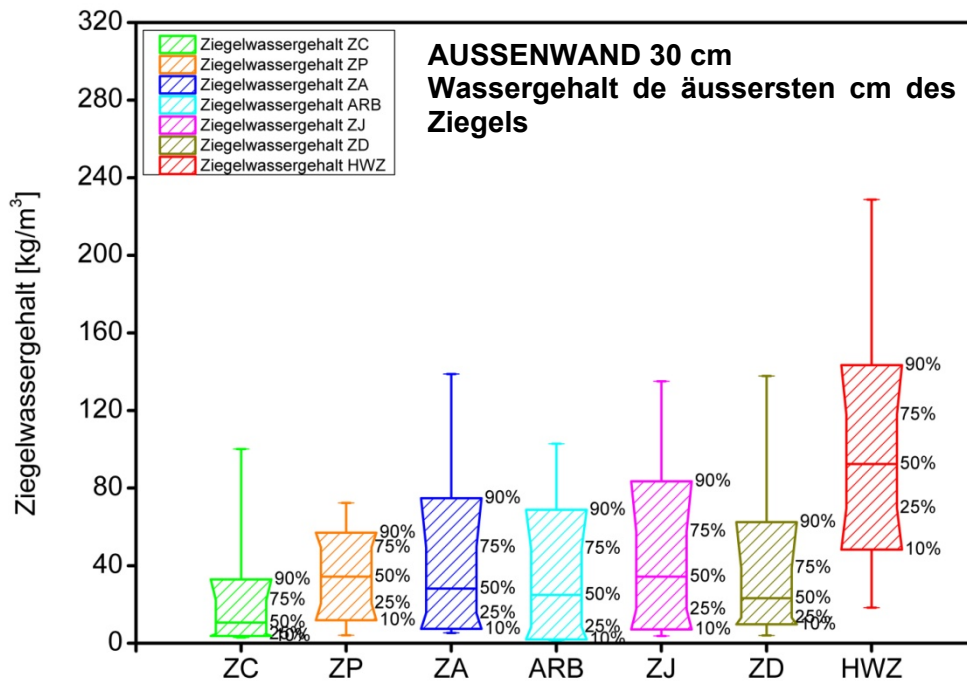


Abbildung 6: Boxplot-Diagramm des Wassergehalts der äusseren 1cm-Ziegelschicht des Mauerwerks (25cm)

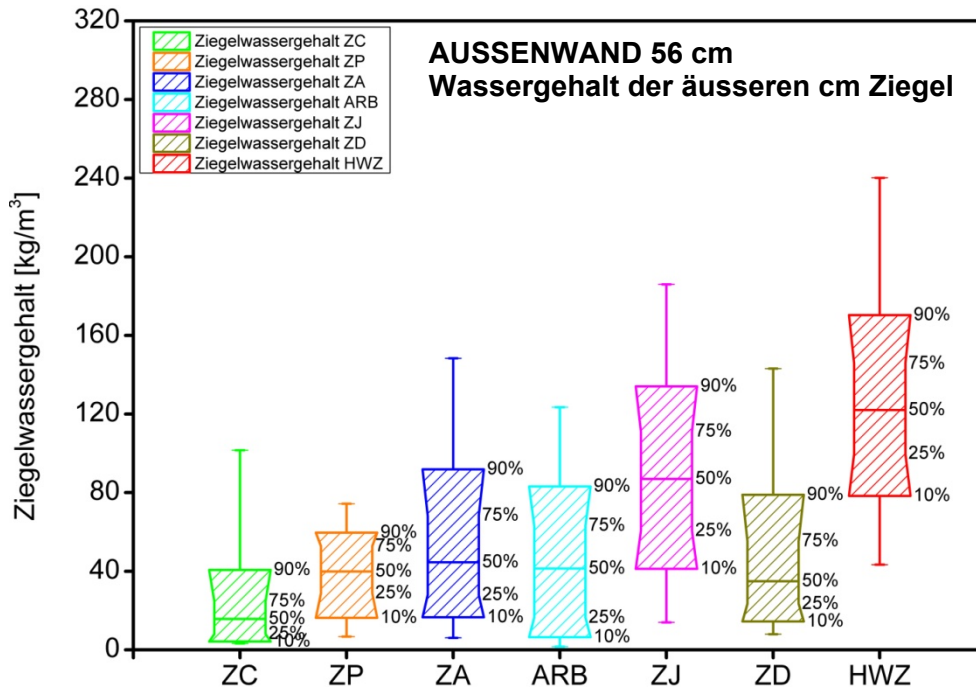


Abbildung 7: Boxplot-Diagramm des Wassergehalts der äusseren 1cm-Ziegelschicht des Mauerwerks (56cm)

Tabelle 5: Auswertung des Wassergehaltzunahme des äusseren Zentimeters Ziegelstein je nach Mauerwerksdicke. Die letzte Spalte stellt das Inkrement der Medianwert einer 250 zu einer 510 mm Mauerwerk in % dar.

Bezeichnung	Median 250mm	Median 510mm	Δ Wassergehalt
ZC [kg/m³]	10.64	15.68	47%
ZP [kg/m³]	34.34	39.86	16%
ZA [kg/m³]	28.21	44.59	58%
ARB [kg/m³]	24.86	41.36	66%
ZJ [kg/m³]	34.34	86.97	153%
ZD [kg/m³]	23.21	34.87	50%
HWZ [kg/m³]	92.37	122.08	32%

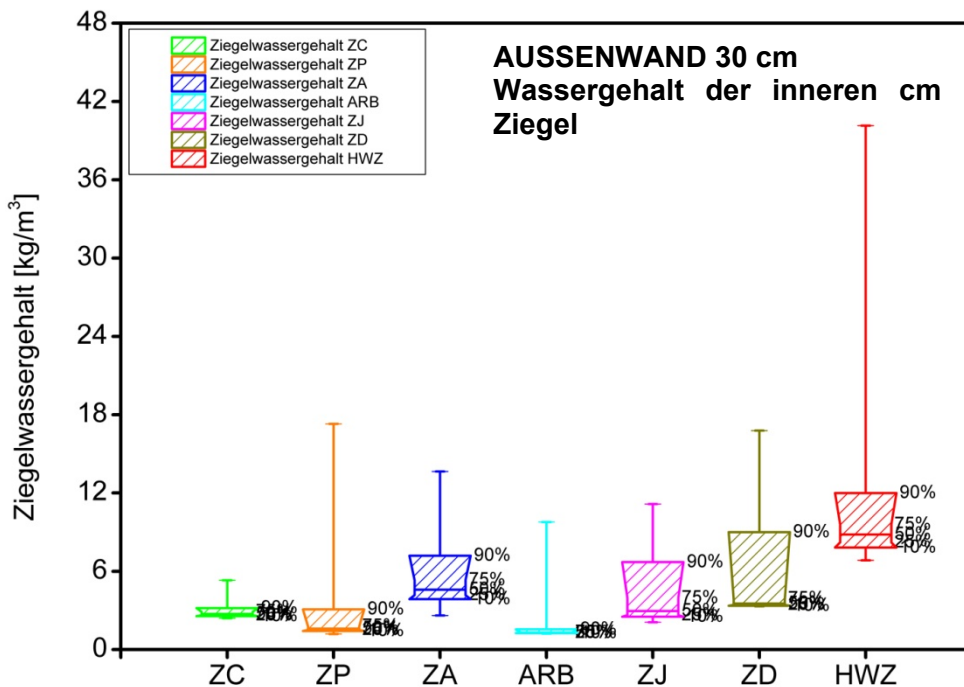


Abbildung 8: Boxplot-Diagramm des Wassergehalts der inneren 1cm-Ziegelschicht des Mauerwerks (25cm).

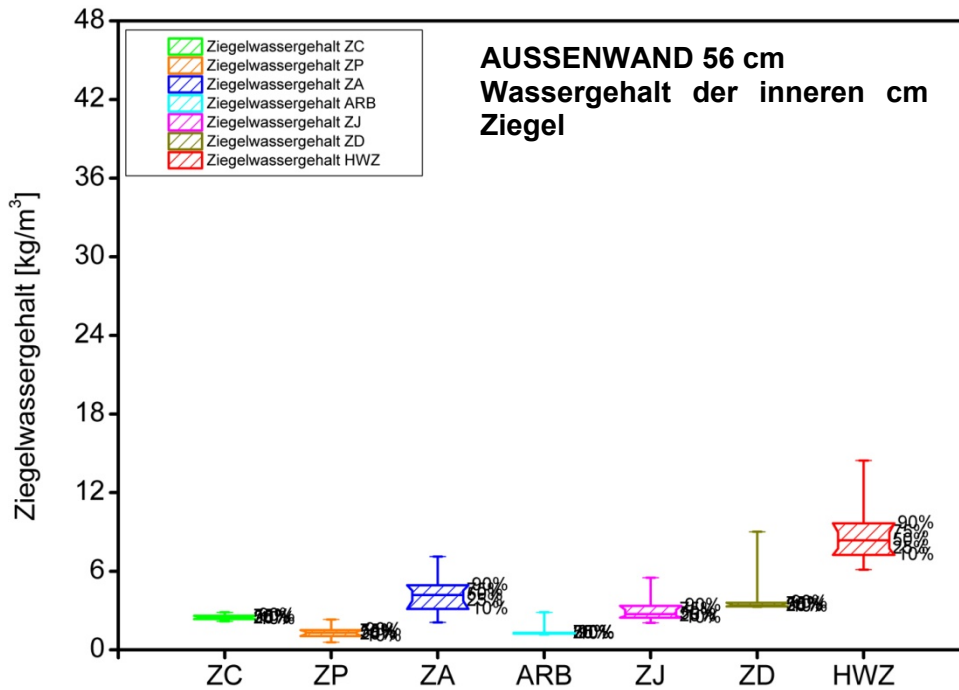


Abbildung 9: Boxplot-Diagramm des Wassergehalts der inneren 1cm-Ziegelschicht des Mauerwerks (56cm)

Tabelle 6: Auswertung des Wassergehaltzunahme des äusseren Zentimeters Ziegelstein je nach Mauerwerksdicke. Die letzte Spalte stellt das Inkrement der Medianwert einer 250 zu einer 510 mm Mauerwerk in % dar.

Bezeichnung	Median 250mm	Median 510mm	Δ Wassergehalt
ZC [kg/m³]	2.73	2.46	-10%
ZP [kg/m³]	1.6	1.31	-18%
ZA [kg/m³]	4.59	4.19	-9%
ARB [kg/m³]	1.29	1.28	-1%
ZJ [kg/m³]	2.95	2.73	-7%
ZD [kg/m³]	3.53	3.39	-4%
HWZ [kg/m³]	8.81	8.36	-5%

Beim Gesamtwassergehalt der Winterhalbjahre einer 30 cm Aussenwand des Ziegels ZC (vgl. Abb. 3) liegen 80 % der Werte zwischen 3.5 und 9.5 kg/m². Dagegen sind die Werte im Wertebereich beim Vollziegel HWZ mit 9.5 bis 25.8 kg/m² deutlich höher. Damit variiert des Gesamtwassergehalts der sieben verschiedenen Backsteine von 3.5 bis 25.8 kg/m².

Im nächsten Fall, beim Gesamtwassergehalt der Winterhalbjahre einer 56 cm Aussenwand (vgl. Abb. 5) liegen die Werte im Wertebereich beim Ziegel ZC zwischen 7 und 14 kg/m². Dagegen liegt der Wassergehalt des Ziegels HWZ bei 28 bis 57 kg/m². Der Unterschied ist auch deutlich in diesem Fall. Die Gesamtwassergehalte der sieben Vollziegel reichen von 7 bis 57 kg/m², was einer Schwankung von 50 kg/m² entspricht.

Der Wassergehalt des äussersten Zentimeters zusammen mit der Anzahl der Nulldurchgänge gibt Aufschluss über die Anfälligkeit der Ziegelsteine bezüglich Frostschäden.. Auch bei der aussenliegenden Ziegelschicht zeigen sich grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen historischen Vollziegeln sowie eine breite Spannweite der Median-Werte (vgl. Abb. 6 und 7). Diese liegen zwischen 11 und 92 kg/m³ Wassergehalt im ersten Zentimeter eines 250 mm Backsteinmauerwerks, und zwischen 15 und 123 kg/m³ Wassergehalt im ersten Zentimeter eines 510 mm Backsteinmauerwerks.

Anders verhält sich der Wassergehalt des innersten Zentimeters der untersuchten Steine. Der Wassergehalt der innersten Ziegelschicht ist von besonderer Bedeutung um das Verhalten der verschiedenen Backsteine im Bezug auf die kapillare Wasserverteilung innerhalb des Baustoffes zu untersuchen. Der Wassergehalt in ARB und ZP liegt unter dem Wert vom ZC. Beide Steineweisen aber kleinere Werte bezüglich des Bezugsfeuchtegehalts (u_{80}) sowie von der freien Wassersättigung (u_f) als ZC auf, was die Begründung für den niedrigeren Wassergehalt sein kann.

Um den Einfluss des w -Wertes des Aussenputzes auf den Wassergehalt der Wand zu untersuchen, wurde eine 30 cm starke Aussenwand mit einem ausgewählten mittleren Klimajahr für eine nach Westen orientierte Fassade simuliert. Wie in Abbildung 10 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 dampfbremmenden Schicht auf der rechten Seite, so steigt der Wassergehalt bei einem w -Wert von $2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ stark an. Bei einem saugfähigen Aussenputz sind diffusionsdichte Innendämmsysteme demnach nicht geeignet.

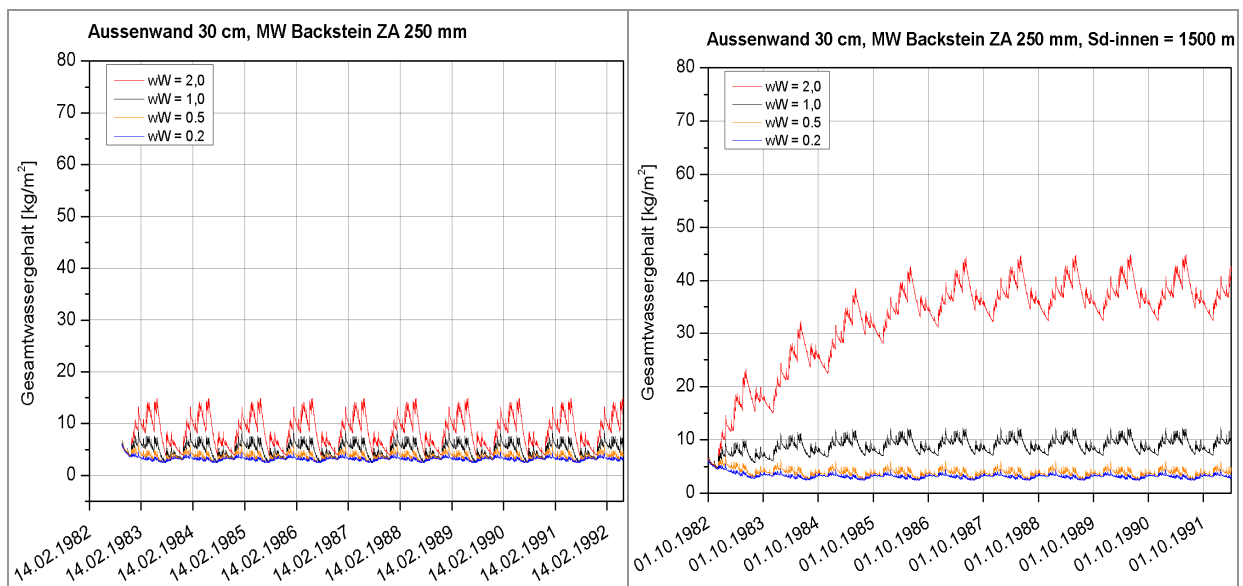


Abbildung 10: Berechneter zeitlicher Verlauf des Gesamtwassergehaltes einer 30 cm dicken bestandsaussenwand (Vollziegel ZA) mit verschiedenen Wasseraufnahmekoeffizienten des Aussenputzes. Rechts mit einer raumseitigen Dampfbremse mit einer wasserdampfäquivalenten Luftschichtdicke, $S_d = 1500 \text{ m}$ für ein mittleres Aussenklima

Nachfolgend werden die Anforderungen an den Wärmeschutz bei der Sanierung bestehender Aussenwände erläutert. Während hinsichtlich des Feuchteschutzes das Kriterium des Gesamtwassergehalts ZC als den besseren und HWZ als den schlechterer Backstein hervorging, wird sich für den Wärmeschutz eine andere Rangordnung der Backsteine ergeben. Die Ziegel mit hohem Porosität und im Vergleich zuvor schlechteren feuchtetechnischen Eigenschaften haben bessere Dämmeigenschaften. Die Werte der Wärmedurchgangskoeffizient der Aussenwände im Bestand liegen z.B. bei einer Dicke von 30 cm zwischen $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Ziegel ZD) und $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Ziegel ZP).

Um den Primäranforderungen an die Gebäudehülle bei Sanierungen (Einzelbauteilnachweis) gemäss der SIA 380/1 ($U\text{-Wert} = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$) zu genügen, sollte bei einer guten Bestandswand mit $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit Wärmedämmstoffdicken von mind. 12 cm mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_T = 0,036 \text{ W/m}^2\text{K}$ geplant werden. Und bei einer schlechten Bestandswand mit $U = 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ wäre eine Dicke der Wärmedämmstoffschicht von mind. 14 cm notwendig. Diese zusätzlichen Innenwärmedämmungen sind als kritisch zu betrachten und müssen in jeden konkreten Fall mit bauphysikalischen Berechnungen überprüft werden.

Der Temperaturverlauf innerhalb einer 30 cm starken Aussenwand vor und nach der Sanierung für stationäre Temperaturrandbedingungen einer Lufttemperatur von 20°C innen und -10°C aussen wird nachfolgend in Abb. 11 gezeigt.

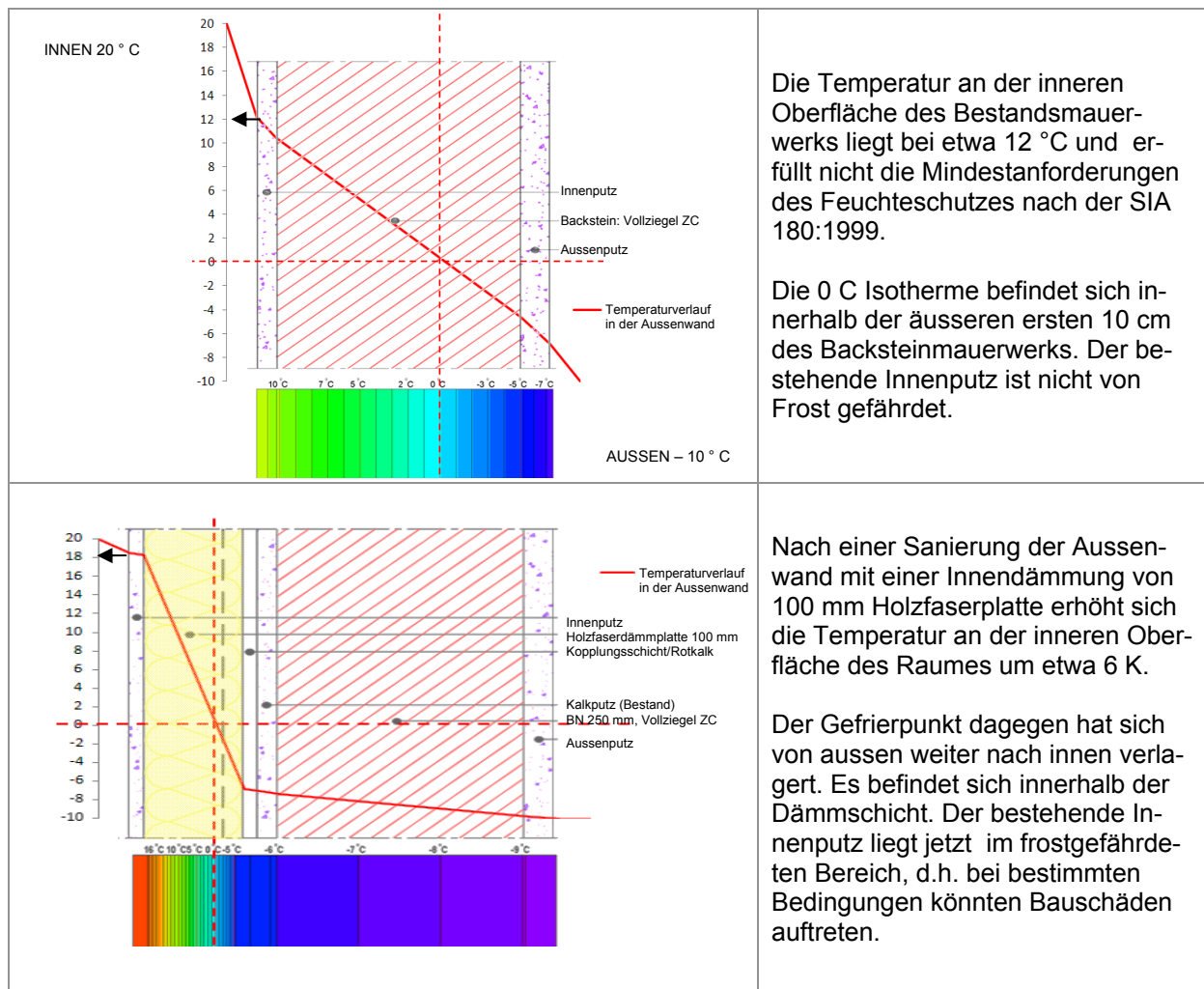


Abbildung 11 Temperaturverlauf innerhalb einer 30 cm starken Aussenwand vor und nach der Sanierung für stationäre Temperaturrandbedingungen von 20°C innen und -10°C aussen

Simulationen des Bestands mit Innendämmsysteme (Sanierung)

Die wärmegeprägten Wandaufbauten bestehen aus zwei Systemen. Der *Bestandswand* aus der vorhandenen bauseitigen Konstruktion und dem *Innendämmsystem*. Das Innendämmsystem besteht aus dem Dämmstoff mit den zusätzlichen erforderlichen Schichten (z.B. Dampfbremsen), den Befestigungsmitteln sowie der raumseitigen Bekleidung bzw. Beschichtung. Um den Umfang der Arbeit in einem angemessenen Rahmen zu halten, wird die Auswahl der 7 Vollziegel der Bestandsuntersuchung für die Simulationen der Innendämmsysteme auf die beiden „extremen“ Ziegel ZC und HWZ eingeschränkt. Wo es sinnvoll erscheint, wird zusätzlich mit dem „mittleren“ Ziegel ZA simuliert.

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

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

Die Dämmstoffe wurden aus zwei Gründen gewählt. Erstens sind diese fünf Wärmedämmungen häufig verwendete Dämmstoffe für den Einsatz im Innendämmbereich. Ihre Wärmeleitfähigkeit liegt im Bereich von 0,035 bis 0,045 W/(mK), in welchem sich die meisten Dämmstoffe bewegen. Steinwolle, Glaswolle, Holzfaser und Zellulose sind Faserdämmstoffe. Zweitens gehören diese 5 Wärmedämmstoffe zu den bestklassifizierten nach den vier Ökoindikatoren der KBOB³ *Ökobilanzdaten im Baubereich*, Stand Januar 2011 (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 7 Auszug aus dem KBOB Merkblatt Ökobilanzdaten in Baubereich, Stand Januar 2011

Wärmedämmstoffe	UBP ⁴	Primärenergie Gesamt	Graue Energie	Treibhausgas- emissionen
		MJ pro kg	MJ pro kg	kg CO ₂ pro kg
Schaumglas	903	26.5	19.7	1.17
Weichfaserplatte	966	36.2	11	0.436
Zellulosefasern (eingebblasen)	1270	10	7.43	0.392
Steinwolle	1970	17.1	15.4	1.06
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

Jedes Innendämmsystem wird jeweils mit den Backsteinen ZC und HWZ simuliert. Zu jedem Ziegelstein werden zwei Mauerwerksdicken berechnet, jeweils mit einer Dicke von 250 mm und 510 mm.

Um den Feuchteschutz bei der Sanierung von Altbauten untersuchen zu können, müssen für die einzelnen Schichten des Wandaufbaus verschiedene Beurteilungskriterien und Grenzwerte definiert werden. Diese werden als Grenzkriterien bezeichnet, deren Überschreitung zur Beeinträchtigung der Funktion des Bauteils bzw. zu einem Bauschaden führen kann.

³ Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren

⁴ Umweltbelastungspunkte

Innendämmsysteme aus Holzfaserdämmstoffen sind durch das Material Holz als nachwachsender Rohstoff ökologisch günstig. Der wärmedämmende Baustoff ist diffusionsoffen und kapillaraktiv.

Der Wärmedurchgangskoeffizient U der Aussenwände im Bestand mit einer Dicke von 30 cm liegt je nach Stein Sorte zwischen $U = 1,2$ und $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für den Mindestwärmeschutz nach SIA 180:1999 ist ein maximaler Wärmedurchgangskoeffizient U_{max} für Aussenwände von $U = 0,4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ erforderlich. Um diese Anforderungen zu erfüllen, müsste eine Dämmschichtdicke mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda=0,045 \text{ W/mK}$ von 80 mm bis 100 mm eingebracht werden. Für die Energieeinsparung nach SIA 380/1 (Einzelanforderungen opake Bauteile gegen aussen) ist ein Wärmedurchgangskoeffizient $U = 0,25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ erforderlich. D.h. das Bauteil müsste eine Dämmstoffschichtdicke zwischen 200 und 220 mm aufweisen. Durch die Innendämmung wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Wand nach Tab. 8 verbessert.

Tabelle 8 Wärmedurchgangskoeffizient U [W/ m²K] der Bauteile im Bestand und nach der Sanierung

Bezeichnung	λ	U-Wert 56 cm best. Wand (W/m²K)	U-Wert Wand nach Sanierung mit 100 mm Holzfaserplatte (W/m²K)
Vollziegel ZC	0.908	1.278	0.34
Vollziegel ZA	0.518	0.851	0.3
Vollziegel ARB	0.69	1.053	0.32
Vollziegel HWZ	0.6	0.984	0.31

Beurteilung der Schimmelpilzfreiheit und Kondensationsfreiheit an der Innenoberfläche des Bauteils im Innenraum: dafür wird das Isoplethenmodell (Sedlbauer, 2001) verwendet. Ein Isoplethensystem beschreibt die drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen „Temperatur, Feuchte und Substrat“ über eine bestimmte Zeitperiode. Als Substrat wurde der Substratgruppe 0 (optimaler Nährboden: unterste Wachstumsgrenze für alle in Gebäuden auftretenden Schimmelpilze) angenommen. Auf der Innenoberfläche sieht das Isoplethen-Diagramm weit weg von der Grenze für Schimmelpilzwachstum.

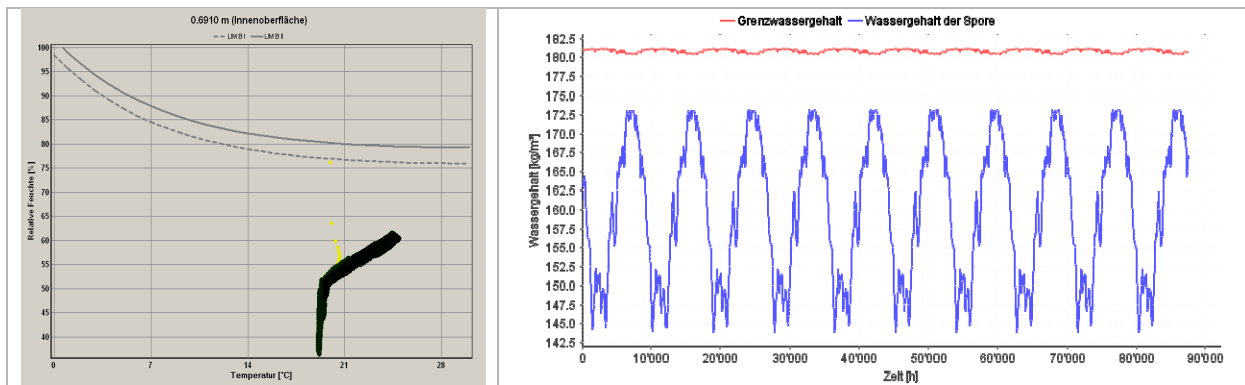


Abbildung 13: Links das Isoplethenmodell für eine 30 cm Aussenwand mit 10 cm IDS Holzfaserplatte. Rechts der Grenzwassergehalt, oberhalb dessen die Spore auskeimen und wachsen kann.

Parallel werden die Wärmebrücken bezüglich des Mindestwärmeschutzes untersucht, die bei Aufbringen einer innen liegenden Wärmedämmung entstehen. Als Beispiel ist die Wärmebrücke an einer einbindenden Wand in Abb. 14 dargestellt.

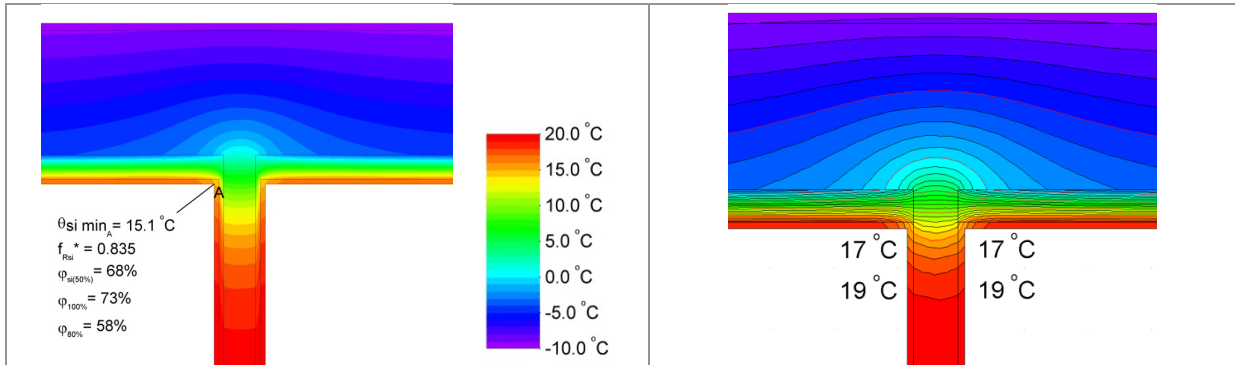
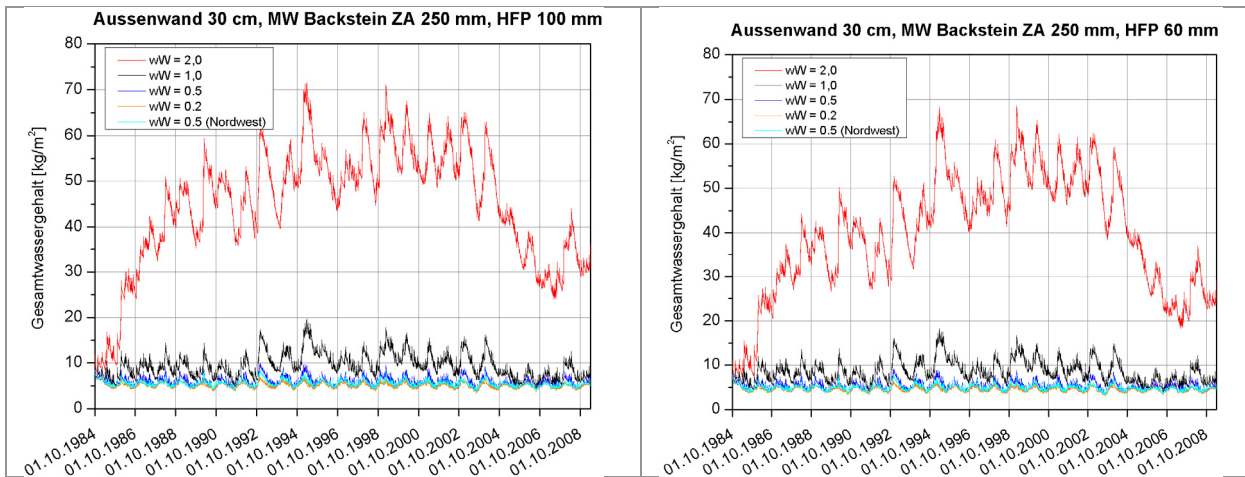


Abbildung 14 Anschluss einer Innenwand an eine Aussenwand mit einem Innendämmsystem (10 cm starke Holzfaserverplatte). Berechnung der Wärmebrücke an der Ecke des Anschlusses und Isothermenverlauf im Detail

Bezüglich des Gesamtwassergehalts im Bauteil ergeben die Simulationen keinen grossen Unterschied zwischen einer IDS mit 60 mm und einer 100 mm Holzfaserverplatte.



Das Kriterium der Schimmelpilzwachstum an der Aussenseite der Innendämmung ist in diesen Fall kritisch. Bei einer 56 cm starken Aussenwand mit dem Backstein HWZ (obere Grafiken) stellt sich heraus, dass der w-Wert des Aussenputzes auf 0.2 kg/(m²h0.5) begrenzt werden muss, denn nur so bleibt der Wassergehalt der Wärmedämmung unter dem kritischen Wert von 20 M.-% und die relative Feuchte in der Wärmedämmschicht unter 95% r.F (Abb.15).

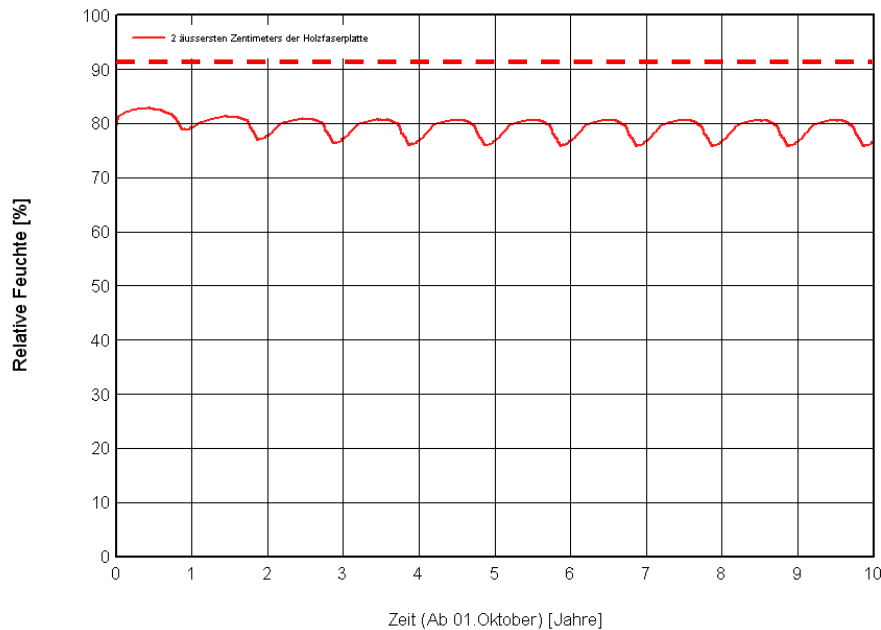


Abbildung 15 Darstellung der relativen Feuchte in den äusseren zwei Zentimetern einer Holzfaserplatte, die an den bestehenden Innenputz anschliesst.

Schlussfolgerungen

- Historische Ziegel weisen sehr unterschiedliche wärmeschutztechnische Eigenschaften zwischen den Ziegelsorten auf. In der Folge ergeben die Simulationen für die unterschiedlichen Ziegelsorten eine grosse Schwankungsbreite sowohl für den Gesamtwassergehalt des Mauerwerks als auch für den Wassergehalt des äussersten Zentimeters des Mauerwerks. Für eine genaue Prognose der Funktionstüchtigkeit eines Innendämmsystems ist die Kenntnis der Eigenschaften der Bestandskonstruktion unentbehrlich. Zumindest die Rohdichte sollte ermittelt werden, um den Backstein grob zu klassifizieren.
- Dieser Einfluss der Ziegelsorte auf das hygrothermische Verhalten der Mauerwerkswände muss auch bei der Simulation der sanierten Wände beachtet werden. Diese Untersuchungen werden zur Zeit durchgeführt.
- Eine Innendämmung behindert das Austrocknen des Mauerwerks nach innen. In Abhängigkeit von der Vollziegel-Sorte der Bestandswand kann dies unter Umständen zu einer Feuchteakkumulation, d.h. zu einem langfristigen Anstieg des Gesamtwassergehalts im Bauteil führen. Daher muss die Wasseraufnahme des Putzes an die Wassertransporteigenschaften des Ziegels und an das jeweilige Innendämmsystem angepasst werden. Auch diese Optimierungen werden zur Zeit mit Hilfe von Simulationen für die einzelnen Innendämmsysteme durchgeführt.

Literaturverzeichnis

- prEN 15026. (2007). *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Beuth Verlag.
- Bludau, C., Zirkelbach, D., & Künzel, H. (2010). Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens mehrschichtiger Bauteile. *Tagungsband Bauphysik*. Holzkirchen: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- DIN 4108-3:2001-07. (kein Datum). *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*.
- ETHZürich, I. d. (2011). *WP1 Documentation of reference buildings. Constructions of massive built residential buildings during the period 1850 to 1920*.
- Klopper, H., & Homann, M. (2008). *Lehrbuch der Bauphysik*. Vieweg+Teubner.
- Krus, M. (1995). Diss. Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe.
- Künzel, H. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation Universität Stuttgart .
- Künzel, H. M. (2004). Frostschäden an Putz und Mauerwerk – Ursachen und Vermeidung. MASEA. (kein Datum). *Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung: www.masea-ensan.com*.
- Schmitz, S. (Berner Fachhochschule, 2011). *Innendämmung im Gebäudebestand, Projektarbeit*.
- Sedlbauer, K. (2001). *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen - Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele*. Dissertation Universität Stuttgart.
- SIA 180. (1999). *Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- SIA 180: 1999. (1999). *Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau,, Zürich 1999*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- WTA Merkblatt 6-4. (2006). *Innendämmung, Planungsleitfaden*. München: Eigenverlag.

