

Thermische Sanierungskonzepte für landwirtschaftliche Holzgebäude unter Beibehaltung der historischen Baukultur

Alexander Rieser, BSc

Innsbruck, 10. Jänner 2020

Masterarbeit

eingereicht an der Leopold-Franzens- Universität Innsbruck, Fakultät für
Technische Wissenschaften zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Diese Masterarbeit ist der Vertiefungsrichtung „Energieeffiziente Gebäude“
des Masterstudiums Umweltingenieurwissenschaften zugeordnet.

Beurteiler:

Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich für Energieeffizientes Bauen

Betreuer: Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer PFLUGER
Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Fakultät für Technische Wissenschaften
Universität Innsbruck

Mitbetreuerin: Eleonora Leonardi, MEng
Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Fakultät für Technische Wissenschaften
Universität Innsbruck

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein Dank meinen Betreuern Herrn Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger und Frau Eleonora Leonardi MEng für die großartige Unterstützung und Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herr Arch. DI Hans Peter Gruber für die zahlreichen Unterlagen und die interessanten Diskussionen bedanken.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Freundin Sheila, welche mich in den letzten fünf Jahren immer wieder motiviert hat und zu jeder Zeit hinter mir stand.

Ich möchte mich auch bei meiner Familie für die tatkräftige Unterstützung während der gesamten Studienzzeit bedanken.

Alexander Rieser, BSc

Kurzfassung

Tirol – viele Urlauber verbinden dieses Land mit alpinen Landschaften, Natur und idyllischen Ortschaften mit ländlichem Kern und historischen Gebäuden. Leider müssen diese alten Gebäude in den letzten Jahren immer mehr Wohnblocks, Hotels und modernen Einfamilienhäusern weichen, wodurch das ursprüngliche Ortsbild verloren geht. Auch am Land wird durch den Tourismus und die damit einhergehende Urlauberwelle die Wohnfläche immer rarer. Durch den hohen Standard an Wohnkomfort sind diese historischen Bauten häufig in ihrem Bestand bedroht.

Eine Lösung stellt hier die Sanierung der alten Bausubstanz und dem damit verbundenen Erhalt des ursprünglichen Dorfcharakters dar. Für die einheimische Bevölkerung kann durch richtige Planung und Ausführung die Sanierung eine wirtschaftliche und qualitativ hochwertige Alternative zum Abriss und Neubau bieten. Durch den bauphysikalisch korrekten Einsatz von Innendämmung kommen Wohnkomfort und der Erhalt an Kulturerbe zum Einklang.

Gerade die unzähligen Bauernhöfe in Holzblockbauweise stellen eine immense Herausforderung an die Planung dar. In dieser Arbeit werden hierfür Lösungswege aufgezeigt. Nach der Vorstellung aller relevanten theoretischen Grundlagen werden bisherige Forschungsergebnisse zum Thema Innendämmung vorgestellt und analysiert. Um nicht nur die Theorie hinter der Fragestellung zu klären, sondern auch die praktische Umsetzung, wird ein 300 Jahre alter, auf nahezu Passivhausstandard sanierter Bauernhof im Detail untersucht und diskutiert. Mit der Software Delphin wird die Schimmelproblematik zwischen Dämmebene und Holzblockwand, mittels Variation verschiedener Einflüsse, untersucht und durch eine Messung am Bestand ergänzt. Ausgehend von dieser Analyse werden die Probleme der Variabilität der Randbedingungen und der signifikanten Unterschiede in der Wahl der Bestandsmaterialparameter aufgezeigt. Da bei solch starken Innendämmungen eine bauphysikalisch korrekte und sichere Ausführung oft nur von kleinen Faktoren abhängt, wird eine Belüftung der Dämmebene durch Luftkanäle mittels Simulation untersucht. Diese Maßnahme könnte zur Reduktion des Risikos etwaiger Feuchteschäden beitragen. Bei der Abwägung der Spaltenweiten steht dem durchaus positiven Einfluss einer leichten Belüftung ein erhöhter Druckverlust im Strömungskanal gegenüber. Die notwendigen Randbedingungen sowie weitere Forschungsansätze bilden das Ergebnis dieser Studie und stellen die Grundlage für die weitere Forschungsarbeit dar.

Mit dieser Masterarbeit soll darüber hinaus das Bewusstsein für historische Baukultur geschärft werden und gezeigt werden, dass es durchaus Möglichkeiten der Bauwerksmodernisierung gibt, ohne den ursprünglichen Dorfcharakter zu verlieren.

Alexander Rieser, BSc

Abstract

Tyrol - many vacationers associate this country with alpine landscapes, nature and tranquil villages with a rural core and historic buildings. Unfortunately, in recent years these old buildings have had to make way for more and more apartment blocks, hotels and modern detached houses, which means that the original townscape is being lost. Also in the countryside, living space is becoming increasingly scarce due to tourism and the resulting wave of tourists. Due to the high standard of living comfort these historical buildings are often threatened in their existence.

One solution is the renovation of the old building stock and the associated preservation of the original village character. For the residents, renovation can offer an economical and high-quality alternative over demolition and new construction through proper planning and execution. The correct use of interior insulation from the view point of building physics allows living comfort and the preservation of cultural heritage to be reconciled.

Especially the countless farms in wooden block construction represent an immense challenge for planning. In this thesis, possible solutions are presented. After the presentation of all relevant theoretical principles, previous research results on the topic of interior insulation are presented and analysed. To clarify not only the theory behind the question but also its practical implementation, a 300 year old farmhouse - renovated to almost Passive House standard - is examined and discussed in detail. With the software Delphin, the mould problem between the insulation level and the wooden block wall is investigated by means of variation of different influences and supplemented by a measurement on the existing building. Based on this analysis, the problems of the variability of the boundary conditions and the significant differences in the choice of stock material parameters are shown. Since with such strong interior insulation, a structurally correct and safe execution often depends only on small factors, ventilation of the insulation level through air ducts is investigated by means of simulation. This measure could help to reduce the risk of moisture damage. When weighing up the gap widths, the positive influence of light ventilation is contrasted by an increased pressure loss in the flow channel. The necessary boundary conditions, as well as further research approaches are the result of this study and form the basis for further research work.

This master thesis is also intended to raise awareness of historical building culture and to show that there are certainly possibilities for modernising buildings without losing the original village character.

Alexander Rieser, BSc

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	- 1 -
1.1	Sanierung – Warum?	- 1 -
1.2	Problemstellung bei der Sanierung historischer Holzbauten	- 2 -
1.2.1	Anforderungen an die Optik der Fassade	- 2 -
1.2.2	Problemstellung Innendämmung	- 2 -
1.2.3	Verbleibende Wärmebrücken	- 3 -
1.2.4	Luftdichtheit	- 3 -
1.2.5	Aufsteigende Feuchtigkeit	- 3 -
1.2.6	Schlagregenschutz	- 3 -
1.2.7	Platzbedarf / Belichtung	- 4 -
2	Theoretische Grundlagen	- 5 -
2.1	Bauphysikalische Grundlagen	- 5 -
2.1.1	Wärmetransport	- 5 -
2.1.2	Wärmespeicherung	- 7 -
2.1.3	Feuchtetransport	- 9 -
2.1.4	Flüssigwassertransport	- 12 -
2.1.5	Feuchtespeicherung	- 14 -
2.1.6	Schlagregenschutz	- 17 -
2.1.7	Feuchteübergangskoeffizient	- 18 -
2.1.8	Schimmelwachstum	- 19 -
2.2	Grundlagen der Innendämmung	- 21 -
2.2.1	Allgemeines	- 21 -
2.2.2	Arten von Innendämmsystemen	- 21 -
2.2.3	Dämmmaterialien	- 24 -
2.3	Rechtliche Grundlagen	- 28 -
2.3.1	Normen	- 28 -
2.3.2	WTA-Merkblätter	- 28 -
2.4	Simulationssoftware DELPHIN	- 29 -
3	Bisherige Forschungsergebnisse	- 30 -
3.1	Literaturaufbereitung	- 30 -
3.1.1	Praxishandbuch Innendämmung	- 30 -
3.1.2	Innendämmungen im Vergleich	- 33 -
3.1.3	Üllar Alev - Renovation and Energy Performance Improvement of Estonian Wooden Rural Houses	- 36 -

3.1.4	Hinterlüftung der Dämmebene.....	- 43 -
3.2	Verbleibender Forschungsbedarf.....	- 46 -
3.3	Anwendung der Erkenntnisse auf kapillaraktive Innendämmung mit großer Dämmstärke.....	- 46 -
4	Methoden.....	- 47 -
4.1	Hof „Neuhäusl“.....	- 47 -
4.1.1	Detailbetrachtungen.....	- 47 -
4.1.2	Hygrothermische Simulation.....	- 47 -
4.1.3	Messung am Bestand.....	- 50 -
4.2	Hinterlüftung mittels Luftkanälen.....	- 52 -
4.2.1	Definition der Randbedingungen.....	- 52 -
4.2.2	Hygrothermische Simulation.....	- 58 -
5	Ergebnisse.....	- 60 -
5.1	Hof „Neuhäusl“.....	- 60 -
5.1.1	Detailbetrachtungen.....	- 61 -
5.1.2	Messergebnisse.....	- 74 -
5.1.3	Ausblick.....	- 76 -
5.2	Hinterlüftung mittels Luftkanälen.....	- 77 -
5.2.1	Ergebnisse.....	- 77 -
5.2.2	Ausblick.....	- 79 -
6	Zusammenfassung.....	- 81 -
7	Literaturverzeichnis.....	- 83 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Auskühlkurve nach (Zürcher und Frank, 2018, S.156)	- 8 -
Abbildung 2:	Dämpfung der Temperaturschwankungen zwischen innen und außen (Zürcher und Frank, 2018, S.53).....	- 9 -
Abbildung 3:	Wasserdampfpartialdruckdifferenz anhand zweier unterschiedlicher Klima A und B (Fachverband Innendämmung, 2016, S.48).....	- 11 -
Abbildung 4:	Diffusionsrichtungen abhängig von den Randbedingungen der relativen Feuchte und des Wasserdampfpartialdruckes (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.43).....	- 12 -
Abbildung 5:	Feuchtequellen bei Außenwänden: Wasserdampfdiffusion, Wasserdampfkonvektion, Oberflächenkonvektion, Kapillarleitung, Herstellungs- und Anfangsfeuchte (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.34).....	- 14 -
Abbildung 6:	Sorptionstadien (Zürcher und Frank, 2018, S.77)	- 15 -
Abbildung 7:	Sorptionstherme eines fiktiven Materials (Zürcher und Frank, 2018, S.77).....	- 16 -
Abbildung 8:	Wassergehalt der ersten Zentimeterschicht auf der kalten Seite bei unterschiedlicher Dämmstärke (Fachverband Innendämmung, 2016, S.127)	- 31 -
Abbildung 9:	Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Dämmstärke, Temperaturverlauf im Bauteil bei 6 und 12 cm Dämmung	- 31 -
Abbildung 10:	Messergebnisse Langzeitmessung Benediktbeuern (Krus, 2019).....	- 34 -
Abbildung 11:	Simulationsergebnisse bei 37 % relativer Luftfeuchte im Innenraum (Feist und Passivhaus Institut Überarbeitung, 2005, S.77).....	- 35 -
Abbildung 12:	Simulationsergebnisse bei 50 % relativer Luftfeuchte im Innenraum (Feist und Passivhaus Institut Überarbeitung, 2005, S.78).....	- 35 -
Abbildung 13:	Schadensquellen einer Außenwand nach (Alev, 2017, S.35).....	- 37 -
Abbildung 14:	Mould growth Index auf der Innenseite der Holzwand, abhängig von der Anfangsfeuchtigkeit der Blockholzwände (Alev, 2017, S.58).....	- 41 -
Abbildung 15:	Variation der Dampfbremsen (Alev, 2017, S.59).....	- 42 -
Abbildung 16:	Variation der Außenwanddicke (Alev, 2017, S.60).....	- 42 -
Abbildung 17:	Variation der Dämmstärke (Alev, 2017, S.60).....	- 42 -
Abbildung 18:	Variation der Feuchtelasten (Alev, 2017, S.60).....	- 43 -
Abbildung 19:	Schema der Lüftung, horizontaler Schnitt (links), vertikaler Schnitt (rechts) nach (Ojanen, 2007, S.7)	- 44 -
Abbildung 20:	berechnete Luftwechselraten laut (Ojanen, 2007) unter Variation von Holzblockwanddicke, s_d -Wert und U-Wert der Wand (Ojanen, 2007, S.8)	- 45 -

Abbildung 21: Kräftebeziehungen für eine schematische Darstellung der Regengeschwindigkeit (Häupl, 2008, S.37 ff.)	- 48 -
Abbildung 22: graphische Darstellung von Schlagregenwinkel und Windgeschwindigkeit nach (Häupl, 2008, S.37 ff.)	- 49 -
Abbildung 23: Winkel des Schlagregens in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit	- 49 -
Abbildung 24: Messaufbau Holzfeuchte	- 51 -
Abbildung 25: Fertig installierte Holzfeuchtemessung. Links oben ist das Probeloch zu erkennen. Dieses wird anschließend mit einem Holzdübel verschlossen	- 51 -
Abbildung 26: Screenshot vom Wandaufbau und der Diskretisierung des simulierten Wandabschnittes. An den roten Punkten wird der Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchte aufgezeichnet. (Luftkanal, ¼ Kammer, ½ Kammer).....	- 52 -
Abbildung 27: Leistungsströme im Wandaufbau mit Luftkanal.....	- 54 -
Abbildung 28: Energiebilanz im Knotenpunkt des Kanals	- 54 -
Abbildung 29: Temperaturverlauf im Bereich des Luftkanals bei einer Innentemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von 0°C	- 57 -
Abbildung 30: Zusammenstellung des Wärmeübergangskoeffizienten im Luftkanal.....	- 58 -
Abbildung 31: Verlauf des Volumenstromes als Sinusfunktion halbjährlich	- 59 -
Abbildung 32: Südostansicht Hof „Neuhäusl“ (Foto: Schreyer David)	- 60 -
Abbildung 33: Alte Tragstruktur im hinteren Bereich (Foto: Schreyer David)	- 61 -
Abbildung 34: Mould growth Index in Abhängigkeit von der Oberflächenempfindlichkeit, rot „hoch sensibel“, schwarz „sensibel“	- 63 -
Abbildung 35: Holzfeuchte auf der Innenseite der Holzblockwand, unter Berücksichtigung von verschiedenen Klimarandbedingungen	- 64 -
Abbildung 36: Mould growth Index V1 – V5.....	- 64 -
Abbildung 37: Mould growth Index V6 – V9.....	- 65 -
Abbildung 38: Temperaturverlauf zwischen Außenwand und Dämmung	- 66 -
Abbildung 39: Mould growth Index V10 – V12.....	- 66 -
Abbildung 40: Sockeldetail Hof Neuhäusl nach DI Hans Peter Gruber	- 68 -
Abbildung 41: Montage der Unterkonstruktion welche im Sockelbereich aus Purenit ausgeführt wurde (Foto: DI Hans Peter Gruber)	- 69 -
Abbildung 42: Mould growth Index am Betonsockel sowie am Auflager der Holzwand unter Variation der Oberflächenempfindlichkeit	- 70 -
Abbildung 43: Prinzipdetail für den Anschluss der Innenwand zur Außenwand.....	- 71 -
Abbildung 44: Ständerwerk der Innenwände, die luftdichte Ebene (OSB-Platte) bleibt durchgehend erhalten (Foto: DI Hans Peter Gruber)	- 72 -
Abbildung 45: Vertikalschnitt durch das Fenster beim Hof „Neuhäusl“ nach DI Hans Peter Gruber.....	- 73 -

Abbildung 46: Kritischer Bereich bei Schrottvorköpfen an der Westfassade durch kapillare Wasseraufnahme.....	- 74 -
Abbildung 47: Feuchteverlauf der benachbarten Wand durch den kapillaren Feuchteeintrag über die „Schrottvorköpfe“	- 75 -
Abbildung 48: Verlauf der Materialfeuchten (massebezogen) zu unterschiedlichen Simulationszeitpunkten	- 77 -
Abbildung 49: Holzfeuchte (Minimum, Maximum) der Vergleichswand V11, sowie mit Lüftungskanal als konstanter Volumenstrom bzw. als Sinusfunktion mittig zwischen den Kanälen und in den Viertelpunkten.....	- 78 -
Abbildung 50: Mould growth Index bei der Vergleichsvariante 11 sowie unter Berücksichtigung eines Lüftungskanales mit konstantem bzw. sinusförmigem Volumenstrom	- 79 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einteilung von Baustoffen aufgrund ihrer Wasseraufnahmefähigkeit (Zürcher und Frank, 2018, S. 81).....	- 13 -
Tabelle 2:	Mould growth Index – Einteilung (Ojanen und Viitanen 2016, S.6).....	- 20 -
Tabelle 3:	Vor-, und Nachteile eines diffusionsdichten Innendämmsystems (Fachverband Innendämmung, 2016, S.120ff.).....	- 22 -
Tabelle 4:	Vor-, und Nachteile eines diffusionsbremsenden Systems (Fachverband Innendämmung, 2016, S.122ff.).....	- 23 -
Tabelle 5:	Vor-, und Nachteil von diffusionsoffenen Innendämmsystemen (Fachverband Innendämmung, 2016, S.129).....	- 24 -
Tabelle 6:	Materialauswahl der Innendämmung (Krus, 2019).....	- 33 -
Tabelle 7:	Variierte Parameter im Simulationsmodell (Alev, 2017, S.31).....	- 38 -
Tabelle 8:	(8a) Variation von Feuchteüberschuss und Innenraumtemperatur, (8b) Variation der Innendämmstärke und der Dicke der Holzaußenwand (Alev, 2017, S.56).....	- 38 -
Tabelle 9:	Weitere Parametervariationen (Alev, 2017, S.56).....	- 39 -
Tabelle 10:	Mould growth Index zwischen Innenoberfläche der Holzwand und der Dämmebene bei einem Feuchteüberschuss von $\Delta v_i = 3 \text{ g/m}^3$ (Alev, 2017, S.57).....	- 39 -
Tabelle 11:	Materialeigenschaften der für die Simulation benutzten Baustoffe nach (Alev, 2017, S.29).....	- 40 -
Tabelle 12:	Übergangskoeffizienten h und β für die Simulationen am Hof Neuhäusl.....	- 50 -
Tabelle 13:	kombinierte Wärmeübergangskoeffizienten h und β für die Simulationen der Hinterlüftung, bzw. Koeffizientenanteile h_c , h_r beim Luftkanal.....	- 53 -
Tabelle 14:	Wandaufbau Hof Neuhäusl.....	- 62 -
Tabelle 15:	Materialeigenschaften der simulierten Aufbauten. Die kursiv geschriebenen Materialien werden in der V9, V11 und V12 verwendet.....	- 62 -
Tabelle 16:	Variantenzusammenstellungen für die Simulationen des Wandaufbaus beim Hof „Neuhäusl“.....	- 63 -
Tabelle 17:	verwendete Materialparameter für die Simulation des Sockeldetails.....	- 70 -

Nomenklatur (Formelzeichen)

HWB	[kWh·(m ² a) ⁻¹]	spezifischer Heizwärmebedarf
Q	[J]	Wärme
Φ	[W]	Wärmestrom
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
R	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand
R _{tot}	[m ² K/W]	Gesamtwärmewiderstand
R	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand
R _{si}	[m ² K/W]	Wärmeübergangswiderstand Innen
R _{se}	[m ² K/W]	Wärmeübergangswiderstand Außen
U	[W/(m ² K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
ρ _j	[kg/m ³]	Rohdichte der Schicht j
c _i	[kJ/(kg K)]	spezifische Wärmekapazität der Schicht j
C _{wirk}	[kJ/K]	wirksame Wärmekapazität
H	[W/K]	spezifische Wärmeverluste
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
S _d	[m]	diffusionsäquivalente Luftschichtdicke
ϑ	[kg/m ³]	absolute Luftfeuchtigkeit / Wasserdampfkonzentration
φ	[%]	relative Luftfeuchtigkeit
p _{sat}	[Pa]	Sättigungsdampfdruck
p _v	[Pa]	Partialdampfdruck
Δp _v	[Pa]	Wasserdampfpartialdruckdifferenz
W	[kg/m ²]	flächenbezogene Wassermenge
w	[kg/m ² h ^{0,5}]	Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m ² h ^{0,5}
u _m	[Gew.-%]	massebezogener Feuchtegehalt in
u _v	[Vol.-%]	volumenbezogener Feuchtegehalt in
w _f	[-]	freier Wassergehalt
w _{max}	[-]	maximaler Feuchtegehalt
β	[mg/(m ² hPa)]	Feuchteübergangskoeffizient
R _v	[J/(kg·K)]	spez. Gaskonstante Wasserdampf

\bar{T}	[K]	mittlere Temperatur in der Übergangsschicht
h_c	[W/(m ² K)]	konvektiver Anteil Wärmeübergangskoeffizient
h_r	[W/(m ² K)]	Strahlungsanteil Wärmeübergangskoeffizient
$f_{R_{si}}$	[-]	Temperaturfaktor
$\Delta p(z')$	[Pa]	Druckdifferenz infolge Kamineffekt
p_m	[Pa]	Atmosphärendruck
R_a	[J/(kgK)]	spez. Gaskonstante, trockene Luft
g	[m·s ⁻²]	Erdbeschleunigung
Δt_{log}	[K]	logarithmische Temperaturdifferenz
Δp	[Pa]	Druckdifferenz infolge Reibungsverluste
f	[-]	Reibungszahl
d_{hyd}	[m]	hydraulischer Durchmesser
ρ	[kg/m ³]	Dichte
v	[m/s]	mittlere Luftgeschwindigkeit im Kanal
Re	[-]	Reynold - Zahl
Nu	[-]	Nusselt - Zahl
ν	[10 ⁻⁷ m ² ·s ⁻¹]	kinematische Viskosität
q_{12}	[W/m ²]	spez. Strahlungsleistung
$\epsilon_{1,2}$	[-]	Emissionsgrad
σ	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan- Boltzmann- Konstante: 5,67·10 ⁻⁸

1 Einleitung

Die eigenen vier Wände sind schon seit jeher ein wesentliches Thema, welches zum menschlichen Dasein dazugehört. Ob die Höhlen in der Steinzeit, die prunkvollen Paläste und Gebäude der Antike, die einfachen Hütten der Bergbevölkerung oder die Wohnungsbauten wie wir sie heute kennen – jeder benötigt ein Dach über dem Kopf.

Mit der raschen Zunahme der Bevölkerung wird dies immer schwieriger. Speziell in den Städten herrscht schon seit Jahrzehnten Platzmangel. Doch nicht nur dort, sondern auch in den ländlichen Gebieten explodieren die Grundstückspreise. Speziell in den touristischen Regionen von Tirol ist es nicht mehr selbstverständlich, einen Grund zu erwerben und diesen zu bebauen.

Das neue Schlagwort heißt Nachverdichtung! Die Nutzung der alten Bausubstanzen wird immer wichtiger. Nicht nur aus platztechnischen Gründen, sondern auch um das Kulturerbe der Region zu bewahren. In Zeiten des Klimawandels und der hohen Komfortanforderungen werden diese Altbauten jedoch ihren Anforderungen nicht mehr gerecht. Eine Sanierung bzw. ein Umbau bestehender Gebäude ist unabdinglich.

In der Architektur ist das Zusammenspiel von Alt und Neu schon lange ein Trend. Die alten Strukturen werden herausgearbeitet und in Szene gesetzt. Aus energetischer Sicht ist dies jedoch nicht immer einfach. Speziell wenn historische oder denkmalgeschützte Fassaden erhalten werden sollen, ist es eine große Herausforderung, Optik und energetische Notwendigkeiten unter einen Hut zu bringen. Durch das Verlangen der Touristen nach authentischem Urlaubserlebnissen mit alpinem Flair werden gerade in Tirol alte Bausubstanzen, wie beispielsweise Bauernhäuser und alte Heustadel, immer interessanter. Auch für die einheimische Bevölkerung müssen die Bewahrung des ursprünglichen Ortsbildes und der Erhalt des Kulturerbes in den Vordergrund rücken.

Aus diesem Grund wird mit dieser Arbeit das Thema der Sanierung aufgegriffen und speziell für die alten Bauernhöfe in Holzblockbauweise untersucht. Es werden unterschiedliche Lösungsansätze für qualitative Sanierungen mit Innendämmung analysiert.

1.1 Sanierung – Warum?

Gerade in der heutigen Zeit, in der der Klimawandel allgegenwärtig ist, kann und darf es nicht mehr möglich sein, in einem Gebäude mit einem Heizwärmebedarf von 150 kWh/(m²a) zu wohnen. Um einen derart hohen HWB zu veranschaulichen, würde ein solcher HWB bei einem normalen Einfamilienhaus mit 150 m² Wohnnutzfläche einen jährlichen Ölverbrauch von etwa 2250 Litern für die Beheizung des Gebäudes ergeben. Wenn man bedenkt, dass der Heizwärmebedarf von Passivhäusern nur 10% und weniger des unsanierten Objekts beträgt, muss eine Sanierung die Konsequenz sein. Wird diese richtig ausgeführt, gehören darüber hinaus Zugerscheinungen und Unbehaglichkeit in den Innenräumen der Vergangenheit an. Grund dafür ist eine luftdichte Gebäudehülle und das Herabsenken der Oberflächentemperaturen der Außenwände durch die zusätzlich aufgebrachte

Dämmschicht. Des Weiteren werden unangenehme Gerüche, abgestandene Luft und das lästige Fensterlüften bei Verwendung einer Komfortlüftung beseitigt.

Somit liegen die Vorteile einer Sanierung recht schnell auf dem Tisch. Dem gegenüber stehen natürlich die Investitionskosten für die Sanierung. Führt man eine dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnung durch, wird man schnell erkennen, dass sich eine Sanierung auch aus finanzieller Sicht in den meisten Fällen rentiert.

1.2 Problemstellung bei der Sanierung historischer Holzbauten

Eine Sanierung von historischen Bausubstanzen birgt immer ein gewisses Risiko. Solch eine Sanierung muss genauestens geplant und auch richtig durchgeführt werden, um eine Verbesserung des Urzustandes zu erreichen. Bei Planungsfehlern beziehungsweise schlechter Qualität der Ausführung kann es nicht nur zu keiner Verbesserung, sondern sogar zu schwerwiegenden Problemen wie Schimmelbildung oder Zerstörung der Bausubstanz kommen. Aus diesem Grund werden in den folgenden Unterpunkten die Herausforderungen bei der Sanierung historischer Holzbauten aufgezeigt.

1.2.1 Anforderungen an die Optik der Fassade

Bei der Sanierung von alten Holzblockhäusern oder ganzen Höfen zeigt sich der Trend zum Erhalten und Betonen der alten Strukturen. Herr Johann Rathmanner beschreibt dies in seinem Buch genau richtig, indem er ein wachsendes Bewusstsein der Menschen für den Wert, Atmosphäre und Charme von historischen Häusern erkennt (Rathmanner, 2011, S.13). Aus diesem Grund ist es eigentlich undenkbar, das in die Jahre gekommene, von der Sonne braun verbrannte Holz unter einer neuen Fassade zu begraben. Damit ergibt sich ein grundlegendes Problem: Wenn die Fassade im Außenbereich aus optischen Gründen erhalten bleiben muss, kann aus energetischer Sicht nur eine Innendämmung in Betracht gezogen werden.

1.2.2 Problemstellung Innendämmung

Jeder Fachliteratur, welche sich mit dem Thema der Sanierung beschäftigt, kann eine Grundaussage entnommen werden: Eine Außendämmung ist immer einer Innendämmung vorzuziehen. Ist aus gestalterischen Gründen oder durch Auflagen des Denkmalschutzes eine Außendämmung nicht möglich, muss die Ausführung der Innendämmung sehr sorgfältig erfolgen. Eine unsachgemäß angebrachte Innendämmung kann zu erheblichen Feuchteschäden in der Wandkonstruktion führen (Gänßmantel und Geburting, 2008, S.57).

Durch die Innendämmung wird die alte Holzstruktur nicht mehr von innen „beheizt“. Dies führt zu einer niedrigeren Temperatur in der Holzaußenwand beziehungsweise im gemauerten Sockelbereich. Bei wasserführenden Leitungen in der Tragkonstruktion besteht hier Frostgefahr. Gelangt durch eine Lücke in der luftdichten Ebene beziehungsweise durch eine falsch ausgewählte Innendämmung feuchte, warme Luft auf die kalten Bauteile, kommt es in den Wintermonaten zu Tauwasser innerhalb der Konstruktion. Im schlimmsten Fall trocknet das Tauwasser während der Sommermonate nicht vollständig aus und führt zu Schimmelbefall (Dold und Erber, 2012, S.5).

1.2.3 Verbleibende Wärmebrücken

Ein weiterer Nachteil der Innendämmung sind die verbleibenden Wärmebrücken im Gebäude. Die einbindenden Wände und Decken können in den meisten Fällen nicht wärmebrückenfrei angeschlossen werden. Zudem sind die Wärmebrücken bei einer Innendämmung im Gegensatz zu den Wärmebrücken bei einer Außendämmung bauphysikalisch problematisch. Bei einer Außendämmung sind die Wärmebrücken sehr fehlertolerant und führen im schlimmsten Fall „nur“ zu etwas höheren Wärmeverlusten. Im Allgemeinen wird die Oberflächeninnentemperatur immer erhöht.

Im Gegensatz dazu kann es beim Einsatz einer Innendämmung - bei Wand-, oder Deckeneinbindungen - zu geringeren Innenoberflächentemperaturen als vor der Sanierung kommen (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S. 3).

1.2.4 Luftdichtheit

Gerade bei einer Innendämmung ist je nach gewähltem System die Luftdichtheit von besonders hoher Bedeutung. Kann die warme, feuchte Innenluft ungehindert in die Konstruktion einströmen, ist ein Bauschaden unvermeidbar. Bei alten Holzbauten, welche in der Regel Holztramdecken und Massivholzzinnenwände besitzen, können die luftdichte Bauweise beziehungsweise die Anschlüsse dieser Innenkonstruktion den Knackpunkt der gesamten Sanierung darstellen. Für eine gelungene Sanierung sind die genaue Betrachtung und Ausarbeitung von sämtlichen Anschlussdetails unabdingbar.

1.2.5 Aufsteigende Feuchtigkeit

Betrachtet man ein altes Bauernhaus aus Holz, wird schnell klar, warum einige Häuser die letzten Jahrzehnte nahezu schadenfrei überstanden und andere bereits nach einiger Zeit baufällig geworden sind. Der treibende Faktor ist die Feuchtigkeit in der Konstruktion. Diese kann von innen durch Diffusion und Konvektion, von außen durch Regen und auch vom Boden durch die aufsteigende Feuchtigkeit in den Wand- und Bodenaufbau gelangen. Da die meisten Holzhäuser im Sockelbereich durch eine zirka 1,0 m hohe Steinmauer von der Bodenfeuchtigkeit entkoppelt sind, ist das Holz in den meisten Fällen geschützt. Durch die Sanierung kann die durchfeuchtete Sockelmauer bei einer reinen Innendämmung durch Frostschäden in Mitleidenschaft gezogen werden. Eine Betrachtung dieser Problematik ist in jedem Fall anzuraten, um, falls notwendig, geeignete Maßnahmen in Betracht zu ziehen.

1.2.6 Schlagregenschutz

Die letzte Möglichkeit eines Feuchteintrages besteht durch die freie Bewitterung der Fassade. Da in den meisten Fällen ein Anstrich der Fassade aus optischen Gründen beziehungsweise andere Verfahren, wie Hydrophobierung, aus technischen Gründen bei einer Massivholzwand nicht möglich sind, bleibt nur der konstruktive Schutz. Bei den meisten ländlichen Gebäuden wird dies durch ein ausreichendes Vordach, sowie einen rundumlaufenden Balkon im Bereich der Wohnflächen oder durch Beschindelung der Wetterseite zum Teil erreicht.

1.2.7 Platzbedarf / Belichtung

Spricht man von thermischer Sanierung mit Innendämmung, geht dies auch immer mit einem Nutzflächenverlust einher. Der gesamte Innenraum wird zur Baustelle, da nicht nur die Wände entsprechend bearbeitet werden, sondern auch etwaige Bodenaufbauten entfernt werden müssen. Durch den dickeren Wandaufbau vergrößert sich auch die Laibungstiefe der Fenster dadurch gelangt weniger Tageslicht in den Wohnraum. Hier können Lösungen mit Laibungsabschrägungen Abhilfe schaffen.

Im Gegensatz zur Laibungsabschrägung außen bewirkt die Abschrägung innen kaum einen messbaren Effekt einer Anhebung des Tageslichtkoeffizienten. Dennoch bewirkt die innere Abschrägung tageslichttechnisch einen positiven visuellen Effekt, weil der Gradient von der dunklen Wand zur hellen Fensterfläche eine Abstufung erfährt. Dadurch wird der Kontrast nicht so stark und unangenehm wahrgenommen.

Wie man anhand der Punkte 1.2.1 bis 1.2.7 erkennen kann, ist die Sanierung von historischen Holzbauten weitaus komplexer als manch andere Sanierung. Feuchtigkeit in der Konstruktion ist gerade bei einem Holzbau heikel und kann ein 300 Jahre altes Gebäude in wenigen Jahren zerstören. Aus diesem Grund sind ausgeklügelte Detaillösungen, die bauphysikalisch geprüft sind, die Grundlage für jede qualitativ hochwertige Sanierung. Die große Herausforderung besteht darin, überhaupt eine funktionierende Lösung für passivhaustaugliche Wandaufbauten zu finden.

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Begriffe und Grundlagen, welche für das Verständnis der im praktischen Teil vorgestellten Erkenntnisse und Lösungsansätze notwendig sind, erläutert.

2.1 Bauphysikalische Grundlagen

Um zu verstehen, warum es bei einer Innendämmung überhaupt zu einem Schaden kommen kann, muss man sich mit ein paar Begrifflichkeiten vertraut machen. Die zwei Schlagworte in der Bauphysik sind Wärme- und Feuchtetransport. Diese zwei Mechanismen sind ausschlaggebend, ob ein Gebäude funktioniert, oder eben nicht.

2.1.1 Wärmetransport

2.1.1.1 Wärme Q [J]

Wärme ist Energie, die nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik immer vom energiereicheren Niveau (warmer Körper) zum energieärmeren Niveau (kalter Körper) fließt. Dieser Austausch kann auf drei Arten erfolgen: Wärmeströmung (Konvektion), Wärmestrahlung und die Wärmeleitung (Zürcher und Frank, 2018, S.29). Die Wärmeleitung nimmt im Zusammenhang mit der Bauwerkshülle die bedeutendste Rolle ein. Auch ein gut gedämmtes Gebäude wird ohne Heizung früher oder später im Winter auskühlen. Wie schnell die Energie durch Wärmeleitung das Haus verlässt, hängt vom Widerstand der Gebäudehülle ab.

2.1.1.2 Wärmestrom Φ [W]

Ein Maß dafür ist der Wärmestrom Φ . Er gibt an, welche Wärmemenge in einer bestimmten Zeit durch eine bestimmte Fläche hindurchtritt (Fachverband Innendämmung, 2016, S.45). Q stellt somit die Wärmemenge in Joule dar und Φ die Leistung in Watt.

2.1.1.3 Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]

Will man nun wissen, wie groß der Wärmestrom eines bestimmten Bauteils ist, muss man wissen, wie das Bauteil aufgebaut ist. Genauer gesagt, wie stark die einzelnen Schichten sind und aus welchen Materialien sie bestehen. Jedes Material besitzt eine andere Wärmeleitfähigkeit. Sie gibt an, wie viel Wärme pro Kelvin Temperaturgefälle und Meter Bauteildicke durch eine Fläche von einem Quadratmeter strömen (Fachverband Innendämmung, 2016, S.45). Der Lambdawert eines Bauteils ist kein Fixwert. Er ändert sich mit der Temperatur und dem Feuchtegehalt des Baustoffes, sowie mit der Rohdichte und Porenstruktur. Speziell bei porösen Baustoffen spielen diese Faktoren eine entscheidende Rolle. Steigt der Feuchtegehalt eines Baustoffes, so wird die Porenluft durch Wasser ersetzt und die Wärmeleitfähigkeit steigt an (Zürcher und Frank, 2018, S.30).

Um diese Veränderung der Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen wird in der ÖNORM B-6015 – 5 zwischen dem **Nennwert der Wärmeleitfähigkeit λ_d** und dem **Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ** unterschieden.

Im Allgemeinen ist der Nennwert unter normierten Bedingungen ermittelt. Der Bemessungswert entspricht der Wärmeleitfähigkeit bei typischen Nutzungsbedingungen des Baustoffes (Fachverband Innendämmung, 2016, S.45). Genauere Information bezüglich der Umrechnung findet man in der ÖNORM - B 6015-5 bzw. in der ÖNORM EN ISO 10456.

2.1.1.4 U-Wert [W/m²K]

Mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit und der Schichtdicke kann der **Wärmedurchlasswiderstand R** einer Bauteilschicht lt. (ÖNORM EN ISO 6946, S.7) wie folgt berechnet werden:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.1)$$

mit

R	Wärmedurchlasswiderstand	[m²K/W]
d	Dicke der Materialschicht	[m]
λ	Wärmeleitfähigkeit des Materials	[W/(mK)]

Der **Gesamtwärmewiderstand R_{tot}** eines ebenen Bauteils berechnet sich in weiterer Folge nach:

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{si}} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{\text{se}} \quad (2.2)$$

mit

R _{tot}	Gesamtwärmewiderstand	[m²K/W]
R _{si}	Wärmeübergangswiderstand innen	[m²K/W]
R _{se}	Wärmeübergangswiderstand außen	[m²K/W]
R _{1,2,...,n}	Wärmedurchlasswiderstände	[m²K/W]

Die **Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se}** sind kombinierte Widerstände, welche den Übergang von der Bauteiloberfläche zur angrenzenden Luftschicht beschreiben. Sie setzen sich aus Strahlung und Konvektion zusammen. Diese Werte hängen zum einen von der Fließrichtung des Wärmestromes und zum anderen von der Art der Luftberührung ab. Genaue Angaben findet man in der ÖNORM EN ISO 6946: 2018 (Zürcher und Frank, 2018, S.35).

Der **Wärmedurchgangskoeffizient U** allgemein als U-Wert bekannt stellt den Kehrwert des Gesamtwärmewiderstandes dar und ist ein weit verbreiteter Kennwert, welcher die thermische Bauteilqualität darstellt (Fachverband Innendämmung, 2016, S. 46).

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (2.3)$$

mit

U	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m²K)]
R _{tot}	Gesamtwiderstand	[m²K/W]

2.1.2 Wärmespeicherung

Um das Wärmespeicherverhalten eines Gebäudes zu beschreiben, gibt es verschiedene Ansätze. Es wird im Grunde der Vorgang der Anregung unterschieden. So unterscheidet (Zürcher und Frank, 2018, S.368) folgende Anregungen:

- **Einmalige Anregung**
- **Periodische Anregung ohne** Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se}
- **Periodische Anregung mit** Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se}

2.1.2.1 Einmalige Anregung

Um das Speicherverhalten darzustellen, kann man sich das Auskühl-, beziehungsweise Aufwärmverhalten eines Raumes oder eines ganzen Gebäudes errechnen. Hierfür benötigt man eine wirksame Wärmekapazität eines Baustoffes bzw. Bauteils. Diese **wirksame Wärmekapazität C_{wirk}** wird wie folgt berechnet.

$$C_{wirk} = \sum A_i \cdot \sum d_j \cdot \rho_j \cdot c_j \quad (2.4)$$

mit

C_{wirk}	wirksame Wärmekapazität	[kJ/K]
A_i	Fläche des Bauteils i	[m ²]
d_j	wirksame Bauteildicke der Schicht j	[m]
ρ_j	Rohdichte der Schicht j	[kg/m ³]
c_i	spezifische Wärmekapazität der Schicht j	[kJ/(kg K)]

Die wirksame Wärmekapazität wird oft auch als speicherwirksame Masse multipliziert mit der jeweiligen spezifischen Wärmekapazität ($\sum m \cdot c$) beschrieben.

In die Berechnung gehen nur die ersten 10 cm Schichtdicke auf der warmen Seite ein. Somit wird schnell klar: Gebäude mit einer Innendämmung tragen bezüglich ihrer Außenwände relativ wenig zur wirksamen Wärmekapazität bei. Bezieht man C_{wirk} auf die Nettofläche des Raumes erfolgt lt. (DIN 4108-2) eine Einteilung der Bauart nach leicht, mittel und schwer. Hierbei werden - je nach Bauart - Werte für die wirksame Wärmekapazität pro m² Raumfläche angegeben.

Dividiert man die Summe der wirksamen Wärmekapazitäten durch die Summe der spezifischen Wärmeverluste, erhält man die **Zeitkonstante τ** . Sie ist ein Maß für die Dauer von Abkühl- oder Heizvorgängen.

$$\tau = \frac{C_{wirk}}{H} \quad (2.5)$$

mit

C_{wirk}	wirksame Wärmekapazität	[kJ/K]
H	spezifische Wärmeverluste	[W/K]

(Zürcher und Frank, 2018, S.156) zeigen in der Abbildung 1 den Temperaturverlauf einer Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeitkonstante τ .

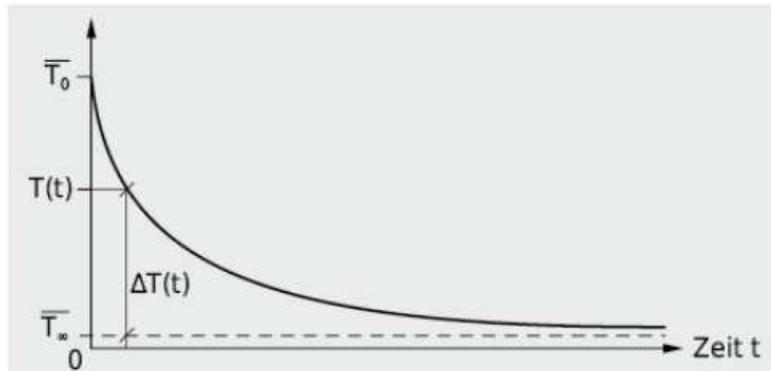


Abbildung 1: Auskühlkurve nach (Zürcher und Frank, 2018, S.156)

Die Auskühlkurve folgt einer Exponentialfunktion und wird nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta T(t) = \Delta T(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.6)$$

mit

- $\Delta T(t)$ Temperaturdifferenz zum Zeitpunkt t
- $\Delta T(0)$ Temperaturdifferenz zum Zeitpunkt 0
- τ Zeitkonstante

2.1.2.2 Periodische Anregung

Bei einer periodischen Anregung (zum Beispiel Temperaturverlauf während des Tages) spielen die Eindringtiefe und der Verlauf der Temperaturschwankungen eine wichtige Rolle. Durch die Wärmespeicherung eines Bauteiles treten Temperaturschwankungen an der Außenoberfläche gedämpft auf die Innenoberfläche auf. (Zürcher und Frank, 2018, S.53) beschreiben dies in ihrem Buch detailliert. In der Abbildung 2 ist diese Dämpfung der Amplitude veranschaulicht.

Aufgrund dieser periodischen Temperaturverläufe kann für die Wärmespeicherung nicht mehr von einer statischen wirksamen Wärmekapazität, sondern nur mehr von einer dynamischen gesprochen werden. Für die Berechnung der dynamischen effektiven Wärmespeicherfähigkeit wird in der ÖNORM EN ISO 13786 ein Verfahren vorgestellt. Dieses Verfahren berücksichtigt eine Wärmematrix, welche die benachbarten Räume im System berücksichtigt. Für die genaue Berechnung wird auf die ÖNORM EN ISO 13786 verwiesen.

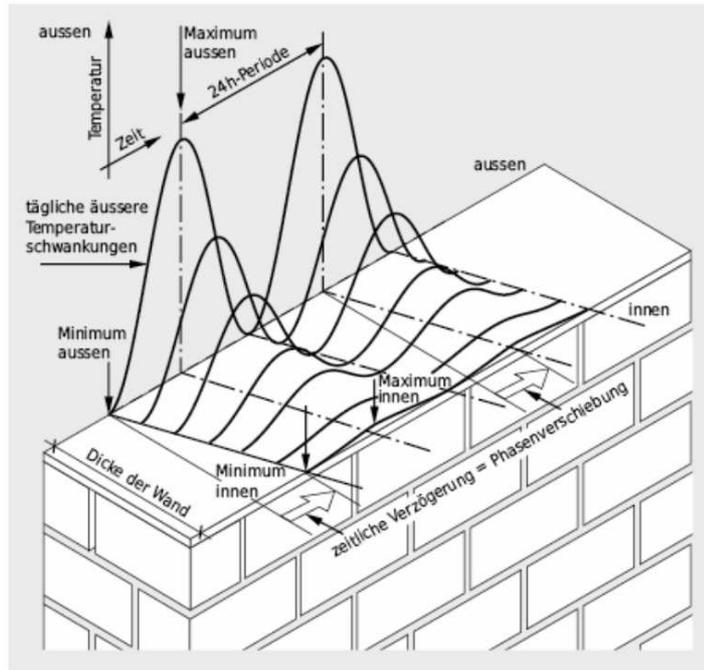


Abbildung 2: Dämpfung der Temperaturschwankungen zwischen innen und außen (Zürcher und Frank, 2018, S.53)

2.1.3 Feuchtetransport

Die Leitung von gasförmigem Wasser erfolgt grundsätzlich auf zwei Arten:

- Dampfdiffusion
- Dampfkonvektion

2.1.3.1 Wasserdampfkonzentration, Dampfdruck und Luftfeuchte

Um den Vorgang der Dampfdiffusion zu verstehen, ist es wichtig, die Begriffe „Sättigungsdampfdruck“, „Partialdampfdruck“, „relative und absolute Luftfeuchtigkeit“ beziehungsweise die Zusammenhänge dieser Begriffe mit der Temperatur zu kennen (Scheffler, 2016, S.13).

Gerade in den Sommermonaten kann man diesen Effekt beobachten. Ein eisgekühltes Getränk wird an seiner Behälteroberfläche nass. Die vorhandene Luftfeuchtigkeit kondensiert am kalten Glas. Je höher die Lufttemperatur, umso mehr Feuchtigkeit kann die Luft aufnehmen. So kann 30 °C warme Luft maximal 30,40 g Wasser pro m³ Luft aufnehmen, hingegen bei einer Temperatur von 10 °C, nur 9,41 g/m³. Trifft die warme Luft auf die kalte Glasoberfläche, kühlt sich die Luft ab und kann die Feuchtigkeit nicht mehr halten. Es kommt zur Kondensation (Zürcher und Frank, 2018, S.72).

Die maximale Wassermenge, welche in einem Kubikmeter Luft bei einer bestimmten Temperatur enthalten sein kann, wird als **absolute Luftfeuchtigkeit** ϑ bezeichnet. In diesem Zustand ist die Luft gesättigt. Ist diese Wassermenge bei einer bestimmten Temperatur nicht erreicht, spricht man von der **relativen**

Luftfeuchtigkeit ϕ , welche als prozentueller Wert der absoluten Luftfeuchtigkeit angegeben wird.

Bei gesättigter Luft stellt sich ein **Sättigungsdampfdruck p_{sat}** ein bzw. bei ungesättigter Luft ein **Partialdampfdruck p_v** . Die Dampfdrücke können mit Hilfe der Gasgleichung berechnet werden.

Die Zusammenhänge zwischen Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Dampfdruck sind recht übersichtlich im *h,x-Diagramm von Mollier* dargestellt (Zürcher und Frank, 2018, S.74).

2.1.3.2 Wasserdampfdiffusion

Bei der Wasserdampfdiffusion spricht man von einem Stofftransport von gasförmigem Wasser durch einen Feststoff. Die Geschwindigkeit mit der dieser Prozess abläuft bzw. die Menge, die transportiert wird, hängt vom zu durchdringenden Material und von der Ausprägung des Antriebspotentials ab.

Die treibende Kraft ist hierbei die **Wasserdampfpartialdruckdifferenz Δp_v** . Sie ist die Differenz der Wasserdampfpartialdrücke an den beiden Seiten des Bauteils. Die Diffusion erfolgt hierbei vom höheren Partialdruckniveau zum niedrigeren. Je größer der Unterschied der beiden Niveaus ist, desto größer ist das Antriebspotenzial. Abbildung 3 zeigt die Wasserdampfpartialdruckdifferenz anhand eines Beispiels. Punkt A stellt dabei den Innenraum mit 22°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % dar, Punkt B die Außenluft mit 80% r. Lf. bei -5°C. Die Diffusionsrichtung folgt dabei dem Partialdampfdruckgefälle von Punkt A nach B.

Neben der Druckdifferenz spielt auch das durchströmte Material für den Diffusionsfeuchtetransport eine wichtige Rolle. Jedes Material besitzt einen Diffusionswiderstand. Dieser hängt von der Bauteildicke und der sogenannten **Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ** ab. Dieser Kennwert gibt an, um wie viel höher der Diffusionswiderstand eines bestimmten Materials ist, als der Widerstand einer ruhenden Luftschicht bei identischer Temperatur (Fachverband Innendämmung, 2016, S.48).

Im Protokollband Nr. 32 des Passivhausinstitutes wird die Widerstandszahl μ wie folgt definiert: (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.40)

$$\mu = \frac{\text{Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient in Luft}}{\text{Wasserdampf-Diffusionskoeffizient in einem Stoff}}$$

So besitzt eine ruhende Luftschicht eine Widerstandszahl von $\mu = 1$, da diese als Referenzwert dient.

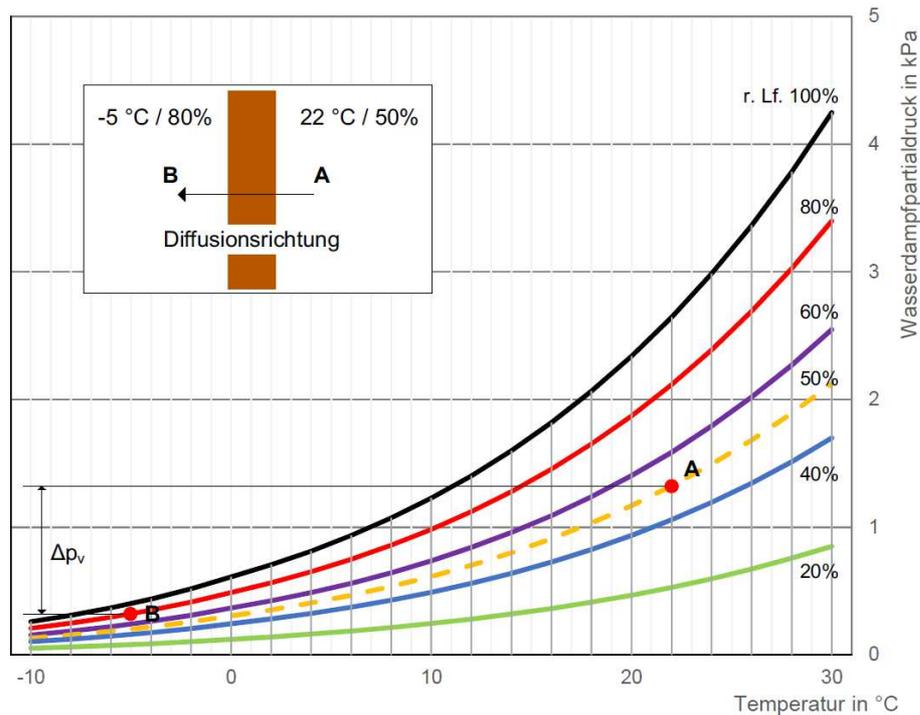


Abbildung 3: Wasserdampfpartialdruckdifferenz anhand zweier unterschiedlicher Klima A und B (Fachverband Innendämmung, 2016, S.48)

Multipliziert man den Kennwert μ mit der Bauteildicke, ergibt dies die **diffusionsäquivalente Luftschichtdicke**, auch als **s_d -Wert** bekannt. Der s_d -Wert gibt an, ob die Schichten eines Bauteils als diffusionsdicht, -hemmend oder diffusionsoffen bezeichnet werden. Die Einteilung erfolgt nach folgenden Grenzwerten: (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.42)

- $S_d \leq 0,5\text{m}$ **diffusionsoffen**
- $0,5\text{ m} < S_d < 1500\text{ m}$ **diffusionshemmend**
- $S_d \geq 1500\text{ m}$ **diffusionsdicht**

Fälschlicherweise wird oft der Ausdruck „Dampfsperre“ für Folien beim zum Beispiel Dachgeschoßausbau verwendet. Tatsächlich handelt es sich aber nur um Dampfbremsen, da richtige Dampfsperren kaum im Handel erhältlich sind (Fachverband Innendämmung, 2016, S.48).

2.1.3.3 Wasserdampfkonvektion

Bei der Wasserdampfkonvektion ist die treibende Größe eine Luftströmung. Diese kann durch Temperaturunterschiede und der damit verbundenen Luftdichtendifferenzen vom Innenraum zur Außenluft, durch Wind oder aber durch eine falsch eingestellte Wohnraumlüftung erzeugt werden.

Durch Konvektion können weitaus größere Mengen an Feuchte in das Bauteil gelangen als bei der reinen Dampfdiffusion. Aus diesem Grund ist eine luftdichte Bauwerkshülle von enormer Wichtigkeit. Die luftdichte Ebene ist raumseitig der

Dämmebene und wenn möglich auch raumseitig der Tragkonstruktion herzustellen (Fachverband Innendämmung, 2016, S.49).

Die Luftdichtheit ist durch einen sogenannten „Blower Door Test“ zu überprüfen. Beim Blower Door Test wird durch einen Ventilator eine künstlich definierte Druckdifferenz (50 Pascal) erzeugt und das Volumen der nachströmenden Luft mit dem Raumvolumen verglichen. Der Blower Door Test ist somit ein Maß für die Luftdichtheit des Gebäudes und die einzige Möglichkeit die luftdichte Ebene zu überprüfen.

2.1.4 Flüssigwassertransport

2.1.4.1 Oberflächendiffusion

Steigt die Feuchte im Bauteil an, kann sich an den Porenwänden ein Sorbatfilm bilden. Da im Außenbereich in der Regel eine höhere relative Feuchte als im Innenbereich herrscht, bildet sich der Sorbatfilm an der Außenseite dicker aus als im Innenbereich. Durch die dickere Filmschicht können sich die Moleküle freier bewegen und es findet ein Ausgleich zwischen innen und außen statt. Die Oberflächendiffusion richtet sich nach den Gradienten der relativen Feuchte aus. Deshalb kann es sein, dass die Richtung der Dampfdiffusion und die Richtung der Oberflächendiffusion entgegengesetzt sind. Die untenstehende Abbildung verdeutlicht den beschriebenen Vorgang.

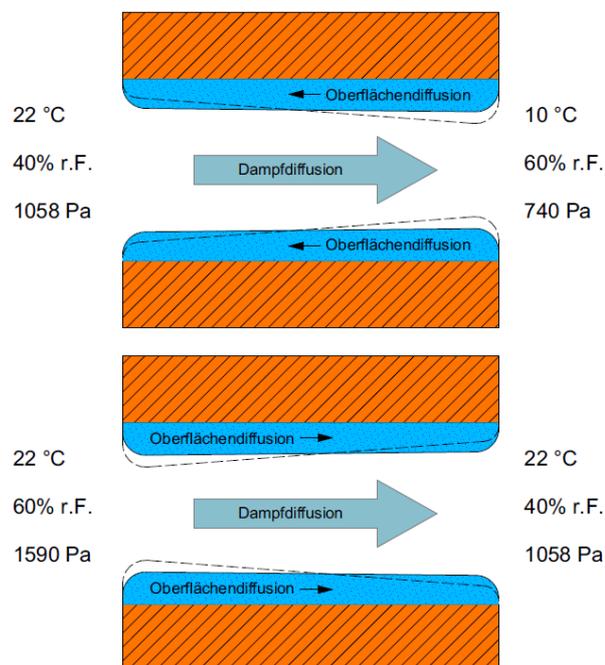


Abbildung 4: Diffusionsrichtungen abhängig von den Randbedingungen der relativen Feuchte und des Wasserdampfpartialdruckes (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.43)

Der Start der Oberflächendiffusion variiert von Baustoff zu Baustoff. So startet der Prozess bei Zellulose bereits bei 30 % relativer Feuchte, bei Sandstein erst bei 60 % relativer Feuchte (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.43).

2.1.4.2 Kapillarleitung

Die Kapillarleitung ist ein Transportmechanismus von flüssigem Wasser. Die antreibenden Kräfte sind bei Kontakt mit flüssigem Wasser die sogenannten kapillaren Saugspannungen (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.43).

Diese entstehen aufgrund der Kohäsion der Flüssigkeitsmoleküle und der Adhäsion an der Grenzfläche von Wasser und Feststoff in porösen Materialien. Die Kapillarleitung tritt hier nennenswert bei Porenradien zwischen 100 nm und 1 mm auf (Zürcher und Frank, 2018, S. 80).

Um die Wasseraufnahme von verschiedenen Baustoffen zu bestimmen, wird in der (DIN EN ISO 15148) durch einen Saugversuch der **Wasseraufnahmekoeffizient w** wie folgt ermittelt:

$$W = w \cdot \sqrt{t} \quad (2.7)$$

mit

W	flächenbezogene Wassermenge	[kg/m ²]
w	Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m ² h ^{0,5})]
t	Dauer der Wasseraufnahme	[h]

Dieser Zusammenhang stimmt für horizontale Saugversuche. Für vertikale Saugversuche gilt das \sqrt{t} - Gesetz nur beschränkt. Aufgrund des Kennwertes für die Wasseraufnahme ergibt sich eine Einteilung der Baustoffe lt. Tabelle 1:

stark saugend	$w > 2,0$	kg/(m ² h ^{0,5})
wasserhemmend	$w \leq 2,0$	kg/(m ² h ^{0,5})
wasserabweisend	$w \leq 0,5$	kg/(m ² h ^{0,5})
wasserdicht	$w \leq 0,001$	kg/(m ² h ^{0,5})

Tabelle 1: Einteilung von Baustoffen aufgrund ihrer Wasseraufnahmefähigkeit (Zürcher und Frank, 2018, S. 81)

2.1.5 Feuchtespeicherung

2.1.5.1 Feuchtegehalt der Baustoffe

In den Kapiteln 2.1.3 - 2.1.4 werden einige Mechanismen für den Feuchtigkeitstransport vorgestellt, welche einen Einfluss auf den Feuchtegehalt in einem Bauteil haben. Die untenstehende Abbildung 3 verbildlicht die Vorgänge und beinhaltet - neben den bereits beschriebenen - noch die fehlenden Feuchtequellen, welche den Feuchtegehalt von Baustoffen beeinflussen, nämlich den Feuchteeintrag durch Schlagregen und die Herstellungs- bzw. Anfangsfeuchte.

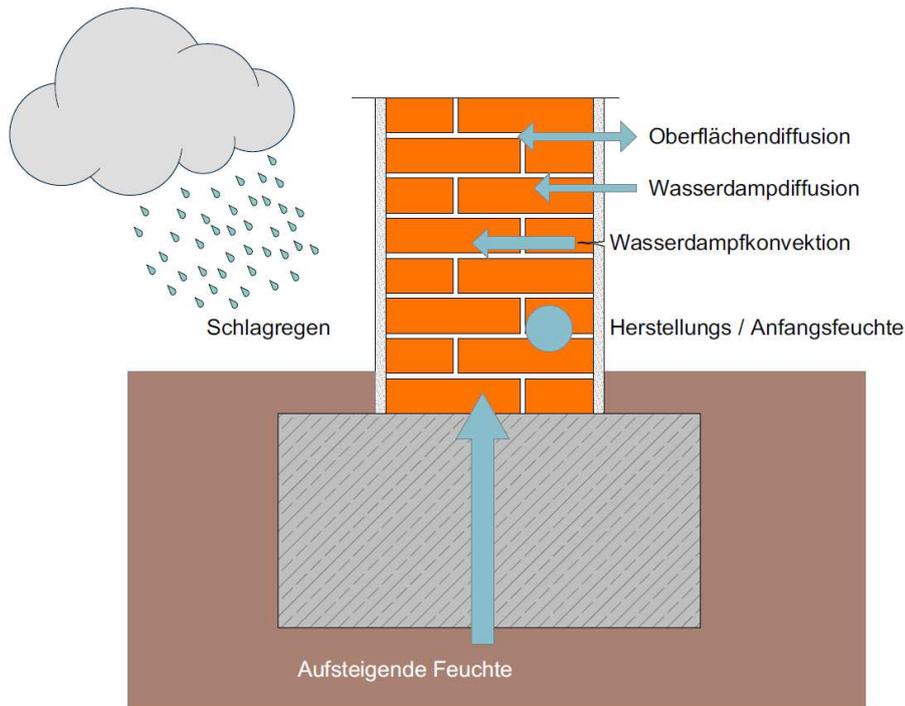


Abbildung 5: Feuchtequellen bei Außenwänden: Wasserdampfdiffusion, Wasserdampfkonvektion, Oberflächenkonvektion, Kapillarleitung, Herstellungs- und Anfangsfeuchte (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.34)

Der Feuchtegehalt von Baustoffen kann auf zwei Arten angegeben werden, nämlich **massenbezogen** (u_m [%]) oder **volumenbezogen** (u_v [%]). Die Umrechnung zwischen den zwei Werten erfolgt über die Dichte:

$$u_m = \frac{\rho_{\text{Wasser}}}{\rho_{\text{Baustoff}}} \times u_v \quad (2.8)$$

mit

ρ_{Wasser}	Dichte von Wasser in	[kg/m ³]
ρ_{Baustoff}	Dichte vom Baustoff in	[kg/m ³]
u_m	massebezogener Feuchtegehalt in	[Gew.-%]
u_v	volumenbezogener Feuchtegehalt in	[Vol.-%]

2.1.5.2 Sorption

Jeder Baustoff hat eine verschieden große Anzahl an Porenräumen. Vergleicht man das Volumen der Porenräume mit dem Volumen des Baustoffes, erhält man die Porosität. Entsprechend der Porosität können Baumaterialien - je nach Temperatur - verschieden große Mengen an Wasser aufnehmen.

Bei der Feuchteaufnahme von flüssigem oder dampfförmigem Wasser werden an den Porenoberflächen Wassermoleküle angelagert. Dieser Vorgang wird als **Sorption** bezeichnet (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.35).

Je nach Feuchte werden Sorptionsstadien unterschieden. Bei einem sehr niedrigen Feuchtegehalt ist der eigentliche Transportmechanismus die Dampfdiffusion. Die Porenwandung wird mit mehreren Wassermolekülschichten belegt. Nimmt die Feuchte weiter zu, kommt es zur Kapillarkondensation. Bei diesem Vorgang bilden sich erste Wasserinseln aus. Die Dampfdiffusion wird dadurch behindert und mit steigendem Feuchtegehalt von der Kapillarleitung abgelöst. Diese Vorgänge werden in sechs Abschnitte unterteilt. Die nachfolgende Abbildung stellt die auftretenden Transportmechanismen bei zunehmender Feuchte in einem porösen Baustoff dar.

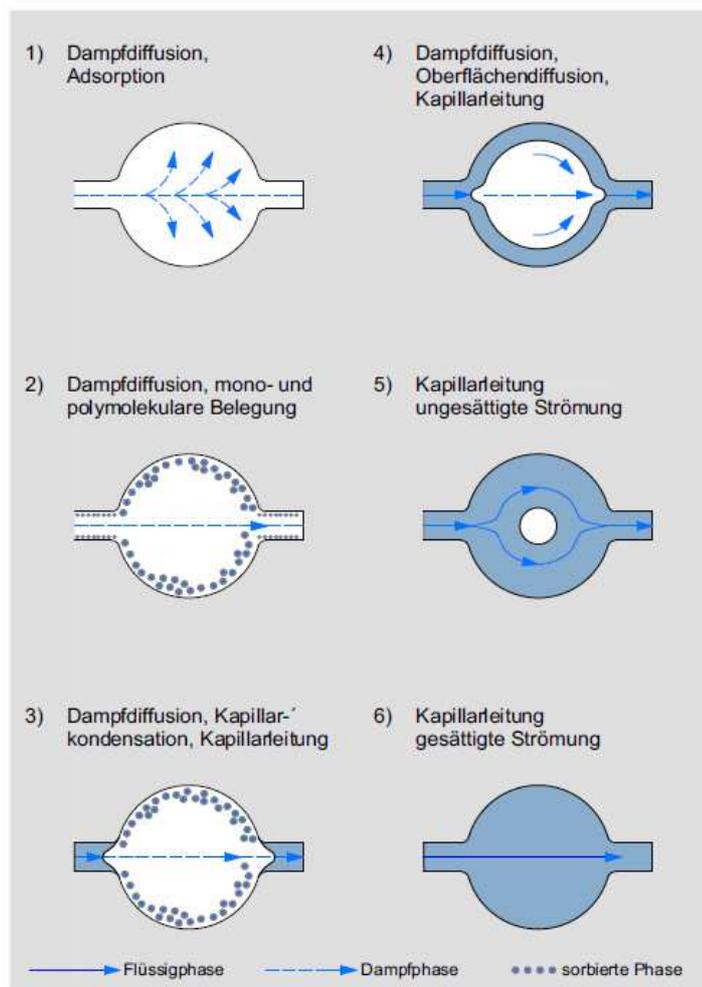


Abbildung 6: Sorptionsstadien (Zürcher und Frank, 2018, S.77)

Die maximale Wasseraufnahme durch Kapillarleitung wird als **freier Wassergehalt** w_f bezeichnet. Ein höherer Wassergehalt ist nur durch zusätzlicher Druckkräfte wie beispielsweise bei einer Unterwasserlagerung oder bei Taupunktunterschreitung möglich. Dieser Bereich wird als **Übersättigungsbereich** bezeichnet und endet beim **maximalen Feuchtegehalt** w_{max} .

2.1.5.3 Gleichgewichtsfeuchte

In der Natur strebt fast alles ein Gleichgewicht an. So ist es auch bei hygroskopischen Materialien. Auch sie streben ein Feuchtegleichgewicht an. Durch das Wasser im Baustoff entsteht ein Dampfdruck, welcher sich mit den Wasserdampfdruck der Umgebung ins Gleichgewicht bringen will. Bei gleichbleibender Temperatur und Feuchte in der Luft stellt sich eine **Gleichgewichtsfeuchte** ein. Die Gleichgewichtsfeuchte wird mit w und einem Index bezeichnet. Der Index gibt die relative Luftfeuchtigkeit im Gleichgewichtszustand an. So stellt beispielsweise w_{60} die Gleichgewichtsfeuchte bei 60 % relativer Luftfeuchtigkeit dar (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.37).

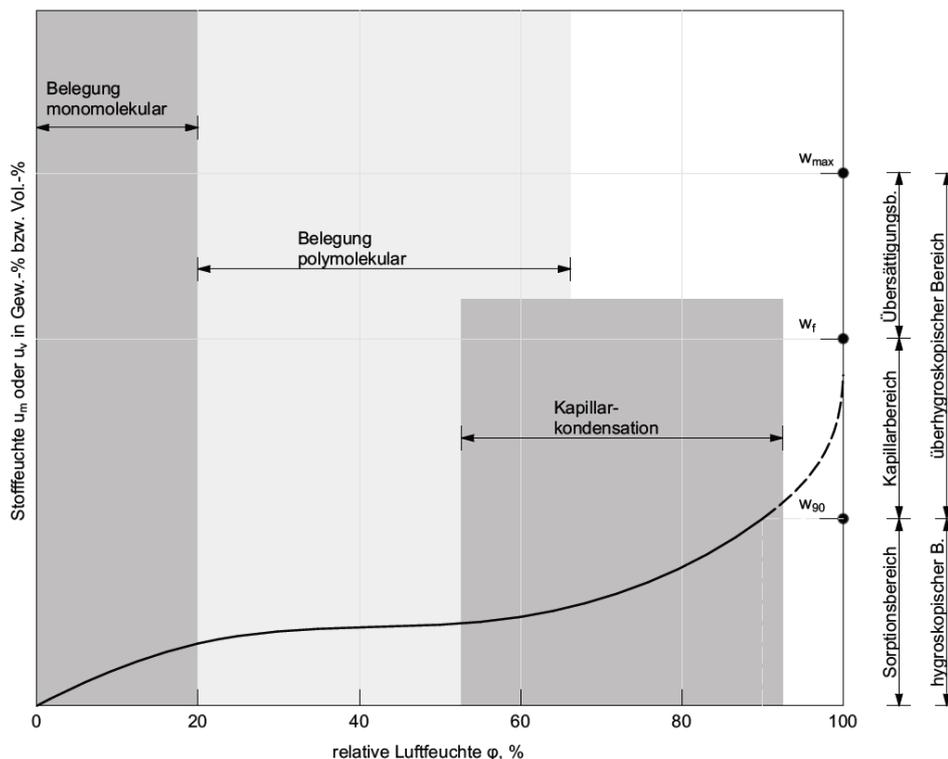


Abbildung 7: Sorptionstherme eines fiktiven Materials (Zürcher und Frank, 2018, S.77)

Variiert man experimentell die relative Luftfeuchtigkeit bei gleichbleibender Temperatur, können für unterschiedliche poröse Baustoffe sogenannte **Sorptionstherme** erstellt werden. Diese Kurven stellen sehr anschaulich die Stofffeuchte bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchtigkeit dar. Abbildung 7 verdeutlicht anhand einer Sorptionstherme eines fiktiven Baustoffes die Aussagen. Die maximale Gleichgewichtsfeuchte dieses Baustoffes liegt bei w_{90} . Bei diesem Wert endet der Sorptionsbereich oder auch hygroskopischer Bereich. Es setzt vermehrt

die Kapillarkondensation ein. Diesen Bereich nennt man den Kapillarbereich. Eine genaue Trennung ist hier jedoch nicht möglich, da die Übergänge „fließend“ sind. Zusammen mit dem Übersättigungsbereich, welcher sich vom freien Wassergehalt w_f bis zum maximalen Feuchtegehalt w_{max} erstreckt, bildet er den überhygroskopischen Bereich. Die Wasseraufnahme bzw. der Verlauf der Kurve kann hier nur mehr experimentell bestimmt werden (Zürcher und Frank, 2018, S. 77ff.).

2.1.6 Schlagregenschutz

Eine Fassade ist im Grunde mit unserer Kleidung zu vergleichen. Im besten Fall hält sie alle störenden, äußeren Einflüsse - wie Nässe, Wind und Kälte - ab. Eine dicke Daunenjacke nützt uns nicht viel, wenn sie vom Regen komplett durchnässt wird. Aus diesem Grund benötigen wir eine wasser-, und windabweisende Jacke, welche die Daunenjacke trocken hält. Bei einer Außenwand hat die äußerste Fassadenschicht genau diese Aufgabe zu erfüllen. Wasser und Wind dürfen nicht auf die Dämmebene beziehungsweise bei einer Innendämmung im Idealfall auch nicht auf die tragende Außenwand gelangen. Dies ist im Falle einer Putzfassade durch spezielle Putze und Beschichtungen sehr gut realisierbar. Ein Kennwert für den Schlagregenschutz ist hier der im Kap. 2.1.4.2 (Kapillarleitung) vorgestellte Wasseraufnahmekoeffizient.

Wie groß der Wasseraufnahmekoeffizient sein darf, hängt in erster Linie von der **Schlagregenbeanspruchbarkeit** ab. In der DIN 4108-3 gibt es spezielle Übersichtskarten mit Beanspruchungsgruppen von I – III wobei die Beanspruchungsgruppe III die höchsten Anforderungen an den Schlagregenschutz stellt. In Österreich, speziell im Gebirge, ist es schwierig, die maßgebenden Faktoren richtig einzuschätzen. Hauptindikatoren bilden die **Regenintensität [mm/h]** und die **Windgeschwindigkeit [m/s]**. Auch die gesamte Topographie (Lage, Bewuchs, Bebauung), Ausrichtung der Fassade und die Gebäudegeometrie haben einen enormen Einfluss auf die tatsächliche Schlagregenbelastung. In der (ÖNORM EN ISO 15927-3) werden zwei Verfahren vorgestellt, um die auf eine beliebig ausgerichtete Wand auftreffende Wassermenge abzuschätzen. Es wird dabei die Art der Wand, die Form und Größe des Gebäudes sowie der örtliche Windschutz und die Topographie berücksichtigt.

Neben dem Wasseraufnahmekoeffizient ist auch der s_d -Wert der Beschichtung oder des Anstriches entscheidend. Ist dieser zu groß, wird ein Austrocknen der Konstruktion in den Sommermonaten verhindert. Im Allgemeinen gilt für den Schlagregenschutz, dass die Kapillarleitung möglichst gering ist (kleiner w -Wert) und das Material möglichst diffusionsoffen ist (kleiner S_d – Wert). In der (DIN 4108-3) werden folgende Kennwerte vorgegeben:

Beanspruchungsgruppe II: **wasserhemmend:** $0,5 \leq w < 2,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Beanspruchungsgruppe III: **wasserabweisend:** $w \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$
 $S_d \leq 2,0 \text{ m}$
 $w \cdot S_d \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Die Beanspruchungsgruppen beziehen sich auf die Jahresniederschlagsmengen und auf die Windexponiertheit. Die Beanspruchungsgruppe III beinhaltet eine Jahresniederschlagsmenge von über 800 mm. Bei windreichen Lagen fallen auch kleinere Niederschlagsmengen in diese Gruppe.

Laut den Klimamitteldaten von 1981-2010 der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Andre und Chimani, 2012) erreicht man in Tirol fast überall die Jahresniederschlagsmengen von 800 mm. Somit sollten bei Sanierungen im alpinen Raum auf jeden Fall die Anforderungen der Beanspruchungsgruppe III erfüllt werden.

Wie in der Einleitung schon erwähnt, ist ein ausreichender Schlagregenschutz bei historischen Bauernhäusern aus Holz - wenn überhaupt - nur konstruktiv zu erreichen. Aus diesem Grund ist das Wissen über die genaue Schlagregenbelastung für eine Sanierung mit Innendämmung von enormer Bedeutung. Praktisch muss man jedoch zugeben, dass diese von Gebäude zu Gebäude stark variiert und nur durch eine Messung am Bestand mit Sicherheit bestimmt werden kann.

2.1.7 Feuchteübergangskoeffizient

Im Hinblick auf die Simulationen im Kapitel 5, wird in der Folge kurz auf den **Feuchteübergangskoeffizienten β** eingegangen. Wie im Kapitel 2.1.1.3 (Wärmeleitfähigkeit) erwähnt, setzt sich der Wärmeübergangskoeffizient aus einem konvektiven Anteil h_c sowie einem Strahlungsanteil h_r zusammen. Aufgrund der Ähnlichkeit zwischen Wärmeübergangskoeffizient und dem Feuchteübergang an einer Bauteiloberfläche, lässt sich β wie folgt berechnen (Zürcher und Frank, 2018, S.74):

$$\beta \approx \frac{3,5 \cdot 10^6}{(R_v \cdot \bar{T})} \cdot h_c \quad (2.9)$$

mit

β	Feuchteübergangskoeffizient	$[\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})^{-1}]$
R_v	spez. Gaskonstante Wasserdampf	461,5 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$
\bar{T}	mittlere Temperatur in der Übergangsschicht	$[\text{K}]$
h_c	konvektiver Anteil Wärmeübergangskoeffizient	$[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}]$

2.1.8 Schimmelwachstum

Ein großes Problem von Feuchte ist die damit verbundene Schimmelpilzbildung. Übersteigt an der raumseitigen Oberfläche die relative Feuchte einen kritischen Wert, kann es rasch zur Schimmelbildung kommen. Die hohen Feuchtelasten können durch eine sehr niedere Bauteiltemperatur infolge von Wärmebrücken oder aber durch sehr große nutzungsbedingte Belastungen durch das Innenraumklima entstehen (Erhorn, 1990) fasst in seinem Kurzbericht die wachstumsbeeinflussenden Faktoren sehr gut zusammen:

- **Feuchte:** Viele Hausschimmelpilze haben ihre Wachstumsgrenze bei einer relativen Feuchte von 80 – 85 %. Das Optimum liegt bei 90 - 98 % relativer Feuchte
- **pH-Wert:** Die optimalen Bedingungen liegen im etwas sauren Bereich bei pH-Werten von 4,5 – 6,5. Es gibt auch Schimmelpilzarten welche bei pH-Werten um 2 und pH-Werten um 8 wachsen.
- **Nährstoff:** als Nährstoff reichen schon die in der Luft enthaltenen Staubpartikel in den Wohnräumen aus.
- **Temperatur:** Die Mindesttemperatur für das Myzelwachstum liegt bei 0°C, die Idealtemperatur zwischen 30 und 45°C.
- **Sauerstoff:** Die Schimmelpilze stellen keine hohen Ansprüche an den Sauerstoffgehalt der Luft.
- **Licht:** Licht ist für das Wachstum nicht notwendig.
- **Zeit:** Je nach Höhe der relativen Feuchte zeigen sich zu unterschiedlichen Zeiten erste Schimmelpilzkolonien.
 $\varphi \approx 90\%$, 1-2 Wochen
 $\varphi \approx 85\%$, 2-3 Wochen
 $\varphi \approx 80\%$, 5-6 Wochen

2.1.8.1 Schimmelwachstum lt. Ö-NORM B8110-2

In der ÖNORM B 8110-2 (ÖNORM B 8110-2, S.12ff.) wird zur Vermeidung der Kondensat-, bzw. Schimmelbildung auf der inneren Bauteiloberfläche der **Temperaturfaktor** $f_{R_{si}}$ angegeben. Dieser Faktor lässt sich wie folgt berechnen:

$$f_{R_{si}} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.10)$$

mit

θ_{si}	Temperatur an der Innenoberfläche	[K]
θ_e	außenseitige Lufttemperatur	[K]
θ_i	innenseitige Lufttemperatur	[K]

Dieser Temperaturfaktor wird mit dem Bemessungstemperaturfaktor $f_{R_{si}, \min}$ verglichen. In der ÖNORM sind in den Bildern 2 bis 4 die minimalen Werte für den Bemessungstemperaturfaktor mit Abhängigkeiten von Außentemperatur und relativer Luftfeuchte zur Vermeidung von Kondensat bzw. Schimmel angegeben.

2.1.8.2 Andere Schimmelpilzkennwerte

Neben den Parametern, die oben genannt wurden, gibt es noch weitere Kennwerte und Richtwerte um die Gefahr von Schimmelpilzwachstum abzuschätzen. In der Lebensmittelbranche ist die **Wasseraktivität**, kurz **aw-Wert**, weit verbreitet. Bei der Wasseraktivität wird die Gleichgewichtsfeuchte eines abgeschlossenen Raumes gemessen. Der aw-Wert liefert somit eine Aussage über das im Feststoff enthaltene freie Wasser. Die Werte liegen zwischen 0 und 1, wobei bei einem Wert unter 0,7 die Wachstumsmöglichkeiten für relevante Pilzspore ausgeschlossen werden kann (Feist und Passivhaus Institut, 2005, S.39).

Im Hinblick auf die im Kapitel 3 vorgestellten, bisherigen Forschungsergebnisse wird an dieser Stelle noch auf den **Mould growth Index** näher eingegangen. Bei diesem Index handelt es sich um eine Berechnung, welche das Wachstumspotential von Schimmelpilzen klassifiziert (Ojanen und Viitanen, 2016).

Als Kriterien für die Berechnung liegen die relative Feuchtigkeit, Temperatur, Zeit und das Oberflächenmaterial zu Grunde. Das numerische Ergebnis wird in Indexstufen von 0-6 eingeteilt.

Index	Beschreibung der Wachstumsrate
0	kein Wachstum
1	Minimale Mengen von Schimmel an der Oberfläche (Mikroskop), beginnendes lokales Wachstum
2	mehrere lokale Schimmelkolonien an der Oberfläche (Mikroskop)
3	mit dem freien Auge erkennbare Schimmelbildung < 10 % der Oberfläche bedeckt, oder mit Mikroskop < 50% der Oberfläche
4	mit dem freien Auge erkennbare Schimmelbildung 10-50 % der Oberfläche bedeckt, oder mit Mikroskop > 50% der Oberfläche
5	mit dem freien Auge erkennbare Schimmelbildung von > 50 % der Oberfläche
6	Starkes und dichtes Wachstum, nahezu die gesamte Fläche ist bedeckt

Tabelle 2: Mould growth Index – Einteilung (Ojanen und Viitanen 2016, S.6)

Eine weitere Art, Schimmelwachstum festzustellen ist, die Emissionsraten von **MVOC** (Microbially Volatile Organic Compound) in der Raumluft zu ermitteln. MVOC sind mikrobielle, flüchtige, organische Verbindungen, die unter anderem durch Schimmelpilze entstehen. Durch die Messung hat man den großen Vorteil, einen zerstörungsfreien Schimmelpilznachweis im Gebäude bzw. Raum zu führen.

Beim (AGÖF-Fachkongress, 2004) konnte jedoch nachgewiesen werden, dass die Konzentration der in der Luft enthaltenen MVOC nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit einem Schimmelbefall stehen. Vielmehr wurden hohe MVOC-Werte mit beispielsweise einer Raucherwohnung, Einrichtung und Luftfeuchtigkeit in Zusammenhang gebracht.

2.2 Grundlagen der Innendämmung

2.2.1 Allgemeines

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, führt eine Innendämmung zu mehreren Problemen. Zum einen gibt es die Problematik mit der Feuchte zwischen tragender Außenwand und Dämmebene, zum anderen wird auch die Wärmespeicherung negativ beeinflusst. Wie im Kapitel 2.1.2 (Wärmespeicherung) beschrieben, hängt die Wärmespeicherung von der effektiven Wärmekapazität ab. Bei einer Innendämmung ist die speicherwirksame Masse um ein vielfaches kleiner als bei einer Außendämmung. Der beheizte Raum ist im Winter sehr schnell aufgeheizt, kann im Sommer aber schneller überhitzen. Diesem Effekt kann man mit einem richtigen Lüftungsverhalten – Stichwort „Nachtlüftung“ entgegenwirken.

2.2.2 Arten von Innendämmsystemen

Die Feuchteproblematik kann im Grunde durch drei Arten von Innendämmsystemen gelöst werden:

- **Diffusionsdichte Systeme:** Der Dampfdiffusionsstrom wird nahezu komplett unterbunden,
- **Diffusionsbremsende Systeme:** Der Dampfdiffusionsstrom wird an der Innenseite der Dämmung gebremst.
- **Diffusionsoffene Systeme** (Kapillaraktiv): Der Diffusionsstrom wird kaum gebremst und durch die Kapillaraktivität wieder zurück transportiert.

Bei allen Systemen muss die luftdichte Ebene lückenfrei ausgeführt werden. Diese kann mit der diffusionsdichten beziehungsweise bremsenden Ebene zusammenfallen. Sie ist von ihrer Wirkungsweise her zu unterscheiden und muss in jedem Fall den konvektiven Feuchteintrag verhindern.

2.2.2.1 Diffusionsdichte Systeme

Wenn man von Dampfsperren spricht, darf man nicht sofort auf ein diffusionsdichtes System schließen. Ab einem $S_d > 130 \text{ m}$ wird von Dampfsperren gesprochen (Zürcher und Frank, 2018, S. 92). Eine kondensatverhindernde bzw. diffusionsdichte Konstruktion weist einen $S_d > 1500 \text{ m}$ auf. Diesen hohen Wert erreichen beispielsweise Alukaschierungen auf Dämmmaterialien oder in sich diffusionsdichte Materialien wie Glasschaum.

Der große Vorteil liegt auf der Hand: Es dringt keine Feuchtigkeit in die Konstruktion ein und es kann somit auch kein Kondensat zwischen Dämmebene und tragender Außenwand entstehen. Bei der Wahl der Oberflächenmaterialien ist durch die dampfdichte Unterkonstruktion keine Einschränkung gegeben. Der Wehrmutstropfen dieser Konstruktion ist die hohe Fehleranfälligkeit. Schon sehr kleine Lücken in der dampfdichten Ebene führen zu einem unweigerlichen Schaden. Aus diesem Grund ist dieses System in der Praxis sehr schwierig auszuführen. Ein weiterer Nachteil ist das Austrocknungsverhalten während der Sommermonate. Durch die Umkehrung des Partialdruckgefälles von außen nach innen wird der

Dampfdiffusionsstrom zum Innenraum an der Dampfsperre gestoppt. Solange die dampfdichte Ebene während des Winters funktioniert, stellt dies kein Problem dar. Bei einem Feuchteintrag durch kleine Lecks, Schlagregen, Kapillarleitung oder auch bei Baurestfeuchte kann es jedoch zu einem Aufschaukeln der Feuchte im Bauteil kommen.

Aus diesem Grund werden diffusionsdichte Systeme eher selten verbaut. Nur bei extrem hohen Feuchtelasten vom Innenraum macht die Wahl dieses Systems Sinn.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"> • Bei fachgerechte Ausführung kein Tauwasser in der Konstruktion • Einsatz bei hoher Feuchtelast innen • Verwendbarkeit bei feuchteempfindlichen Untergründen • Uneingeschränkte Oberflächenwahl 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Möglichkeit der Austrocknung nach Innen • Praktische Umsetzbarkeit schwierig • Schwierig bei zusätzlichen Feuchteinträgen • Dauerhaftigkeit der diffusionsdichten / luftdichten Ebene

Tabelle 3: Vor-, und Nachteile eines diffusionsdichten Innendämmsystems (Fachverband Innendämmung, 2016, S.120ff.)

2.2.2.2 Diffusionsbremsende Systeme

Prinzipiell bremst ein diffusionsbremsendes System den Dampfdiffusionsstrom von innen in das Bauteil hinein. Wie schon beim diffusionsdichten System erwähnt ergibt sich auch hier die Problematik der Austrocknung im Sommer. Die Dampfbremse muss einen möglichst großen Diffusionswiderstand aufweisen, um den Feuchteintrag zu minimieren. Andererseits muss die äquivalente Luftschichtdicke möglichst klein sein, um eine Austrocknung zu gewährleisten. Abhilfe schafft hier eine **feuchteadaptive Dampfbremse**. Diese Dampfbremse kann mit einer Klimamembran verglichen werden. Sie ändert ihren Dampfdiffusionswiderstand je nach Wassergehalt der Luft. So herrscht im Winter - bei ausreichender Lüftung und keinen außergewöhnlichen Feuchtelasten im Innenraum - ein eher trockeneres Raumklima als im Sommer. Je niedriger die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum ist, desto größer ist der Diffusionswiderstand der Membran. Bei einer hohen relativen Luftfeuchte im Sommer sinkt der S_d – Wert um ein Vielfaches ab. Somit kann die Feuchtigkeit im Sommer relativ gut nach innen austrocknen und wird im Winter bis zu einem gewissen Maß gebremst. Man spricht hier von Größenordnungen zwischen einem und fünf Metern äquivalenter Luftschichtdicke.

Wie auch beim diffusionsdichten System ist die Montage mit großer Sorgfalt durchzuführen. Sämtliche Durchdringungen müssen exakt geplant werden und es darf die dampfbremsende Ebene auch später nicht beschädigt werden. Durch die Möglichkeit der sommerlichen Trocknung ist die Situation bei weitem nicht so heikel als bei diffusionsdichten Innendämmsystemen. Bei der Wahl der Oberflächengestaltung findet man kaum Einschränkungen. Die Materialien müssen im Sommer jedoch einen Diffusionsstrom nach innen zulassen.

Weiters muss man sich im Klaren sein, dass solche Systeme immer wieder Trocknungsphasen benötigen. Das heißt in Räumen in denen konstante Randbedingungen herrschen, beispielsweise im Keller, sind diffusionsdichte den diffusionshemmenden Systemen vorzuziehen.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none">• Bei fachgerechte Ausführung Begrenzung von Tauwasser in der Konstruktion• Breite Auswahl bei der Oberflächenwahl	<ul style="list-style-type: none">• Begrenzte Austrocknung nach Innen• Gewissenhafte Ausführung der dampfbremsenden Ebene• Dauerhaftigkeit der luftdichten Ebene

Tabelle 4: Vor-, und Nachteile eines diffusionsbremsenden Systems (Fachverband Innendämmung, 2016, S.122ff.)

2.2.2.3 Diffusionsoffene / kondensattolerierende Systeme

Die diffusionsoffenen Systeme stellen die klassischen bauphysikalischen Ansätze komplett auf den Kopf. Bei diesen Systemen wird Kondensat und Tauwasserbildung zugelassen. Das Prinzip einer kondensattolerierenden Innendämmung kann wie folgt beschrieben werden: Das anfallende Tauwasser wird durch entsprechende Dämmmaterialien aufgenommen und verteilt. Bei der nächsten Trocknungsphase wird die Feuchtigkeit wieder abgegeben. In Summe muss die Feuchtebilanz stimmen, um kein Aufschaukeln des Feuchtegehalts im Bauteil zu bewirken.

Bei diesen Systemen ist der Verbund zwischen Außenwand und Dämmung sehr heikel. Kleber und Dämmmaterial müssen genau aufeinander abgestimmt werden und als Gesamtsystem funktionieren. Die diffundierte Feuchte wird im Dämmstoff und teilweise auch in der tragenden Außenwand eingespeichert und bei gegebenen Bedingungen wieder abgegeben.

Man muss die jeweiligen Eigenschaften der Materialien genau kennen. Der (Fachverband Innendämmung, 2016, 124ff) beschreibt dies in seinem Buch ausführlich. Speziell bei der Dämmung müssen kapillarleitende und sorptiv speichernde Materialien unterschieden werden. Die Kapillaraktivität funktioniert wie im Kapitel 2.1.4.1 beschrieben. Somit kann der Wasserdampfdiffusionsstrom entgegen der Oberflächendiffusion verlaufen und den Feuchteeintrag reduzieren. Bei sorptiv speichernden Materialien wird die Feuchte im Material eingespeichert und in der Trockenperiode wieder abgegeben. Es gibt auch Materialien, die diese beiden Eigenschaften verbinden.

Der große Vorteil der diffusionsoffenen Materialien ist der Umgang mit von außen eindringender Feuchte. Während diffusionsdichte bzw. diffusionsbremsende Systeme schnell an ihre Grenzen stoßen, können kondensattolerierende Systeme die Feuchtigkeit nach innen abgeben und austrocknen. Auch der konvektive Feuchteeintrag ist weniger kritisch als bei den vorherig vorgestellten Systemen. Die Dämmung kann grundsätzlich mit der Feuchtigkeit umgehen. Dies funktioniert natürlich nur bis zu einem gewissen Maß.

Bei der Oberflächengestaltung sind diffusionsoffene Materialien und Anstriche für den Rücktransport bzw. für die Austrocknung von Vorteil. Man muss jedoch

anmerken, dass auch diffusionsdichtere Oberflächen nicht automatisch zu einem Schaden führen. Durch den erhöhten S_d Wert dringt weniger Feuchtigkeit in die Konstruktion ein. Kritisch werden solche Oberflächen nur im Zusammenhang mit hohen Feuchteinträgen von außen gesehen.

VORTEILE	NACHTEILE
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Toleranz gegenüber Kondensat • Austrocknung nach innen möglich • Konvektiver Eintrag ist weniger kritisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausführung der Oberfläche eingeschränkt • Kritisch bei hohen inneren Feuchtelasten

Tabelle 5: Vor-, und Nachteil von diffusionsoffenen Innendämmsystemen (Fachverband Innendämmung, 2016, S.129)

2.2.3 Dämmmaterialien

Es gibt viele unterschiedliche Dämmmaterialien. Diese können anhand ihrer Herstellung und Rohmaterialien in unzählige Gruppen eingeteilt werden. Es wird an dieser Stelle auf die umfangreiche Literatur verwiesen um nicht jeden Dämmstoff einzeln anzuführen. Der (Fachverband Innendämmung, 2016, S. 90ff.) gibt einen guten Überblick über die Herstellung und die bauphysikalischen Eigenschaften vieler Dämmstoffe. Sehr interessant ist auch der Preisvergleich pro $1 \text{ m}^2\text{K/W}$ Widerstand. Somit bezieht sich der Preis auf die Dämmwirkung und nicht auf die Kosten pro cm Dämmung. (Gänßmantel und Geburtig, 2008, S. 34ff) teilen die Dämmstoffe in „konventionelle“ und „ökologische“ Dämmmaterialien ein und listen diese nach ihrem Primärenergieverbrauch. Schafwolle, Zellulose und Holzwolle-Leichtbauplatten schneiden hier besonders gut ab.

In diesem Kapitel wird vielmehr auf die Möglichkeiten der Verarbeitung der Dämmstoffe eingegangen und die Vor- und Nachteile der jeweiligen Verarbeitungsarten aufgezeigt. Welcher Dämmstoff letztendlich zum Einsatz kommt, hängt von vielen Faktoren ab. Die wichtigsten Aspekte sind hier kurz aufgelistet:

- Materialität der Bestandswand (Wärme-, und Dampfdiffusionswiderstand)
- Welches Innendämmsystem wird verwendet
- Besondere Wünsche der Nutzer (Ökologie)
- Welcher Standard wird angestrebt (Niedrigenergiehaus, Passivhaus etc.)
- Feuchtebelastung (Schlagregen, kapillar aufsteigende Feuchte, innere Lasten)
- Platzverhältnisse
- Brandschutz
- Schallschutz

Die verschiedenen Verarbeitungsarten teilt der (Fachverband Innendämmung, 2016, S.131) in seinem Buch in Inndämmsysteme mit Putzen, gemauerte Vorsatzschalen, Ständerwerk als Vorsatzschalen und Platten ein.

2.2.3.1 Innendämmsystem mit Putzen

Der große Vorteil von Putzen ist ihre flexible Form. Unebene Untergründe lassen sich daher hervorragend ausgleichen. Weitere Pluspunkte vom Putz sind seine Kapillaraktivität und Diffusionsoffenheit. Dies gibt diesem System auch die Möglichkeit beispielsweise auf Fachwerkwänden angewandt zu werden. Es ist empfehlenswert, einen rissfreien, feuchtebeständigen und kapillar leitfähigen Putz auf der Außenwand anzubringen, welcher eine luftdichte Ebene zur Bestandswand bildet.

Die Ausführung des Putzes kann aus unterschiedlichen Materialien erfolgen. Zum einen gibt es Wärmedämmputze mit dämmenden Zuschlägen wie EPS oder Perlite, um anderen gibt es auch die ökologischere Variante mit Wärmedämmlehmputz oder Zelluloseputz. Alle Putze sind bis zu einer Stärke von ca. 50 mm nachweisfrei zu verwenden. Bei größeren Dämmstärken ist eine feuchtetechnische Simulation anzuraten.

Auf die zu bearbeitenden Flächen muss ein Putzträger aufgebracht werden. Anschließend kann ein Oberputz (Kalk, Kalk-Trass oder Lehmputz) aufgebracht werden.

Der große Nachteil dieser Verarbeitungsart ist der hohe Feuchteeintrag durch die Verarbeitung. Auf eine ausreichende Trocknung ist daher besonders zu achten. In diesem Zusammenhang ist auch das Außenklima in die Betrachtung mit einzubeziehen. Die Dämmwirkung von solchen Putzen ist mit $0,05 - 0,25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ nicht mit anderen Dämmmaterialien zu vergleichen. Abhilfe schaffen hier Hochleistungsdämmputze, welche Aerogele als Zuschlagsstoffe enthalten. Hier liegen die Wärmeleitfähigkeitswerte bei bis zu $0,028 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

2.2.3.2 Gemauerte Vorsatzschalen

Eine weitere Möglichkeit einer Innendämmung sind gemauerte Vorsatzschalen. Diese sind - je nach Gebäudeart - statisch zu prüfen. Die Vorsatzschale kann auch zur Lastabtragung genutzt werden. Weiters kann sie als Schalung für eine dämmende Hinterfüllung dienen oder selbst als Dämmschicht wirken. Typische Materialien für Vorsatzschalen sind:

- wärmedämmende Leichtziegel (Perlitfüllung)
- Leichtbetonsteine (Zuschlag Bims oder Blähton)
- Leichtlehmsteine*
- Porenbetonsteine*

*) hier ist für die Lastabtragung ein statischer Nachweis zu führen

Aufgrund der Lambdawerte von $0,055 - 0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ist bei dieser Art der Innendämmung mit einem erhöhten Platzbedarf zu rechnen. Durch eine Hinterfüllung mit Dämmmaterial ist eine Erhöhung des Wärmedämmwiderstands möglich. Bei kapillaraktiven Einblasdämmstoffen ist auf einen leitfähigen Anschluss der angrenzenden Schichten zu achten. Weiters muss das Dämmmaterial lückenlos

verfüllt werden. Auf die Vorsatzschale kann direkt ein herkömmlicher Putz aufgebracht werden (Fachverband Innendämmung, 2016, S. 135ff).

Es ist auf eine luftdichte Bauweise zu achten. Putzdurchdringungen wie Armaturen und Steckdosen sind luftdicht in die Putzebene einzubinden. Gerade bei ungefüllten Hohlsteinen ist auf die luftdichte Ebene ein besonderes Augenmerk zu legen.

Wie auch bei Dämmputzen ist bei gemauerten Vorsatzschalen der Feuchteintrag durch die Herstellung als Nachteil anzuführen. Auf eine ausreichende Trocknung und einen jahreszeitlich abgestimmten Einbau ist zu achten.

2.2.3.3 Ständerwerk als Vorsatzschalen

Eine „trockene“ Lösung bietet das Ständerwerk als Vorsatzschale. Hier wird - unabhängig von der Bestandswand - ein Holz-, oder Metallständerwerk errichtet. Zum Ausgleich der Bestandswand wird die erste Lage Dämmung direkt an die Außenwand befestigt. Die zweite Lage befindet sich im Inneren des Ständerwerks, welches mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse und einem entsprechenden Plattenmaterial, wie beispielsweise Gipsplatten beplankt ist. Typische Dämmstoffe sind hier Mineralwollämmstoffe, aber auch Hanf-, und Schafwolle sind als Dämmmaterial geeignet.

Eine andere Möglichkeit der Dämmung ist die Einblasdämmung. Bei dieser Art der Dämmung wird ein Ständerwerk aus Holz montiert. Die Beplankung aus einer Holzwerkstoffplatte, meist OSB-Platte bildet eine Dampfbremse. Durch Löcher wird nachträglich der Dämmstoff eingeblasen. Typische Dämmstoffe sind hier die Zelluloseeinblasdämmung, es gibt aber auch Einblasdämmungen aus Mineralwolle und aus Holz. Auf eine lückenlose Füllung mit entsprechendem Druck ist zu achten. Bei zu lockerer Verfüllung kann sich das Dämmmaterial über die Jahre setzen. Ein ausreichender Schlagregenschutz muss ebenfalls gegeben sein. Es wäre zudem von Vorteil, auf der Bestandswand einen feuchtebeständigen Putz anzubringen, um bei Schlagregenbelastungen die Feuchtigkeit durch Umkehrdiffusion abzuführen. Der (Fachverband Innendämmung, 2016, S. 139) gibt an, dass die äquivalente Luftschichtdicke der Holzwerkstoffplatten einen Wert von $S_d \leq 2,0$ m nicht überschreiten soll. Bei Verwendung von manchen OSB-Platten wird jedoch bereits bei einer Plattendicke von 15 mm ein S_d von 3 m erreicht. Entgegen der Empfehlung des Fachverbandes, hat sich dennoch das Verwenden von OSB-Platten bewehrt.

Bei beiden Varianten ist die luftdichte Ebene zu gewährleisten. Bei der Dampfbremse müssen sämtliche Durchdringungen und Anschlüsse gewissenhaft ausgeführt werden. Auch das Plattenmaterial muss lückenlos verklebt und fachgerecht angeschlossen werden. Die Vorteile dieser Systeme sind der nicht vorhandene Feuchteintrag während der Herstellung, sowie eine hohe Funktionssicherheit.

2.2.3.4 Innendämmsystem mit Platten

Bei den Plattenmaterialien gibt es unzählige Arten und Varianten von Dämmungen. Wichtig ist es, hier die passende Platte zum gewählten System zu finden. Je nach Bauart des Bestandes ist in erster Linie das Innendämmsystem zu fixieren. Aufgrund der Systemwahl kann in einem zweiten Schritt das passende Plattenmaterial gewählt

werden. Speziell die Untergrundvorbereitungen sind ein sehr heikles Thema. Der Untergrund muss möglichst glatt sein, damit eine Platte hohlraumfrei verklebt werden kann. Dabei müssen der Kleber und der Untergrund aufeinander abgestimmt sein.

Bei kondensattolerierenden Systemen muss die Oberfläche höchst diffusionsoffen gestaltet werden. Plattenmaterialien, wie Kalziumsilikatplatten, Kalziumsilikat-Hydratplatten, Perliteplatten, Polyurethan-Platten und Wärmedämmlehmplatten müssen immer im Gesamtsystem funktionieren. Das heißt, Untergrund, Kleber, Platte, Armierung und Endbeschichtung müssen aufeinander abgestimmt werden. Die großen Vorteile dieser Materialien sind die unproblematischen Anschlüsse aufgrund der fehlenden Dampfbremse und eine hohe Schimmelpilzresistenz.

Auch bei Holzfaserplatten muss der Untergrund entsprechend geprüft werden. Ein nach außen hin diffusionsoffener Aufbau muss gewährleistet sein. Die Platten selbst müssen mit einer Dampfbremse ausgestattet werden. Aufgrund der Dampfbremse gestalten sich alle Anschlüsse etwas schwieriger.

Eine weitere Möglichkeit bilden die nieder- bis hochdampfbremsenden EPS-Verbundplatten. Aufgrund ihrer dampfbremsenden Eigenschaft können sie im Punkt-Wulstverfahren aufgebracht werden und Unebenheiten von bis zu 20 mm ausgleichen. Wie die EPS-Verbundplatten besitzen auch die Mineralwolle - Verbundplatten eine Kaschierung mit einer Gipsplatte. Die Verbundplatten gibt es mit und ohne Dampfbremse und sind je nachdem im passenden System zu montieren.

Die komplett dampfdichte Lösung bieten Schaumglasplatten. Da diese Platten in sich dampfdicht sind, ist keine zusätzliche Dampfbremse notwendig. Die Platten werden im Heißbitumen verlegt und beinhalten alle Vor- und Nachteile einer dampfdichten Konstruktion.

Legt man besonders hohen Wert auf einen geringen Platzverlust, bieten Vakuumisulationspaneele eine gute Lösung. Aufgrund ihres Vakuums im Inneren besitzen sie hervorragende Lambdawerte. Als Nachteile muss man jedoch die komplizierte Montage und den hohen Preis anführen.

Steht eine höchst ökologische Lösung im Vordergrund, können Schilfrohrplatten verwendet werden. Diese Platten können direkt verputzt werden und sind relativ diffusionsoffen.

Für die genaue Verarbeitung aller hier vorgestellten Dämmstoffe wird auf das Buch (Fachverband Innendämmung, 2016) verwiesen. Dort finden sich detaillierte Informationen und Verarbeitungshinweise.

2.3 Rechtliche Grundlagen

In diesem Kapitel wird kurz auf die technischen Regelwerke in Deutschland und Österreich eingegangen. Speziell für Innendämmungen sind die genormten Regelwerke relativ überschaubar beziehungsweise nicht vorhanden. Die unten angeführten Normen sollen einen groben Überblick über die Inhalte verschaffen.

2.3.1 Normen

In Österreich ist als Grundlage für wärmetechnische Betrachtungen die Normenreihe ÖNORM B8110 zu nennen. Sie besteht aus mehreren Teilen:

- ÖNORM B 8110-2: Feuchtetransport
- ÖNORM B 8110-3: sommerliche Überhitzung
- ÖNORM B 8110-4: betriebswirt. Optimierung des Wärmeschutzes
- ÖNORM B 8110-5: Klimamodell und Nutzungsprofile
- ÖNORM B 8110-6: Nachweisverfahren HWB etc.
- ÖNORM B 8110-7: wärmetechnische Bemessungswerte

Eine Ergänzung für die ÖNORM B8110-5 stellt die (ÖNORM EN ISO 15927-3) dar, welche sich speziell mit der Schlagregenbelastung beschäftigt. Im der (ÖNORM B 8110-2, S. 22ff) werden Kriterien einer nachweisfreien Innendämmung angegeben. Diese sind so streng gestaltet, dass bei einer Sanierung mit Innendämmung, in der Praxis immer ein Nachweis geführt werden muss.

In Deutschland ist die DIN 4108 das Regelwerk für den Wärmeschutz im Hochbau. Auch sie besteht aus mehreren Teilen und ist in ihrem Aufbau der ÖNORM B8110 relativ ähnlich. Die deutsche Norm gibt in ihrer vorherigen Ausgabe des dritten Teiles (DIN 4108-3) auch einige Aufbauten für eine nachweisfreie Innendämmung an, jedoch sind diese Angaben nicht als allgemein gültig zu betrachten, da sie nur auf Beobachtungen beruhen.

2.3.2 WTA-Merkblätter

Die WTA-Merkblätter bieten eine gute Hilfestellung bei der Planung von Innendämmungen. Speziell im WTA-Merkblatt (WTA 6-4 2016) und (WTA 6-5 2014) werden hilfreiche Information zum Thema Innendämmung gegeben. Das Merkblatt (WTA 6-2 2014) beschäftigt sich mit der Simulation von wärme- und feuchtetechnischen Prozessen.

2.4 Simulationssoftware DELPHIN

In dieser Masterarbeit werden sämtliche Simulationen mit der Software DELPHIN in der Version 6.0.20 erstellt. Delphin ist in der Lage, gekoppelten Feuchte-, Wärme und Stofftransporte zu simulieren. Das Simulationsprogramm kann diese Transportmechanismen in kapillarporösen Baustoffen berücksichtigen. Für die Simulation wird ein numerisches Lösungsverfahren verwendet, welches durch Differentialgleichungen die Transportprozesse beschreibt. Die numerischen Fehler werden durch Validierungsrechnungen, welche die korrekte Implementierung der physikalischen Gleichungen kontrollieren, geprüft. Um diese zu erreichen, werden Referenzlösungen und der Abgleich mit anderen Simulationsprogrammen durchgeführt (Sontag, Nicolai, Vogelsang, S.1).

Für genauere Hintergründe zum Programm wird auf die Homepage der Bauklimatik Dresden verwiesen.

3 Bisherige Forschungsergebnisse

Trotz der limitierten Regelwerke zum Thema „Innendämmung“, gibt es umfangreiche Literatur, welche sich mit der Problemstellung der Innendämmung auseinandergesetzt hat. In diesem Kapitel werden konkrete Aussagen aus der Fachliteratur, Forschungsergebnisse und bisherige Erkenntnisse zum Thema „Innendämmung“ vorgestellt und im Hinblick auf den praktischen Teil diskutiert.

3.1 Literaturlaufbereitung

In der Literaturlaufbereitung werden drei Arten von Beiträgen vorgestellt. Beginnend mit einem allgemeinen Werk, werden weiterführend Forschungsergebnisse zum Thema Innendämmung vorgestellt und schließlich auf konkrete Forschungsarbeiten zum Thema „Innendämmung“ bei Massivholzhäusern eingegangen.

3.1.1 Praxishandbuch Innendämmung

Sämtliche Ergebnisse, welche in diesem Kapitel angeführt werden, beziehen sich auf das Praxishandbuch der Innendämmung (Fachverband Innendämmung, 2016), welches einen hervorragenden Überblick zum Thema liefert. Dieses Werk vermittelt ein umfassendes Grundwissen über die physikalischen Aspekte von Wärme- und Feuchtvorgängen. Verschiedene Innendämmsysteme werden sehr detailliert dargestellt und viele Erkenntnisse wurden bereits im Kapitel 2 dieser Arbeit vorgestellt.

Weiters finden sich viele Lösungen und Detailbetrachtungen zu den Themen „Bauteilanschlüsse“, „Wärmebrücken“ und „Luftdichtheit“ sowie eine schrittweise Ablaufbeschreibung einer Sanierung. In der Folge wird auf eine Aussage eingegangen, die - in Anbetracht der Sanierung von Bauernhäusern - einen interessanten Ansatz liefert.

Mehr Dämmung weniger Feuchte?

In den Regelwerken der Normungsinstitute gilt eine Innendämmung als nachweisfrei feuchteunproblematisch, wenn der zusätzlich aufgebrachte Wärmedurchlasswiderstand der Dämmung nicht größer als 25 % des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes ist. Dieser relativ kleine Wärmeleitwiderstand entspricht in der Praxis nur wenigen Zentimetern Dämmung. Je mehr Dämmung aufgebracht wird, umso genauer muss das System betrachtet werden. Einen ganz anderen Ansatz findet man jedoch auf S.127 des Handbuchs: „Mehr Dämmung ergibt weniger Feuchte!“

Begründet wird die Aussage durch ein kondensattolerierendes Innendämmsystem in Form einer Holzweichfaserdämmung auf einer Betonwand. Bei den Untersuchungen werden die Dämmstärken von 2 - 12 cm variiert. Die Simulation ergibt für die erste Zentimeterschicht auf der kalten Seite einen maximalen Wassergehalt bei einer Dämmstärke von 4 cm. Mit zunehmender Dämmstärke verringert sich der Wassergehalt weiter. Abbildung 8 verbildlicht die Ergebnisse des eingeschwungenen Zustandes. Anhand der Ergebnisse kann man erkennen, dass eine dünnere Dämmschicht viel empfindlicher auf einen Feuchteeintrag reagiert und schneller wieder abtrocknet.

3 Bisherige Forschungsergebnisse

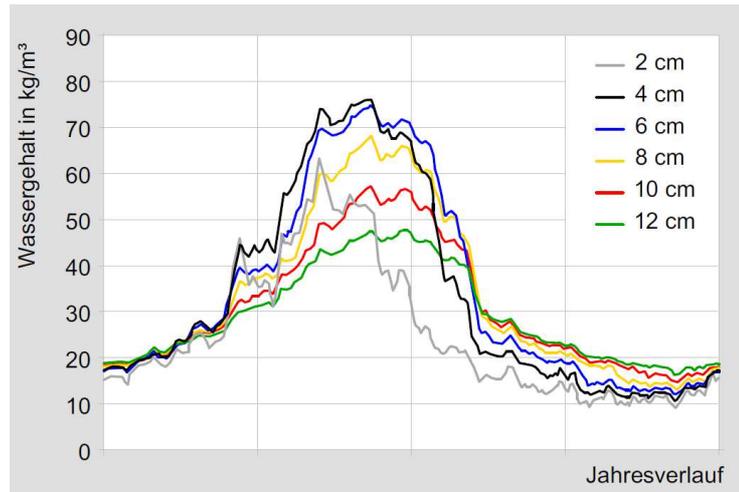


Abbildung 8: Wassergehalt der ersten Zentimeterschicht auf der kalten Seite bei unterschiedlicher Dämmstärke (Fachverband Innendämmung, 2016, S.127)

Dieser Effekt kann anhand von zwei Punkten erklärt werden. Zum Ersten steigt mit zunehmender Dämmstärke auch der s_d -Wert der Dämmschicht. Somit wird bei doppelter Dämmstärke auch die äquivalente Luftschichtdicke verdoppelt. Die Temperatur zwischen der Dämmschicht und der Stahlbetonwand ändert sich jedoch nicht linear sondern parabolisch. Abbildung 9 zeigt den Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Dämmstärke. Somit wird bei ähnlichen Temperaturniveaus durch den zusätzlichen Diffusionswiderstand, viel weniger Feuchte durch Diffusion transportiert.

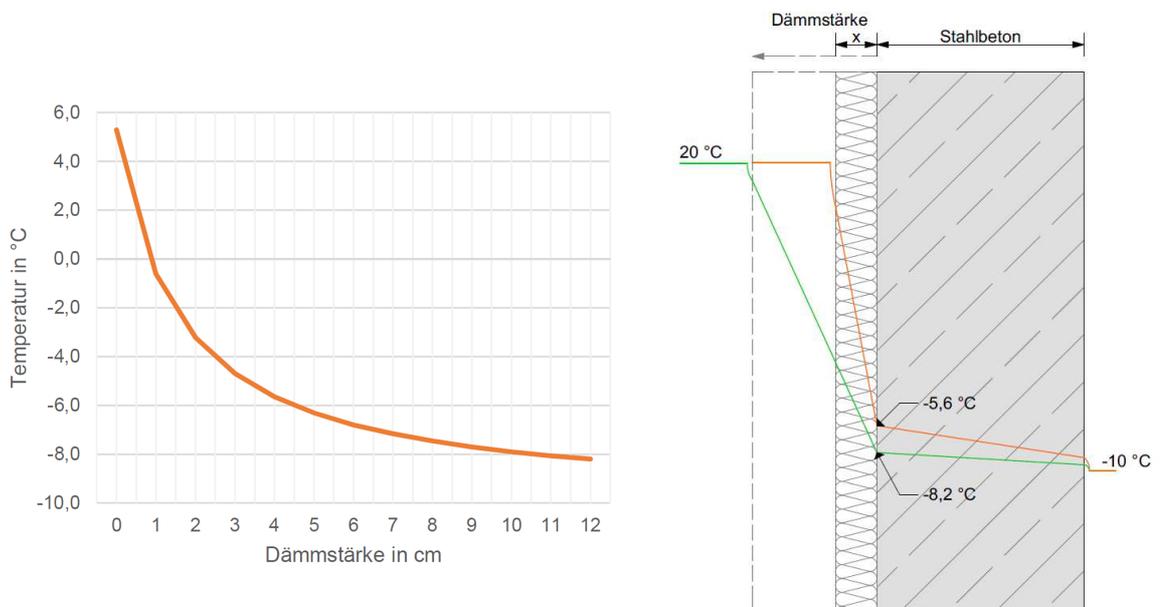


Abbildung 9: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Dämmstärke, Temperaturverlauf im Bauteil bei 6 und 12 cm Dämmung

Der zweite Grund ist die höhere Speicherfähigkeit der dickeren Dämmung. Durch das zusätzliche Volumen wird die Feuchtigkeit im Material verteilt und gespeichert. Kommt es bei einer Dämmstärke von 2 - 4 cm sogar zur Kondensation, können die größeren Dämmstoffdicken die Feuchtigkeit viel besser verteilen und einspeichern. Somit werden kritische Spitzenwerte verhindert.

Diskussion

Es stellt sich die Frage, ob man diese Aussage für kondensattolerierende Innendämmsysteme verallgemeinern kann. Beton ist aufgrund seiner hohen Diffusionsdichtheit und guten Wärmeleitfähigkeit ein sehr schwieriger Untergrund in Bezug auf Tauwasserbildung. Jedoch spielt bei dieser Konstruktion Schlagregenbelastung kaum eine Rolle. Ein Feuchteintrag durch kapillaraufsteigendes Wasser oder Baurestfeuchte wurde laut dem Autor in der Simulation nicht berücksichtigt.

Die Frage ist also, wie sich die Thematik bei völlig gegenteiligen Randbedingungen verhält. Wählt man als Außenwand eine massive Holzwand, so kann diese - je nach Region und Holzart - diffusionsoffener sein, besitzt eine schlechte Wärmeleitfähigkeit und eine Schlagregenbelastung ist bei fehlenden konstruktiven Schutz essenziell. Ein solcher Wandaufbau wird im Kapitel 5.1.1.1 im Detail untersucht und durch Variation der Dämmstärke überprüft.

3.1.2 Innendämmungen im Vergleich

Über die Funktionsweise von verschiedenen Innendämmsystemen gibt es mittlerweile viele Simulations-, und Messergebnisse. Im Folgenden werden einige dieser Ergebnisse vorgestellt und damit die Problematik von Messungen und Simulationen aufgezeigt.

3.1.2.1 Langzeitmessung Kloster Benediktbeuern

Sämtliche Ergebnisse, welche in diesem Kapitel angeführt werden, beziehen sich auf einen Vortrag von Prof. Dr. Martin Krus im Februar 2019 (Krus, 2019). Im Zuge dieses Vortrages stellte er unter anderem die Ergebnisse einer Langzeitmessung verschiedener Dämmmaterialien des Fraunhofer-Zentrums für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege im Kloster Benediktbeuern vor. Für den Versuch wurden verschiedenen Materialien und Arten von Innendämmungen in das historische Gebäude eingebaut und messtechnisch untersucht. In Tabelle 6 ist eine Materialauswahl angegeben.

Dämmstoff	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dicke [cm]	Form
Aerogel-Dämmputz	0,028	4,5	Dämmputz
Rohrkolben Dämmung Typha	0,055	9	Dämmplatten
Minerale Dämmplatten	0,042	10	
Historisches Material Schilfrohr	0,043	11	
Zelluloseflocken	0,04	8	Dämmschüttung
Perliteschüttung	0,05	8	
Mineralwolle matten	0,035	6,5	Dämm matten
Aerogel matten	0,018	4	

Tabelle 6: Materialauswahl der Innendämmung (Krus, 2019)

Analysiert man das Ergebnis der Messungen (Abbildung 10), fällt sofort auf, dass in diesem Fall der kapillaraktive Mineralschaum extrem schlechte Ergebnisse liefert. Die Perliteschüttung mit Dampfbremse funktioniert hingegen hervorragend und liefert unkritische Werte.

Diskussion

Vergleicht man diese Ergebnisse mit anderen Forschungsergebnissen, kann man zwar einen ähnlichen Trend herauslesen, jedoch ist nur eines mit ziemlicher Sicherheit festzustellen: Sämtliche Ergebnisse hängen sehr stark von den Randbedingungen ab. Feuchtelasten von innen, sowie Schlagregenbelastung in Kombination mit unterschiedlichen Außenwänden und Materialparametern lassen kaum allgemein gültige Aussagen zu. Sämtliche Mess- und Simulationsergebnisse müssen immer in Zusammenhang mit den Randbedingungen und

Materialeigenschaften interpretiert werden. Die Vor- und Nachteile der Innendämmsysteme, wie sie im Kapitel 2.2.2 beschrieben sind, müssen auf die jeweilige Situation angepasst werden und sind - je nach Objekt - neu zu beurteilen.

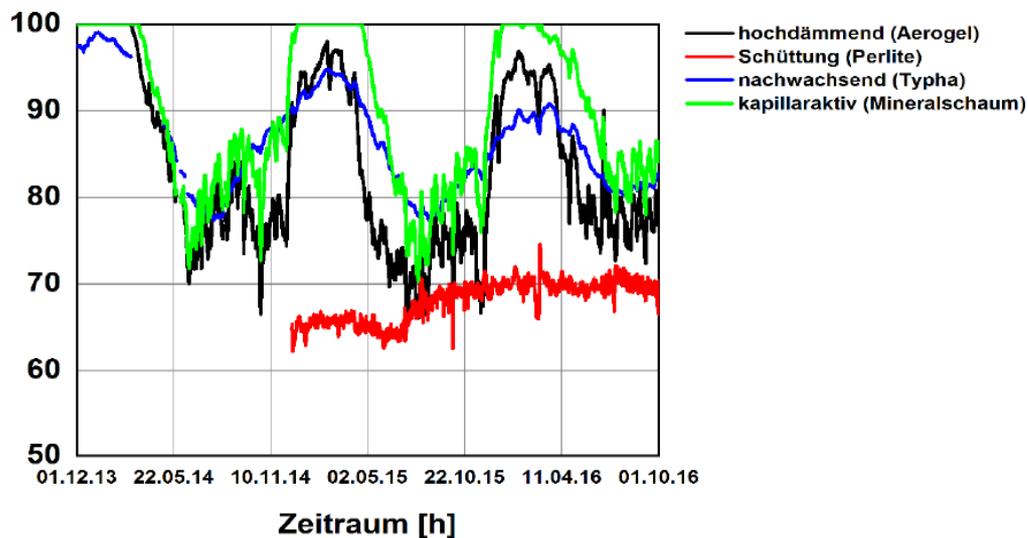


Abbildung 10: Messergebnisse Langzeitmessung Benediktbeuern (Krus, 2019)

3.1.2.2 Protokollband 32

Auf die Problematik der Randbedingungen wird in der Überarbeitung des Protokollbandes 32 genauer eingegangen. Sämtliche Ergebnisse, welche in diesem Kapitel angeführt werden, beziehen sich darauf (Feist und Passivhaus Institut Überarbeitung, 2005). Im Protokollband werden die Ergebnisse von Simulationen mit unterschiedlichen Schlagregenbelastungen und Oberflächenqualitäten in Bezug auf die Wasseraufnahme vorgestellt. Die Resultate zeigen große Unterschiede bei Variation dieser Faktoren, wobei auch hier die Grundaussagen der Innendämmsysteme zum Tragen kommen.

Als Beispiel wird die Variation der Innenraumfeuchte angeführt. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse bei einer mittleren relativen Luftfeuchtigkeit von 37 %, wie sie bei Verwendung einer kontrollierten Wohnraumlüftung erzielt wird. Die Schlagregenbelastung entspricht der Gruppe III, der Außenputz besitzt eine Wasseraufnahme von $0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ mit einem Anstrich von $0,05 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$. Wie erwartet, übersteigt die Mineralwolle als diffusionsoffenes System die Grenze von 85 % rel. Luftfeuchtigkeit. Die Zellulose kann bei genauerer Betrachtung als unkritisch betrachtet werden. Alle anderen Systeme liegen unter 85 %.

In einer weiteren Simulation wurde die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum auf 50% erhöht. Dies entspricht in etwa den Feuchtlasten bei Fensterlüftung. Abbildung 12 zeigt bei fast allen Varianten ein nichtzufriedenstellendes Ergebnis. Nur durch die Änderung einer Randbedingung sind fast alle Systeme als feuchtekritisch zu beurteilen.

Des Weiteren wird auch auf die Variation der Materialparameter eingegangen. So unterscheiden sich beispielsweise Zellosedatensätze verschiedener Hersteller in einer Größenordnung, welche recht große Schwankungen im Ergebnis bewirken.

3 Bisherige Forschungsergebnisse

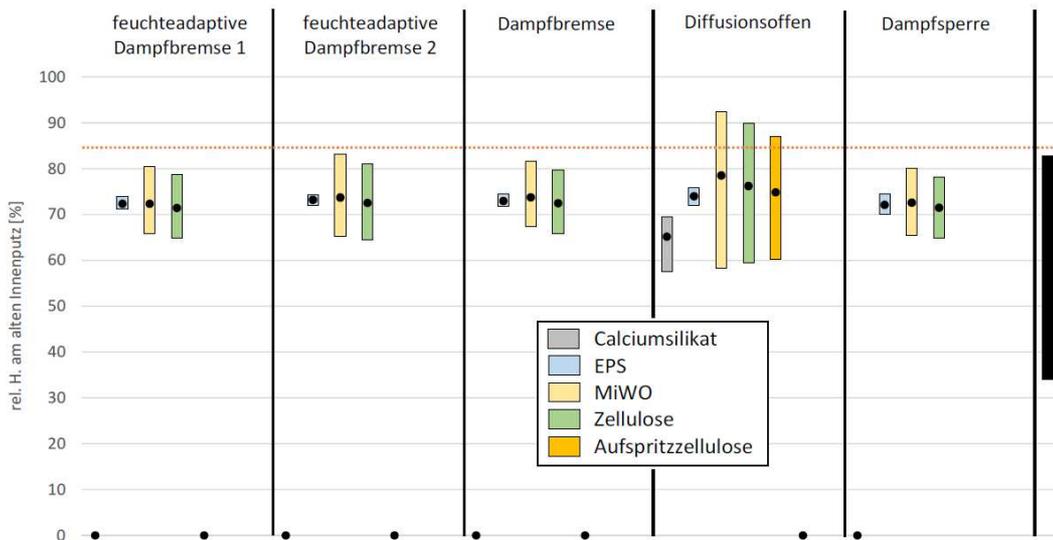


Abbildung 11: Simulationsergebnisse bei 37 % relativer Luftfeuchte im Innenraum (Feist und Passivhaus Institut Überarbeitung, 2005, S.77)

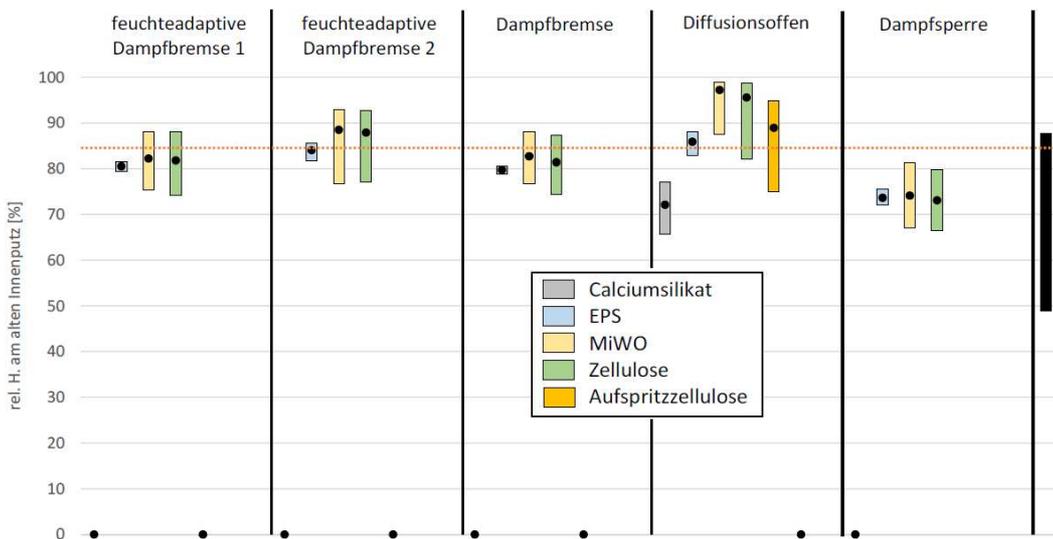


Abbildung 12: Simulationsergebnisse bei 50 % relativer Luftfeuchte im Innenraum (Feist und Passivhaus Institut Überarbeitung, 2005, S.78)

Diskussion

Laut dem (Fachverband Innendämmung, 2016, S. 302) ist - aufgrund der Ergebnisse verschiedener Untersuchungen - das Thema „Innendämmung“ etwas unkritischer als angenommen zu betrachten. Hält man sich an die Grundregeln der Systeme und schenkt den Detailanschlüssen mehr Aufmerksamkeit, ist bei üblichen Wohnraumfeuchten kaum ein kritischer Zustand zu erreichen. Grundlage dafür sind die Vermeidung von übermäßigen Diffusionseinträgen durch moderate Dampfbremsen oder die Möglichkeit einer kapillaren Rücktrocknung. Jedoch weist (Feist und Passivhaus Institut Überarbeitung, 2005, S.85) darauf hin, dass trotz dieser Ergebnisse noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Speziell bei den Materialkennwerten von kapillaraktiven Systemen gibt es noch viele Unsicherheiten.

3.1.3 Üllar Alev - Renovation and Energy Performance Improvement of Estonian Wooden Rural Houses

In der Literatur und den Forschungsarbeiten findet man meistens Ergebnisse, die sich im Allgemeinen auf massive Außenwände aus Ziegel, Beton, Naturstein oder auf Fachwerkhäuser beziehen. In der Doktorarbeit von (Alev, 2017) werden Erkenntnisse über massive Holzwände präsentiert. Im Speziellen handelt es sich bei den untersuchten Häusern um historische Einfamilienhäuser in Holzblockbauweise in Estland. Sämtliche Ergebnisse, welche in diesem Kapitel angeführt werden, beziehen sich auf die Doktorarbeit von Üllar Alev.

Anhand von Messungen wurden bei 51 verschiedenen Häusern Erkenntnisse über die Innenraumbedingungen, den Sanierungsbedarf und die Luftdichtheit gesammelt. Durch die Messungen wurde ein genaues Modell für die Außenwand erstellt, welches auch die Luftundichtheit der Außenwand berücksichtigt und im Simulationsmodell eingebettet wird. Des Weiteren wurde durch Variation von verschiedenen Parametern in hygrothermischen Simulationen das Schimmelwachstumsrisiko bei einer typischen Innendämmung mit Mineralwolle festgestellt. Aufgrund von Messungen wurden die Simulationsmodelle bewertet und für verschiedene Innendämmsysteme angewandt.

Durch die Ähnlichkeit zwischen der Konstruktion und Bauweise von Holzhäusern in Estland und den landwirtschaftlich genutzten Bauernhöfen in Tirol, werden in weiterer Folge die Ergebnisse etwas genauer vorgestellt.

3.1.3.1 Schäden im unsanierten Bestand

Durch die große Bandbreite an untersuchten Gebäuden konnte bei verschiedenen Konstruktionen der Schadensursprung bestimmt werden. Bei den Außenwänden sind der Sockelbereich sowie die Fensteröffnungen die kritischen fehleranfälligen Stellen. Beim Dach sind Undichtheiten und ein fehlendes Entwässerungssystem die Hauptursachen für Schäden. Abbildung 13 zeigt die Hauptfehlerquellen einer Außenwand eines nicht unterkellerten Gebäudes. Auch die Ausbildung der erdberührten Böden erfolgte zum Teil fehlerbehaftet. Der in Abbildung 13 gezeigte Aufbau entspricht einer schadensfreien Konstruktion. Bei manchen Häusern wurde der Zwischenraum zwischen Holzdielen und Erdreich mit Sand aufgefüllt. Kapillarer Feuchtetransport führten hier schnell zu einem Holzschaden im Bodenaufbau.

Undichte Dächer und die damit verbundene hohe Feuchtelast im Inneren des Gebäudes sind in den meisten Fällen die Hauptgründe für den Zerfall der Häuser. Bei Blower Door Messungen wurde die Dichtheit der Gebäude überprüft. Wie erwartet, kamen dabei extrem hohe Infiltrationsraten heraus. Bei Gebäuden mit Putzoberflächen im Inneren fielen die Ergebnisse um einiges besser aus. Durch die Schadensanalyse an den Bestandsgebäuden wird schnell klar, dass bei diesem Gebäudetyp ein sofortiger Sanierungsbedarf besteht. Zugserscheinungen sowie fehlende Behaglichkeit durch eine unzureichende Dämmung der Gebäudehülle sind die Hauptprobleme, welche durch eine Sanierung verbessert werden müssen.

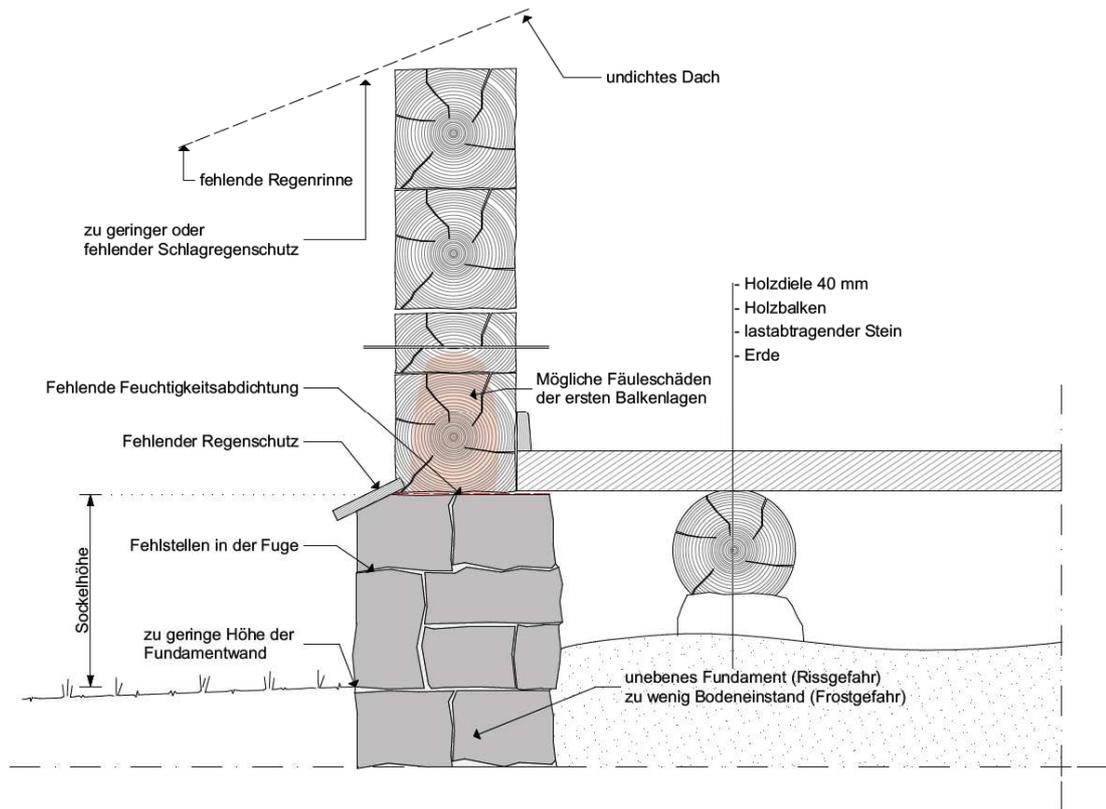


Abbildung 13: Schadensquellen einer Außenwand nach (Alev, 2017, S.35)

3.1.3.2 Schimmelrisiko bei Innendämmung mit Mineralwolle

Um das Schimmelrisiko einer Dämmung mit einer herkömmlichen, einfach zu installierenden Dämmung darzustellen, wurden in verschiedenen Simulationen maßgebende Parameter variiert. Bei der Dämmung handelte es sich um Mineralwolle. Der Autor führt auch detaillierte Messungen aus, um ein korrektes Außen- und Innenklima darzustellen. Wie zuvor erwähnt, liegen die nachfolgenden Ergebnisse dem Standort Estland zu Grunde. Die dortigen Randbedingungen sind recht ähnlich zu unserer alpinen Region. Die unten angeführten Ergebnisse bilden den *Mould growth Index* laut Kapitel 2.1.8.2 ab. Die Simulation erstreckte sich über einen Zeitraum von 5 Jahren. Die in den Tabellen verwendeten Pfeile \uparrow und \downarrow beschreiben den Trend vom zweiten zum fünften Jahr im Vergleich zum ersten Jahr.

Für die inneren Feuchtelasten wurde hier ein Design Feuchtigkeitsüberschuss Δv_i angegeben. Dieser bildet sich aus der Differenz des Partialwasserdampfgehaltes des Innenraums und des Partialwasserdampfgehaltes der Außenluft. Der Feuchtigkeitsüberschuss wurde je nach Außentemperatur angepasst. Die Werte blieben bei Außentemperaturen von $< 5 \text{ }^\circ\text{C}$ und $> 20 \text{ }^\circ\text{C}$ konstant. Bei Temperaturen zwischen diesen zwei Werten verhält sich Δv_i linear. Somit wurde im Winter und Sommer von verschiedenen Feuchteüberschüssen ausgegangen und diese dementsprechend in der Simulation berücksichtigt.

Die nachfolgende Tabelle gibt die variierten Parameter an. Die grau hinterlegten Werte bilden den Referenzfall.

Parameter	Referenz	Versionen					
Feuchteüberschuss Δv [g/m ³]; $t_e < 5$ °C/ $t_r > 20$ °C	5/1,5	1/-0,5	2/0	3/0,5	4/1	5/1,5	6/2
Durchschnittliche Innentemp. im Winter, t_i , °C	19	18	19	20	21	22	23
Wanddicke der Blockwand d_{block} , mm	150	100	125	150	175	200	225
Dicke Innendämmung $d_{dämm}$, mm	50	25	50	75	100	125	150
Feuchtegehalt der Blockwand w , %	14	14	15	16	17	18	19
äquiv. Luftschichtdicke der Dampfbremse s_d , m	2	0,01	0,1	1	2	10	100

Tabelle 7: Variierte Parameter im Simulationsmodell (Alev, 2017, S.31)

Die Tabelle 8a zeigt die Ergebnisse bei der Variation des Feuchteüberschusses in Kombination mit der Innenraumtemperatur. Je höher die Innenraumtemperatur ist, desto höhere Feuchtelasten werden zulässig. Dies hängt vor allem mit der Erhöhung der Temperatur in der Zwischenschicht zusammen. Da der absolute Feuchtegehalt derselbe bleibt, sinkt bei steigender Temperatur die relative Feuchtigkeit und das Schimmelrisiko wird herabgesenkt. Einen ähnlichen Effekt kann man bei der Variation der Dicke der Massivholzaußenwand erkennen. Durch den erhöhten Widerstand mit steigender Wandstärke steigt die Temperatur im Zwischenraum und eine stärkere Innendämmung wird zulässig. Die Ergebnisse sind der Tabelle 8b zu entnehmen.

8a		Feuchteüberschuss Δv , [g/m ³]					
		1	2	3	4	5	6
Innentemperatur t_i , [C°]	18	0	0	0	0,1 ↑	2,5 ↑	4,1 ↑
	19	0	0	0	0	1 ↑	3,4 ↑
	20	0	0	0	0	0,3 ↑	2,8 ↑
	21	0	0	0	0	0	2 ↑
	22	0	0	0	0	0	0,6 ↑
	23	0	0	0	0	0	0
	24	0	0	0	0	0	0

8b		Dicke der Außenwand, [mm]					
		100	125	150	175	200	225
Innentemperatur t_i , [C°]	25	0	0	0	0	0	0
	50	2,3 ↑	2 ↑	1 ↑	0,8 ↑	0,5 ↑	0,1 ↑
	75	4 ↑	3,7 ↑	3,4 ↑	3,1 ↑	2,8 ↑	3,6 ↑
	100	4,9 ↑	4,8 ↑	4,6 ↑	4,3 ↑	4 ↑	3,6 ↑
	125	5,3 ↑	5,2 ↑	5,2 ↑	5 ↑	4,8 ↑	4,5 ↑
	150	5,3 ↑	5,3 ↑	5,3 ↑	5,3 ↑	5,2 ↑	5 ↑

Tabelle 8: (8a) Variation von Feuchteüberschuss und Innenraumtemperatur, (8b) Variation der Innendämmstärke und der Dicke der Holzaußenwand (Alev, 2017, S.56)

In den folgenden Tabellen sind weitere Kombinationen an Parametervariationen dargestellt. In der Tabelle 9a kann man sehr gut erkennen, dass bei kleinen Feuchtelasten durch den Innenraum auch größere Dämmstärken funktionieren können. Geringere Feuchtelasten erreicht man beispielsweise durch den Einsatz einer kontrollierten Wohnraumlüftung.

Diskussion

Da sich die Simulationen nur auf den Dämmstoff Mineralwolle beziehen, können praktisch keine Speichereffekte durch die Dämmung in Rechnung gestellt werden. Somit sind die Ergebnisse speziell für dieses Innendämmsystem zu interpretieren. Würden die Berechnungen mit kapillaraktivem oder speicherfähigem Dämmmaterial

3 Bisherige Forschungsergebnisse

erfolgen, wäre ein deutlich anderes Ergebnis zu erwarten. Dennoch kann man anhand der Variationen, die physikalischen Vorgänge einer Innendämmung sehr gut verstehen und Zusammenhänge erkennen.

9a		Feuchteüberschuss Δv , [g/m ³]					
		1	2	3	4	5	6
Innendämmung, [mm]	25	0	0	0	0	0	0,1 ↑
	50	0	0	0	0	1 ↑	3,4 ↑
	75	0	0	0	0,8 ↑	3,4 ↑	5 ↑
	100	0	0	0,1 ↑	2,7 ↑	5,4 ↑	5,4 ↑
	125	0	0	0,8 ↑	3,5 ↑	5,2 ↑	5,5 ↑
	150	0	0	2,1 ↑	4,2 ↑	5,3 ↑	5,5 ↑

9b		Innendämmung, [mm]					
		25	50	75	100	125	150
Äquiv. Luftschichtd., [m]	25	5,2 ↑	5,5 ↑	5,6 ↑	5,6 ↑	5,7 ↑	5,7 ↑
	50	4,6 ↑	5,5 ↑	5,6 ↑	5,6 ↑	5,6 ↑	5,6 ↑
	75	0,3 ↑	4 ↑	5,3 ↑	5,4 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑
	100	0	1 ↑	3,4 ↑	4,6 ↑	5,2 ↑	5,3 ↑
	125	0	0	0	0	0	0,1 ↑
	150	0	0	0	0	0	0

9c		Holzfeuchte Außenwand, [%]					
		14%	15%	16%	17%	18%	19%
Äquiv. Luftschichtd., [m]	0,01	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑
	0,1	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑	5,5 ↑
	1	4 ↑	4 ↑	4 ↑	4,1 ↓	4,5 ↓	4,5 ↓
	2	1 ↑	1,6 ↑	2 ↑	2,8 ↓	3,5 ↓	4,2 ↓
	10	0	0	0,6 ↓	2,1 ↓	3,2 ↓	4,1 ↓
	100	0	0	0,6 ↓	2 ↓	3,2 ↓	4,2 ↓

9d		Feuchteüberschuss Δv , [g/m ³]					
		1	2	3	4	5	6
Äquiv. Luftschichtd., [m]	0,01	0	0,1 ↓	2,2 ↑	5,4 ↑	5,5 ↑	5,7 ↑
	0,1	0	0,1 ↓	1 ↑	5,2 ↑	5,5 ↑	5,6 ↑
	1	0	0	0	0,8 ↑	4 ↑	5,4 ↑
	2	0	0	0	0	1 ↑	3,4 ↑
	10	0	0	0	0	0	0
	100	0	0	0	0	0	0

Tabelle 9: Weitere Parametervariationen (Alev, 2017, S.56)

In der Tabelle 9c sind die Ergebnisse für den Referenzfall mit einem $\Delta v = 5/1,5$ [g/m³] dargestellt. In diesem Fall sind die hohen Feuchteinträge in Folge der Diffusion maßgebend. Eine Verbesserung wird nur durch eine relativ diffusionsdichte Dampfbremse erreicht. Reduziert man jedoch den Feuchteintrag durch Diffusion im Winter auf $\Delta v_i = 3$ [g/m³] sind die Effekte der verbesserten Austrocknung im Sommer durch eine relativ diffusionsoffene Dampfbremse zu erkennen. Die besten Ergebnisse werden bei einem S_d von 1,0 m erzielt. Daraus lässt sich auch die Berechtigung von feuchteadaptiven Dampfbremsen ableiten.

10		Holzfeuchte Außenwand, [%]					
		14%	15%	16%	17%	18%	19%
Äquiv. Luftschichtd., [m]	0,01	2,2 ↑	2,2 ↓	2,4 ↓	2,7 ↑	3 ↑	3,1 ↑
	0,1	1 ↑	1,1 ↓	1,5 ↓	1,9 ↓	2,2 ↓	2,5 ↓
	1	0	0	0,1 ↓	0,7 ↓	1,9 ↓	2,7 ↓
	2	0	0	0,1 ↓	1,2 ↓	2,3 ↓	3,1 ↓
	10	0	0	0,2 ↓	1,8 ↓	3 ↓	4 ↓
	100	0	0	0,6 ↓	2 ↓	3,2 ↓	4,2 ↓

Tabelle 10: Mould growth Index zwischen Innenoberfläche der Holzwand und der Dämmebene bei einem Feuchteüberschuss von $\Delta v_i = 3$ g/m³ (Alev, 2017, S.57)

3.1.3.3 Verschiedene Innendämmsysteme im Vergleich

Um auch eine Aussage über verschiedene Dämmmaterialien bzw. Innendämmsysteme zu erhalten, wurden an einem kleinen Testgebäude, Messungen mit Mineralwolle, Zellulosefaser und Schilfmatten mit Lehmputz durchgeführt. Die Ergebnisse gaben Aufschluss über den Einfluss der Einbaufeuchte und der Innenraumrandbedingungen. Mit Hilfe der Software WUFI wurde eine hygrothermische Performance Analyse unter der Variation verschiedener Parameter erstellt.

Folgende Parameter wurden variiert:

- Dicke der Außenwand von 100 mm bis 200 mm in 25 mm Schritten
- Dicke der Innendämmung von 50 bis 150 mm
- Anfänglicher Feuchtegehalt der Blockwand von 14 % - 26 %
- Verschiedene Dampfbremsen:
 - Polyethylen Folie (PE) ($S_d = 18m$)
 - Feuchteadaptive Dampfbremse ($S_d = 0,25 - 25m$)
 - Laminiertes Papier ($S_d = 1m$)
 - Ohne Dampfbremse
- Feuchteüberschuss (Δv):
 - Niedrige Feuchtelasten in den Wohnungen (+4/1 g/m³)
 - Hohe Feuchtelasten in den Wohnungen (5/1,5 g/m³) u. (+6/2 g/m³)

Um die Ergebnisse miteinander zu vergleichen, wurde wiederum ein Referenzfall definiert:

- $\Delta v = +4/1 \text{ g/m}^3$
- Dicke der Außenwand 200 mm mit einem Feuchtegehalt von 17 %
- Dicke der Dämmung 50 mm
- Feuchteadaptive Dampfbremse, Schilfmatte ohne Dampfbremse

Die Materialeigenschaften der für die Simulation verwendeten Materialien können der Tabelle 11 entnommen werden.

	Holzwand	Mineralwolle	Zellulose	Schilfmatte	Dampfbremse	Lehmputz	Gipskarton
Dichte ρ , kg/m ³	390	60	60	136	425	1568	850
Porosität Φ , %	75	95	95	90	-	41	65
spez. Wärmekapazität c , J/(Kg·K)	1600	850	2000	2000	2300	488	850
Wärmeleitfähigkeit λ , W/(m·K)	0,12	0,04	0,037	0,075	-	0,48	0,2
Wasserdampf-diffusionswiderstandszahl μ , -	108	1,3	1,5	2,0	-	20	8,3
Einbaufeuchte w_e , kg/m ³	66	0,8	8,0	6,0	0	100	2,0

Tabelle 11: Materialeigenschaften der für die Simulation benutzten Baustoffe nach (Alev, 2017, S.29)

Um das Simulationsmodell möglichst real zu gestalten, wurden die Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen verglichen und das Modell nachgebessert. Die Infiltration der Außenluft durch die Blockwand wurde durch einen Luftwechsel auf der Oberfläche der innenseitigen Holzwand berücksichtigt.

Die Innendämmsysteme mit Zellulosefaser und Mineralwolle wurden mit einer Dampfbremse ausgestattet. Der Einbau der Zellulose erfolgte mittels Sprühmethode. Somit wurde das Material nass eingebaut. Die Schilfmatte wurde mit Lehmputz verputzt und auf eine Dampfbremse wurde verzichtet.

Durch die diffusionsoffene Bauweise des Innendämmsystems mit einer Schilfmatte und Lehmputz konnte die Feuchtigkeit der Holzbalken nach beiden Seiten austrocknen und eine höhere Anfangsfeuchte der Holzbalken war somit unproblematisch. Die Zellulosefaser kann einen gewissen Teil der Feuchtigkeit einspeichern, jedoch ist eine Austrocknung nach innen durch die Dampfbremse nur begrenzt möglich. In der Abbildung 14 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.

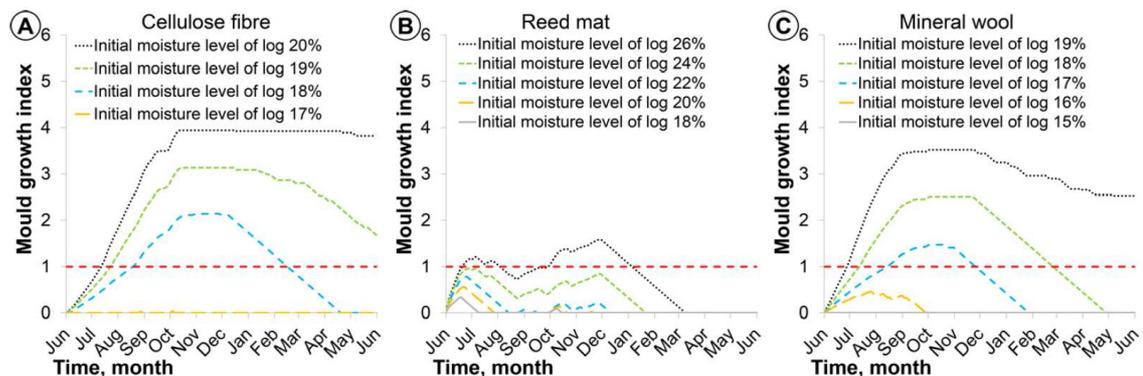


Abbildung 14: Mould growth Index auf der Innenseite der Holzwand, abhängig von der Anfangsfeuchtigkeit der Blockholzwände (Alev, 2017, S.58)

Für die zwei Dämmsysteme mit Dampfbremse wurden in der Simulation verschiedene diffusionsbremsende Materialien getestet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 dargestellt. Durch die hohe Anfangsfeuchte der Zellulosefaser ist ein sofortiger Einsatz von relativ dichten Dampfbremsen nicht anzuraten. Die eingebrachte Dämmung muss vor Anbringung der Dampfbremse mindestens eine Woche austrocknen. Der Verzicht einer Dampfbremse funktioniert in beiden Fällen nicht. Die Zellulose schnitt durch ihre erhöhte Speicherfähigkeit jedoch deutlich besser ab.

Bei der Variation der Holzwanddicke (Abbildung 16) ergaben sich auf den ersten Blick widersprüchliche Ergebnisse zur Tabelle 8b. Durch den größeren Widerstand der Holzwand erhöhte sich, wie schon zuvor erwähnt, die Temperatur im Bereich der inneren Holzwandoberfläche. Damit verringerte sich die relative Luftfeuchte. Bei der Simulation zur Tabelle 8b wurde jedoch von einem Holzfeuchtegehalt von 14 % ausgegangen. Der Referenzfall für diese Simulation lag bei 17 %. Somit überstiegen die Feuchteinträge durch die dickere Holzwand den Effekt der Temperaturerhöhung. Bei der Schilfmatte war der Einfluss der Holzfeuchte, wie in Abbildung 14 dargestellt, bei weitem nicht so hoch. Aus diesem Grund verhielt sich hier eine dickere Außenwand besser.

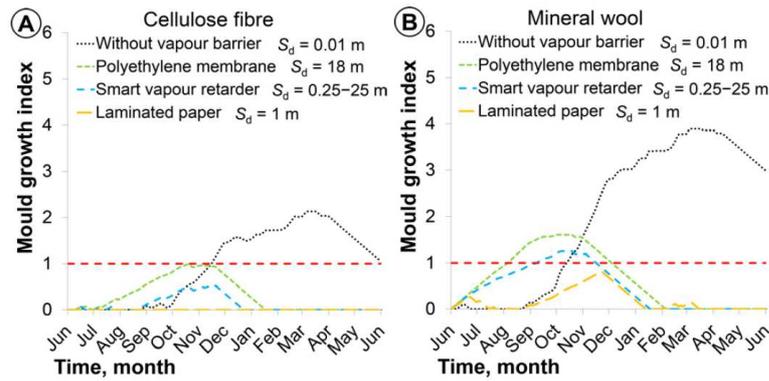


Abbildung 15: Variation der Dampfbremsen (Alev, 2017, S.59)

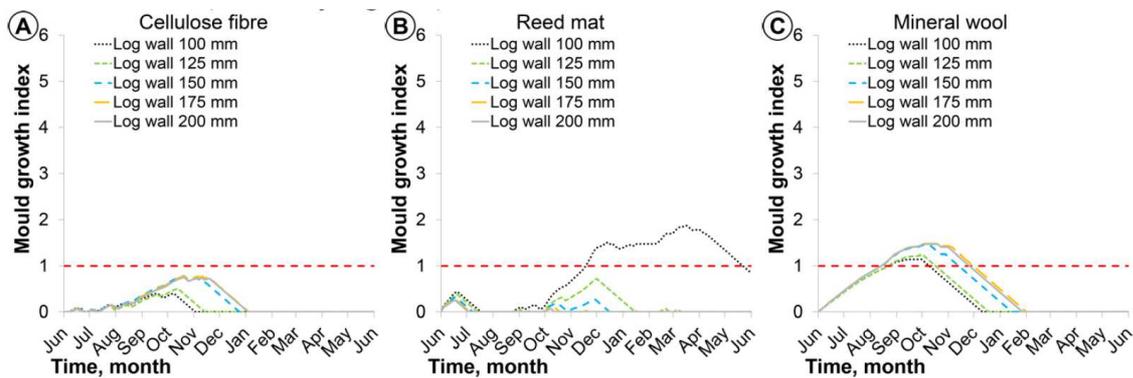


Abbildung 16: Variation der Außenwanddicke (Alev, 2017, S.60)

Erhöht man die Dämmstärke, erhöhten sich auch die Schimmelwahrscheinlichkeit. Ein Effekt wie in 3.1.1 beschrieben (Mehr Dämmung weniger Feuchte) kann dieser Simulation nicht entnommen werden.

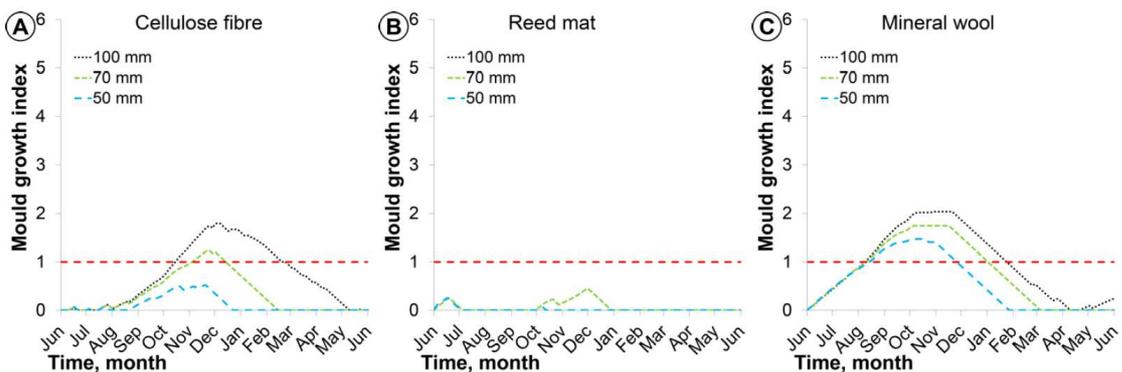


Abbildung 17: Variation der Dämmstärke (Alev, 2017, S.60)

Durch die Anbringung einer hinterlüfteten Holzschalung im Außenbereich war die Schlagregenbelastung in der Konstruktion gleich null. Einzig die Feuchteinträge durch Diffusion und die Einbaufeuchte trugen zum Feuchteeintrag in der Simulation

bei. Bei der Variation der Feuchtelasten konnte man die verzögernde Speicherwirkung der Zellulose erkennen. Die Schilfmatte war bei zu hohen Feuchtelasten unbrauchbar.

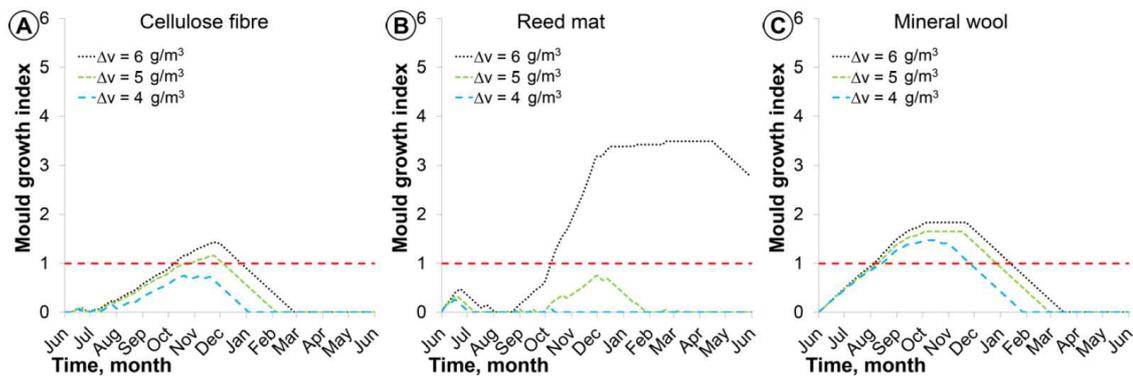


Abbildung 18: Variation der Feuchtelasten (Alev, 2017, S.60)

3.1.4 Hinterlüftung der Dämmebene

Bei der Frage, ob ein System mit Innendämmung funktioniert, beruft man sich in der Regel auf den Feuchtegehalt zwischen Dämmung und tragender Außenwand. Sämtliche Simulationen, Messungen und Untersuchungen beziehen sich auf diesen Wert. Auch (Ojanen, 2007) beschäftigte sich mit dieser Frage und untersuchte für zwei Standorte in Finnland verschiedene Innendämmungen unter Einfluss verschiedener Parameter. Die Ergebnisse entsprechen in etwa den Erkenntnissen von (Alev, 2017). Tuomo Ojanen stellte in seiner Arbeit einen neuen Ansatz zur Vermeidung von zu hohen Feuchtelasten auf der Innenoberfläche von Blockwänden vor. Speziell bei großen Dämmstärken heißt das Schlagwort laut seinen Erkenntnissen Hinterlüftung.

Alev berücksichtigte in seinen Untersuchungen eine gewisse Infiltration der Blockwand. Würde man eine klassische Hinterlüftungsebene ausführen, wäre die Innendämmung im Grunde eine herkömmliche Ständerwand und ein Schimmelrisiko würde außer Frage stehen. Der große Nachteil ist der Verlust des thermischen Widerstandes der gesamten Außenwand. Ojanen lieferte für diesen Widerspruch die Lösung mit Hilfe eines limitierten Lüftungskanals. Dieser soll zum einen den thermischen Widerstand der Blockwand berücksichtigen und trotzdem einen Feuchteabtransport bewirken. Die Idee dahinter ist, dies mittels kleinen Lüftungskanälen zwischen der Holzwand und der Dämmebene zu erreichen (Ojanen, 2007, S.6 ff.).

Der Aufbau sieht eine Einblasdämmung zwischen einer Riegelkonstruktion vor, welche mit einem Plattenmaterial beplankt ist. Die Riegel werden in einem Abstand von 60 cm montiert und bilden jeweils eine Kammer, welche mit einem Lüftungskanal in der Mitte der Dämmkammer ausgestattet wird. Der Lüftungskanal besteht aus gefaltetem Karton und bildet ein gleichschenkliges Dreieck mit einer Seitenlänge von 40 mm. In Abbildung 19 ist das Konzept der Lüftung dargestellt.

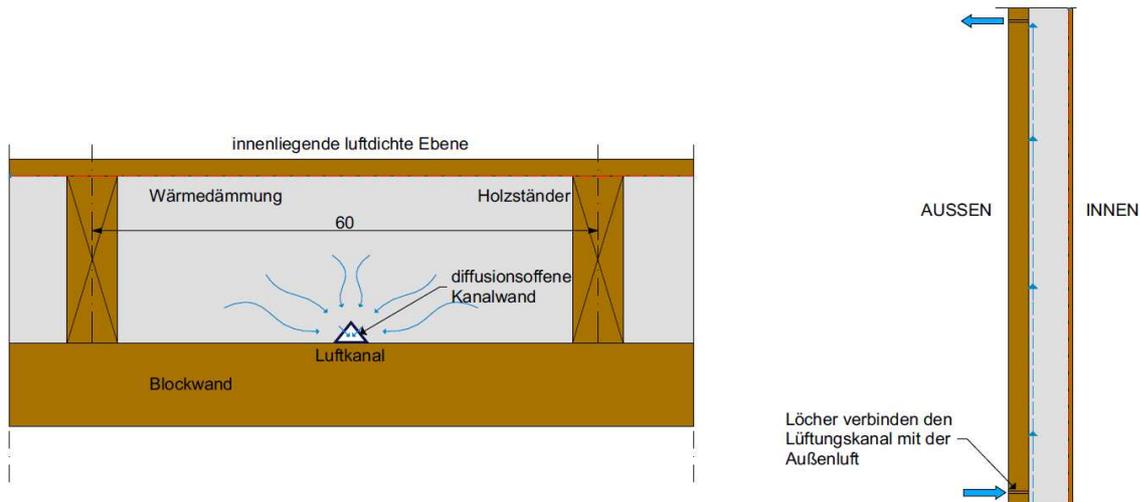


Abbildung 19: Schema der Lüftung, horizontaler Schnitt (links), vertikaler Schnitt (rechts) nach (Ojanen, 2007, S.7)

3.1.4.1 Annahmen für die Berechnung der notwendigen Volumenströme

Um die notwendigen Volumenströme, welche für eine ausreichende Trocknung sorgen, zu berechnen, wurden folgende Annahmen getroffen (Ojanen, 2007, S.7 ff.):

- Durchschnittliche Randbedingungen für innen und außen ($t_a = 0^\circ\text{C}$, 90% re. Lf. / $t_i = 22^\circ\text{C}$, re. Lf. 40 % $\rightarrow \Delta v \approx 3,4 \text{ g/m}^3$)
- Blockwand wurde als dampfdicht betrachtet (sichere Seite)

Die Verwendung von durchschnittlichen Werten bezog sich auf die Überlegung, dass die Feuchtekapazität der Holzwand extreme Feuchtspitzen glätten kann. Die Temperatur an der kritischen Oberfläche hing von der Dicke der Dämmung und der Wandstärke der Blockwand ab. Das Temperaturlevel der Luft im Kanal hing wiederum von der kritischen Oberfläche ab. Bei sehr kleinen Luftwechselraten im Kanal, würde die Luft im Wesentlichen die Randbedingungen der umgebenden Oberfläche annehmen. Dies wurde je nach Temperatur mit der zugehörigen, maximalen, relativen Luftfeuchtigkeit laut Mould growth Index für die Berechnung begrenzt, beispielsweise bei 5°C , 88% re. Lf.

Durch die Variation von verschiedenen Parametern, wie der U-Wert und die äquivalente Luftschichtdicke der Innenbekleidung, wurden die zugehörigen, notwendigen Luftwechselraten im Kanal bestimmt. Der U-Wert wurde von $0,30 - 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ variiert, der s_d -Wert lag bei 1 bzw. 3. Somit stellte der s_d -Wert von 1 eine Gipskartonverkleidung mit diffusionsoffenem Anstrich dar. Der Wert von 3 wurde beispielsweise durch eine OSB-Platte erreicht. Konvektive Einträge wurden durch eine luftdichte Ebene verhindert.

3.1.4.2 Ergebnisse und Interpretation

Abbildung 20 gibt die Ergebnisse für die variierten Parameter wieder. Die größten Luftwechselraten entstanden bei kleinen U-Werten, niederen S_d – Werten und geringer Wandstärke der Blockwand. Unter Annahme eines dreieckigen Lüftungskanals mit einen Querschnitt von 750 mm^2 , betragen die Luftgeschwindigkeiten je nach Fall zwischen $0,05 - 0,16 \text{ m/s}$. Setzt man eine Erwärmung der Luft im Kanal von 3°C voraus, würde in Folge von Dichteunterschieden der erwärmten Luft eine Druckdifferenz von $0,34 \text{ Pascal}$ entstehen, was in etwa einer Strömungsgeschwindigkeit von $0,17 \text{ m/s}$ entspricht (Ojanen, 2007, S.8).

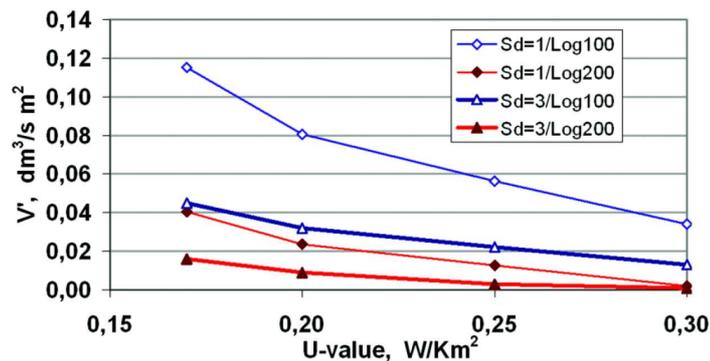


Abbildung 20: berechnete Luftwechselraten laut (Ojanen, 2007) unter Variation von Holzblockwanddicke, s_d -Wert und U-Wert der Wand (Ojanen, 2007, S.8)

Diskussion

Aufgrund der Überlegungen wäre eine solche „Hinterlüftung“ rein theoretisch möglich und speziell für eine Sanierung mit Innendämmung in Passivhausstandard sinnvoll. Für eine praktische Umsetzbarkeit müssten jedoch detaillierte Simulationen und Messungen durchgeführt werden.

3.2 Verbleibender Forschungsbedarf

Im Kapitel 3.1 wurden verschiedenste Materialien, Parameter und Systeme getestet und die Ergebnisse präsentiert. Es gibt zahlreiche Aussagen, bis zu welchen Grenzwerten verschiedene Dämmmaterialien und Innendämmsysteme funktionieren. Doch gerade bei größeren Dämmstärken liegen im Grunde keine Lösungsvorschläge vor. Die Belüftung der Grenzschicht zwischen Dämmung und Holzwand liefert zumindest einen Ansatz für eine funktionsfähige Sanierung mit U-Werten im Passivhausstandard. Im Zuge der Recherche konnten keine weiterführenden Studien zu diesem Ansatz gefunden werden.

Sehr wenig ist auch zum Thema Kapillaraktivität und die Speicherfähigkeit von verschiedenen Materialien im Zusammenhang mit größeren Dämmstärken bekannt. Es gibt zwar viele Simulationen mit der Variation der Dämmstärke, jedoch werden dort meistens Materialien und Systeme verwendet, die für eine Aussage über die Speicherfähigkeit der Dämmung bei niederen U-Werten ungeeignet sind.

3.3 Anwendung der Erkenntnisse auf kapillaraktive Innendämmung mit großer Dämmstärke

Zum Thema „Dämmstärken“ wird in den folgenden Kapiteln, speziell anhand eines praktischen Beispiels eines sanierten Bauernhofes in Scheffau in Tirol, den „Hof Neuhäusl“, die Auswirkung von Zellulosedämmung in einer passivhaustauglichen Stärke überprüft und Detaillösungen vorgestellt. Berechnungen sollen durch Messungen am Bestand überprüft und mögliche Verbesserungen diskutiert werden. Des Weiteren wird die Idee der Hinterlüftung mittels Luftkanälen genauer geprüft und hygrothermisch simuliert. Durch eine ganzjährige Betrachtung werden verschiedene Szenarien und Problemstellungen wissenschaftlich untersucht.

4 Methoden

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die Methoden zur Ergebnisfindung gegeben.

4.1 Hof „Neuhäusl“

4.1.1 Detailbetrachtungen

Beim Hof Neuhäusl gibt es eine große Palette an interessanten Details. Die im Kapitel 5 vorgestellten Detailbetrachtungen basieren auf mehreren Gesprächen mit dem Architekten DI Hans Peter Gruber sowie auf Baustellenfotos und Plänen, welche von Herrn Gruber zur Verfügung gestellt wurden.

Bei einer Vorortbesichtigung während der Installation der Messinstrumente (siehe Kap. 4.1.3) sollten die Erkenntnisse vertieft und mit dem Architekten diskutiert werden.

4.1.2 Hygrothermische Simulation

Um die Detailausführung, im Speziellen den Wandaufbau, genau zu prüfen, werden mit der Simulationssoftware DELPHIN Version 6.0.20 (siehe Kap. 2.4) verschiedene Varianten erstellt und eine 5-jährige Simulation durchgeführt.

Ich möchte in der Folge auf die Wahl der Randbedingungen eingehen, da diese gerade bei einer Simulation signifikante Ergebnisunterschiede bewirken. Die Zusammenstellung der Varianten, sowie materialspezifische Kenngrößen werden in den Ergebnissen im Kapitel 5 erörtert.

Bei den Randbedingungen unterscheidet man zwischen den **klimatischen Randbedingungen**, dazu gehören Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Schlagregen, Sonneneinstrahlung und Wind, sowie den **physikalischen Randbedingungen**, wie den Wärmeübergangskoeffizient h und den Feuchteübergangskoeffizienten β .

4.1.2.1 Klimatische Randbedingungen

Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit:

Für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit werden sowohl für das Innenraumklima als auch für das Außenklima Datenpunkte hinterlegt. Die Angaben liefern Erfahrungswerte, sind jedoch nicht genau für den Standort Scheffau in Tirol ermittelt. Die Datenpunkte werden von der Universität Innsbruck - Arbeitsbereich für energieeffiziente Bauweise - zur Verfügung gestellt.

Schlagregen / Wind:

Die Schlagregenproblematik ist bei der Simulation von historischen Gebäuden ein heikles Thema. Generell ist es schwierig, ohne ortsspezifische Messungen und Daten eine realistische Schlagregenbelastung zu simulieren. Erschwerend kommt hinzu, dass es keine vernünftigen Angaben über den konstruktiven Schlagregenschutz durch einen Balkon gibt. Um trotzdem ein Gefühl für die Auswirkungen durch eine Schlagregenbelastung zu bekommen, wird eine Variante mit und ohne Schlagregenbelastung simuliert. Die Angaben werden von der

hinterlegten Datenbank des Programmes verwendet. Es wird der Standort Garmisch Partenkirchen gewählt, da dieser der nahegelegenste Ort zu Scheffau ist. Hier muss den Ergebnissen sehr kritisch gegenüber getreten werden, da die Oberfläche von alten Blockbauten mit unzähligen Rissen durchzogen ist und die positive Wirkung von Balkon und Vordach unberücksichtigt bleibt. Wie sich der Schlagregen auf Blockwänden verhält, müsste mit Hilfe von Versuchen ermittelt werden. Um trotzdem eine gewisse Aussage über die Problematik zu erhalten, werden folgende Ansätze für eine Schlagregenbelastung gewählt. Beim konstruktiven Schlagregenschutz ist die Frage, ob ein umlaufender Balkon bzw. ein Vordach, wie es bei historischen Bauernhäusern in Tirol üblich ist, einen ausreichenden Schlagregenschutz bietet. Die einfachste Herangehensweise sind Beobachtungen. Nach starken Regenereignissen kann in den meisten Fällen keine bedeutende Durchfeuchtung der Holzwände beobachtet werden. Bei Gewittern im Sommer ist durch die Kombination von Starkregen und Windböen, trotz Balkon und Vordach, besonders die Westfassade betroffen. Einen rechnerischen Zusammenhang zwischen Wind und Niederschlag liefert (Häupl, 2008, S.37 ff). Er bildet ein Kräfte Dreieck mit der resultierenden Reibungskraft F_r . Durch Auflösen des Ansatzes $F_r^2 = F_w^2 + F_g^2$ erhält er für verschiedene Tropfendurchmesser den Winkel α_v und die Windgeschwindigkeit nach Abbildung 21.

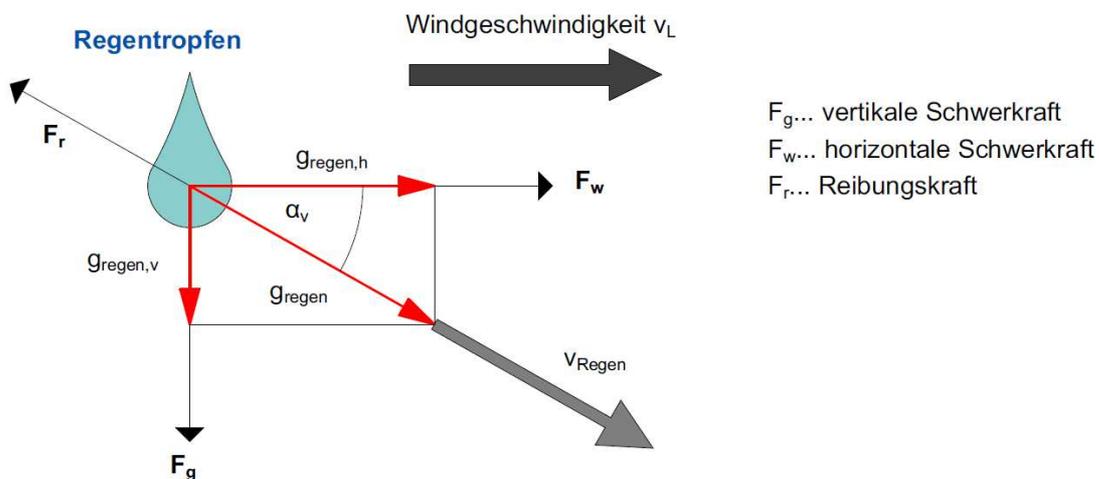


Abbildung 21: Kräftebeziehungen für eine schematische Darstellung der Regengeschwindigkeit (Häupl, 2008, S.37 ff.)

Bei Unwettern werden durch Windspitzen, sehr hohe Windgeschwindigkeiten erreicht. Solche Gewitter finden fast ausschließlich in den Sommermonaten statt, in denen eine rasche Trocknung zu erwarten ist. Für „normale“ Windgeschwindigkeiten sind in der Abbildung 23 die Regenwinkel nach Abbildung 22 für ein Vordach und einen Balkon am Beispiel Hof Neuhäusl eingetragen. Selbst bei Windgeschwindigkeiten um die 6-8 m/s besteht durch das Vordach ein nennenswerter Schlagregenschutz. Speziell bei starken Regenfällen ($r = 2 \text{ mm}$) kommt es kaum zum Feuchteeintrag an der Holzfassade. Bei den Balkonen ist in den unteren 30 cm eine erhöhte Spritzwasserbelastung zu erwarten.

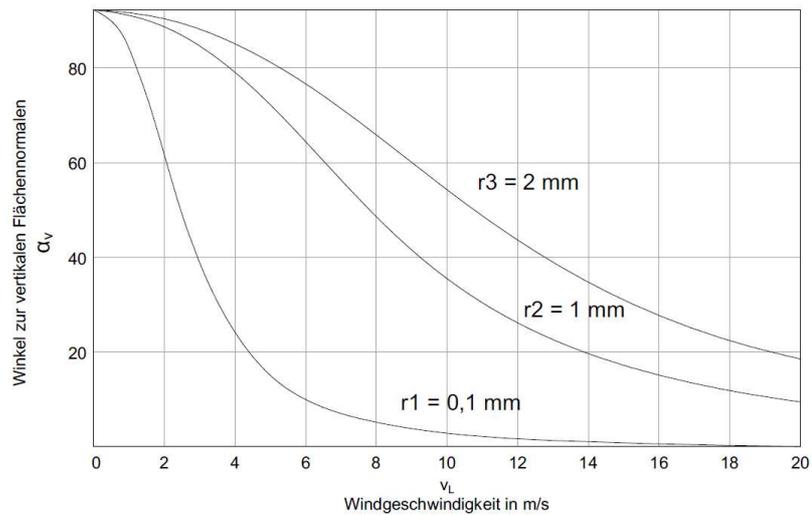


Abbildung 22: graphische Darstellung von Schlagregenwinkel und Windgeschwindigkeit nach (Häupl, 2008, S.37 ff).

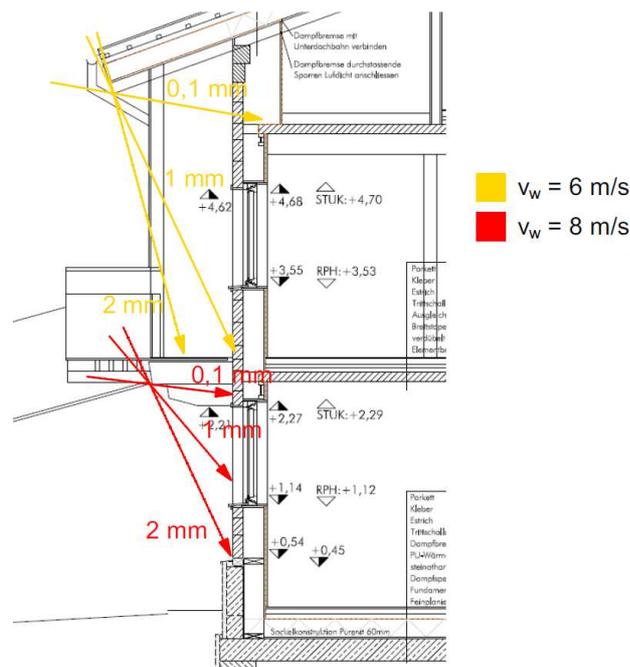


Abbildung 23: Winkel des Schlagregens in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit

Die Problematik der Risse in der Holzoberfläche kann nach genauer Betrachtung als eher unkritisch beurteilt werden. Die Schwundrisse reichen fast immer nur ein Stück in den Holzbalken hinein und sind praktisch nie durchgehend über den gesamten Holzquerschnitt. Hierbei kann eine rasche Abtrocknung des eingedrungenen Wassers beobachtet werden. Der Wassereintritt zwischen den Holzbalken hängt stark von der Qualität des Blockbaues ab und kann nur schwer abgeschätzt werden. Sehr kritisch sind die Eckbereiche von Blockbauten zu beurteilen. Trifft Regenwasser

auf das Hirnholz wird es durch die Kapillare nach innen transportiert. Auf diese Problematik wird anhand eines Beispiels im Kapitel 5 noch genauer eingegangen.

Sonneneinstrahlung:

Für die Sonneneinstrahlung werden wiederum Datenpunkte von der Universität Innsbruck verwendet. Diese Datenpunkte werden durch das Programm DELPHIN, nach Angabe der Ausrichtung der Wand umgerechnet und berücksichtigt.

4.1.2.2 Physikalische Randbedingungen

Die physikalischen Randbedingungen werden laut (WTA 6-2 2014, S. 20) wie folgt gewählt:

Bauteiloberfläche	Wärmeübergangskoeffizient h [W/(m ² ·K)]	Wasserdampfübergangskoeffizient β [s/m]
Außen	17	75×10^{-9}
Innen	8	25×10^{-9}

Tabelle 12: Übergangskoeffizienten h und β für die Simulationen am Hof Neuhäusl

Für die Anfangsbedingungen werden eine Standardtemperatur von 20 °C und eine Standardanfangsfeuchte von 80 % gewählt. Die Simulationsdauer beträgt 5 Jahre. Die Diskretisierung erfolgt automatisch in einem Bereich von 1 – 50 mm Schichtdicke.

4.1.3 Messung am Bestand

Für die Messungen am Bestand werden Geräte der Firma Scanntronik Mugrauer GmbH verwendet. Ziel der Messung ist es, die Holzfeuchte zwischen der Innenoberfläche der Holzwand und der Zellulosedämmung zu bestimmen. Die Holzfeuchte wird an zwei Stellen der Ostfassade, sowie an zwei Stellen der Westfassade gemessen. An jeder Messstelle wird zusätzlich die Holzfeuchte an der Oberfläche der Blockwand gemessen. Durch die oberflächennahe Messung erhält man eine Aussage über die Schlagregenbelastung, sowie die daraus resultierende Auswirkung auf die Innenoberfläche. Erreicht wird dies durch eine Widerstandsmessung über Niroholzschrauben. Alle Feuchtesensoren werden an ein Gigamodul angeschlossen, welches auf Fichtenholz lt. Hersteller kalibriert ist. Die Schrauben werden mit einem Abstand von 30 mm montiert. Der Aufbau beziehungsweise Anschluss erfolgt laut Abbildung 24. Zusätzlich zur Holzfeuchte, wird an zwei Stellen die Temperatur der Holzinnenoberfläche gemessen.

Um auch die klimatischen Randbedingungen zu erfassen, werden die relative Luftfeuchte sowie die Temperatur im Innen- und Außenbereich gemessen. Die Messungen sollten für mindestens ein Jahr erfolgen. Da die Installation der Messgeräte erst im November 2019 möglich ist, werden nur die ersten Ergebnisse vom November und Dezember 2019 im Kapitel 5.1.2 vorgestellt.

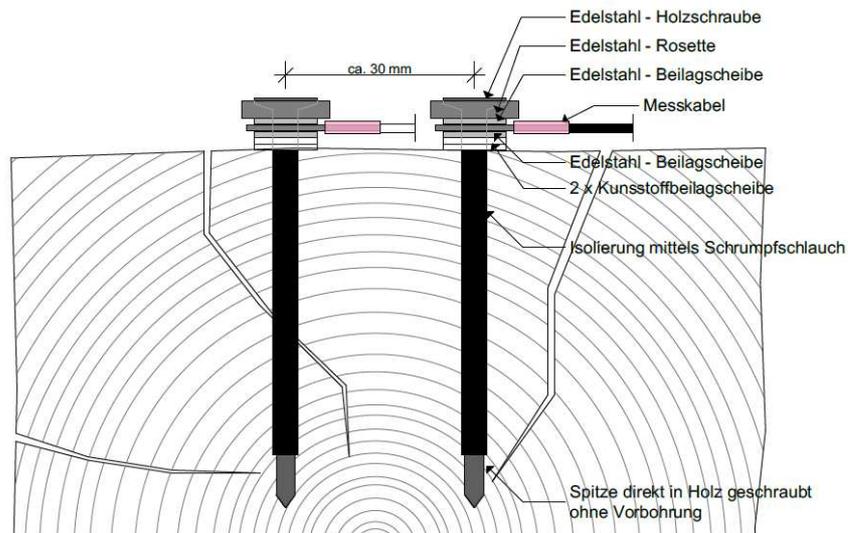


Abbildung 24: Messaufbau Holzfeuchte

Die Problematik bei der Installation der Messgeräte ist, mit der unisolierten Schraubenspitze möglichst die letzten 5-10 mm der Holzwand zu treffen. Da derart alte Wände in ihrer Stärke variieren, muss erst die Stärke der lokalen Holzwand bestimmt werden. Dies wird durch eine Probebohrung erreicht. In das Loch wird ein Draht eingeführt, welcher sich beim Zurückziehen an der Innenoberfläche der Holzwand einhängt. In einem nächsten Schritt kann die Länge des Drahtes gemessen und somit die Wanddicke bestimmt werden. Die Bohrung für die Schrauben erfolgt ca. 5-10 mm kürzer als die Wandstärke. Die letzten Millimeter wird die Holzschraube hineingedreht, um einen optimalen Kontakt zum Holz zu gewährleisten.

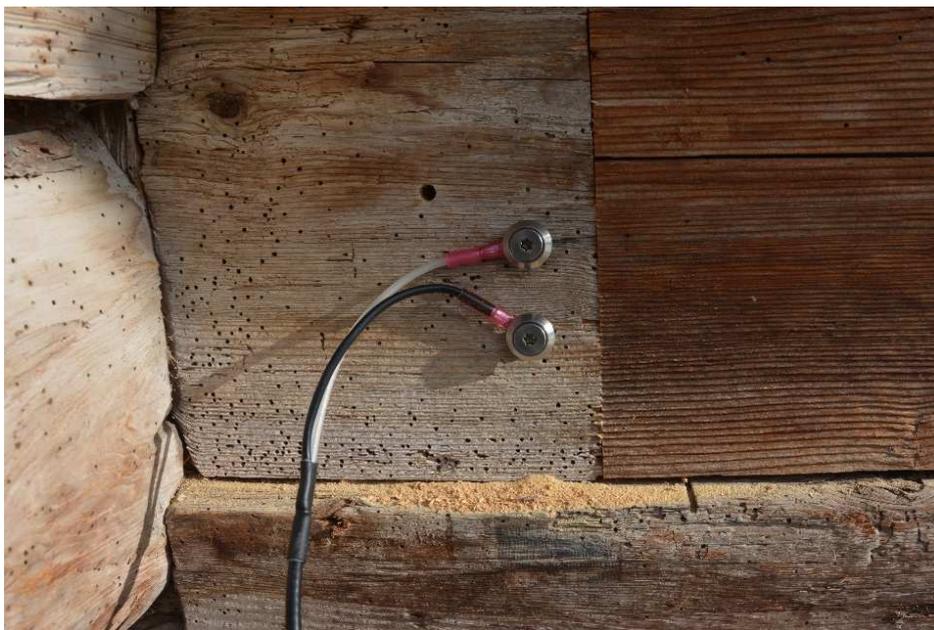


Abbildung 25: Fertig installierte Holzfeuchtemessung. Links oben ist das Probeloch zu erkennen. Dieses wird anschließend mit einem Holzdübel verschlossen

4.2 Hinterlüftung mittels Luftkanälen

Bezugnehmend auf die Idee einer Hinterlüftung mittels Luftkanälen von (Ojanen, 2007) wird mit der Software DELPHIN eine zweidimensionale Simulation durchgeführt. Die Simulation beinhaltet einen horizontalen Schnitt durch die Bestandswand vom Hof „Neuhäusl“. Die Luftkanäle sind in einen Abstand von 600 mm angeordnet, was in etwa einem Standardmaß für eine Kammer einer Ständerwand entspricht. Es soll untersucht werden, welche Effekte durch den Luftkanal in Bezug auf die Holzfeuchte und den Mould growth Index entstehen.

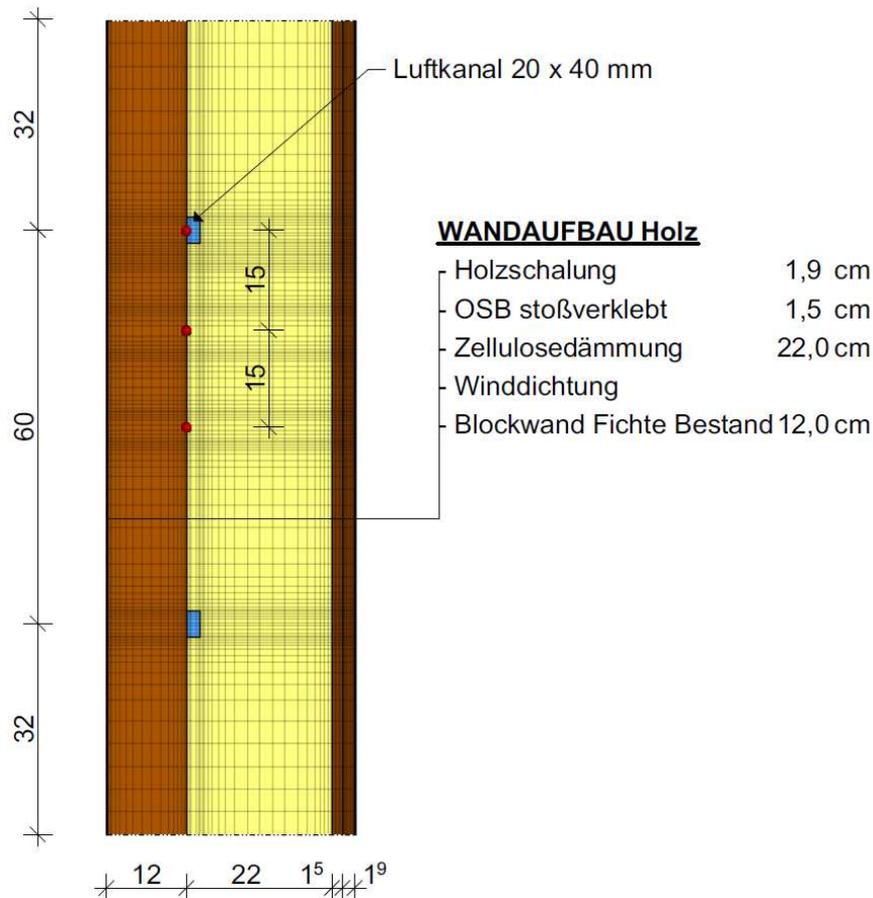


Abbildung 26: Screenshot vom Wandaufbau und der Diskretisierung des simulierten Wandabschnittes. An den roten Punkten wird der Verlauf von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchte aufgezeichnet. (Luftkanal, $\frac{1}{4}$ Kammer, $\frac{1}{2}$ Kammer)

4.2.1 Definition der Randbedingungen

Die Randbedingungen für die Simulation entsprechen den Randbedingungen des vorherigen Kapitels und werden hier nicht gesondert angeführt. In der Simulation wird kein Schlagregen und keine Sonneneinstrahlung berücksichtigt. Für das Außen- und Innenklima werden wiederum die Datenpunkte der Universität Innsbruck verwendet. Die Übergangskoeffizienten für außen und innen sind der Tabelle 13 zu entnehmen und entsprechen wiederum den Vorgaben lt. (WTA 6-2 2014). Für die Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten des Luftkanales wird eine Berechnung durchgeführt.

Bauteiloberfläche	Wärmeübergangskoeffizient h [W/(m ² ·K)]		Wasserdampfübergangskoeffizient β [s/m]
Außen	17		75 x 10 ⁻⁹
Innen	8		25 x 10 ⁻⁹
	h_c	h_r	
Luftkanal	4,90	3,85	37,59 x 10 ⁻⁹

Tabelle 13: kombinierte Wärmeübergangskoeffizienten h und β für die Simulationen der Hinterlüftung, bzw. Koeffizientenanteile h_c , h_r beim Luftkanal

Es wird der konvektive Anteil h_c und der Strahlungsanteil h_r berechnet. In der Folge wird näher auf den Rechengang eingegangen.

4.2.1.1 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h_c - Luftkanal

Beim konvektiven Anteil setzt man eine erzwungene Konvektion, infolge von Dichteunterschieden in der Luft voraus. Somit kann man sich den Kanal, wie mit einem Ventilator belüftet vorstellen. Für eine freie Konvektion wäre der Luftraum im Kanal zu klein um plausible Ergebnisse zu erhalten.

Als erstes muss die Geschwindigkeit der Luftströmung abgeschätzt werden. Einen ersten Ansatz dazu, liefert der Auftrieb durch die sogenannte Kaminwirkung. Dieser entsteht durch die Erwärmung der Luft im Luftkanal. Dabei stellt sich durch die Dichteunterschiede der Luft eine Druckdifferenz ein. Diese kann laut (Zürcher und Frank, 2018, S. 107) wie folgt berechnet werden:

$$\Delta p(z') = p_m \cdot \frac{1}{R_a} \cdot g \cdot z' \cdot \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_c} \right) \quad (4.1)$$

mit

$\Delta p(z')$	Druckdifferenz infolge des Kamineffektes	[Pa]
p_m	Atmosphärendruck	[Pa]
R_a	spez. Gaskonstante, trockene Luft	278,1 [J·(kg·K) ⁻¹]
g	Erdbeschleunigung	[m·s ⁻²]
z'	Länge Kanal	[m]
T_e	Außentemperatur	[K]
T_c	Temperatur im Kanal	[K]

Um die Druckdifferenz zu berechnen, muss die sich im Kanal einstellende Temperatur ermittelt werden. Diese ist wiederum vom Volumenstrom und dem Wärmeübergangskoeffizienten abhängig. Somit ist die ganze Berechnung ein iterativer Prozess. Die Temperatur im Kanal kann mit einer Energiebilanz abgeschätzt werden. Die Gesamtleistung \dot{q}_1 teilt sich in die durch die Holzwand austretende Leistung \dot{q}_2 und die durch die Luft aufgenommen Leistung \dot{q}_l auf (Abbildung 27). Diese Leistungsströme sind von ihren Umgebungstemperaturen abhängig. In der Abbildung 27 ist der Knotenpunkt dargestellt. Die Außentemperatur

ϑ_a sowie die Innentemperatur ϑ_i sind bekannt. Die Anfangstemperatur ϑ_{n-1} entspricht der Außentemperatur und wird infolge der Leistung \dot{q}_1 auf die Temperatur ϑ_{n+1} erwärmt. Da sich die Temperatur nicht linear über die Höhe erwärmt bzw. durch die Erwärmung der Wärmestrom Q_1 abnimmt, wird die Temperatur in der Höhe z' über die logarithmische Temperaturdifferenz Δt_{log} abgeschätzt. Genauere Werte würde man durch den Aufbau einer Tridiagonalmatrix erhalten, jedoch reicht eine Abschätzung über Δt_{log} für eine Näherung aus.

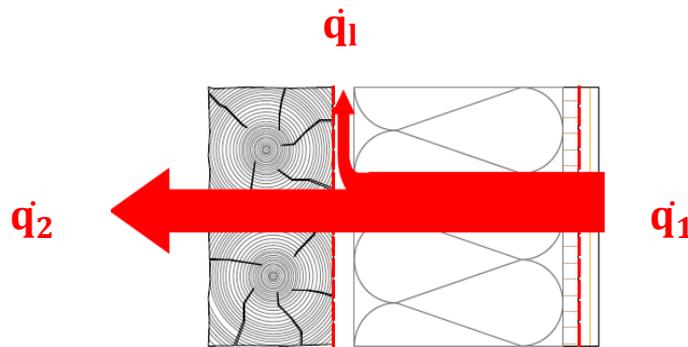


Abbildung 27: Leistungsströme im Wandaufbau mit Luftkanal

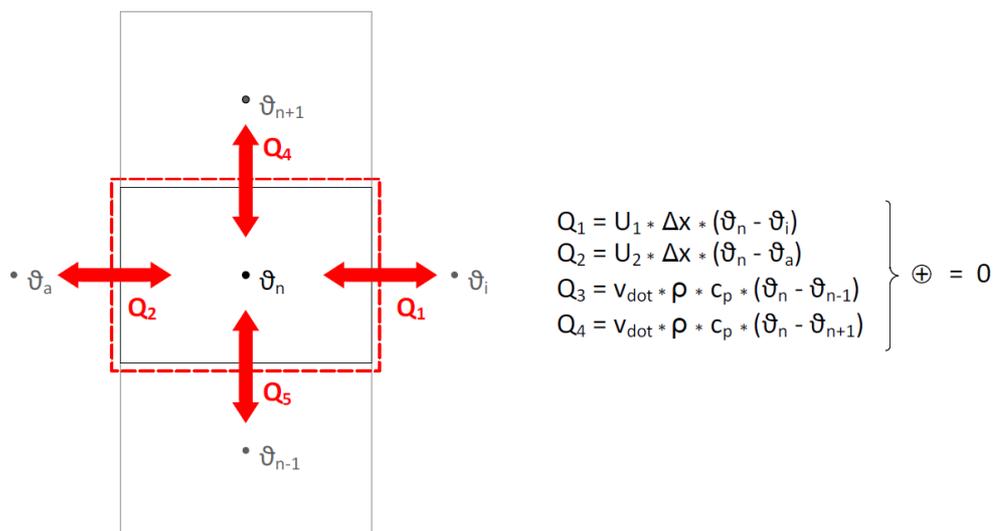


Abbildung 28: Energiebilanz im Knotenpunkt des Kanals

Die logarithmische Temperaturdifferenz errechnet sich laut folgender Formel:

$$\Delta t_{log} = \frac{\Delta t_a - t_0}{\ln\left(\frac{\Delta t_a}{\Delta t_0}\right)} \quad (4.2)$$

mit		
Δt_{log}	logarithmische Temperaturdifferenz	[K]
Δt_0	Temperaturdifferenz $\vartheta_a - \vartheta_i$	[K]
Δt_a	Temperaturdifferenz $\vartheta_i - \vartheta(z')$	[K]

Setz man die von (Ojanen, 2007, S.8) vorgeschlagene Strömungsgeschwindigkeit von 0,16 m/s, eine Innentemperatur von 20 °C und eine Außentemperatur von 0°C voraus, ergibt sich bei einem 2,5 m langen Kanal und einem Wandaufbau, der dem des Hofes „Neuhäusl“ entspricht, eine Luftherwärmung von ca. 1,5 °C. Da beim Hof Neuhäusl eine 22 cm starke Innendämmung angebracht wird, erreicht man die Temperaturerwärmung von 3°C, welche von (Ojanen, 2007, S.8) vorgeschlagen wird, nicht. Dies hängt natürlich vom erhöhten Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung ab. Mit dieser Untersuchung wird festgestellt, ob ein Luftkanal - gerade bei hohen Dämmstärken - eine Trocknung verursacht, da die Thematik bei geringen Dämmstärken ohnehin viel unkritischer betrachtet werden kann.

Mit Hilfe der Temperatur für die Luftherwärmung kann nach (4.1) $\Delta p(z')$ berechnet werden. Unter den zuvor beschriebenen Randbedingungen ergibt sich eine Druckdifferenz von ca. 0,17 Pa. Nun müssen noch die Reibungsverluste des Kanales berücksichtigt werden. Diese werden laut. (Schnieders, Feist, Pfluger, Kah, 2001) wie folgt berechnet:

$$\Delta p = f \cdot \frac{l}{d_{hyd}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_c^2 \quad (4.3)$$

mit

Δp	Druckdifferenz	[Pa]
f	Reibungszahl	[-]
l	Kanallänge	[m]
d_{hyd}	hydraulischer Durchmesser $d_{hyd} = \frac{2 \cdot a \cdot b}{a+b}$	[m]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
v_c	mittlere Luftgeschwindigkeit im Kanal	[m/s]

Setzt man für die Berechnung von Δp wiederum die Strömungsgeschwindigkeit von 0,16 m/s voraus, hängt der Reibungsverlust extrem stark von der Reibungszahl f ab. Eine Reibungszahl von 0,02 würde bereits einen Reibungsverlust von 0,16 Pascal bewirken. Somit müsste der Kanal extrem glatt und zugleich diffusionsoffen sein, damit überhaupt ein Effekt erzielt werden könnte. Dieser Aspekt wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter vertieft. Hier müssten Versuche durchgeführt werden, um überhaupt eine Luftzirkulation im Kanal nachzuweisen.

Ich möchte in der Folge die Untersuchung mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,16 m/s fortsetzen, um zu untersuchen, ob der Luftkanal auch zwischen den Kanälen eine Verbesserung des Mould growth Index bewirken könnte.

Um den Wärmeübergangskoeffizienten auf dieser Grundlage zu berechnen, muss die **Nusselt-Zahl** für eine erzwungene Konvektion in Rechteckkanälen ermittelt werden. Diese ist laut (Marek und Nitsche, 2011, S. 186) von der **Reynolds-Zahl** und der **Prandtl-Zahl** abhängig. Für das Medium Luft kann die Prandtl-Zahl in guter Näherung mit 0,7 angenommen werden. Die Reynolds-Zahl wird wie folgt berechnet:

$$Re = \frac{v_c \cdot d_{hyd}}{\nu} \quad (4.4)$$

mit		
Re	Reynold-Zahl	[-]
v_c	mittlere Luftgeschwindigkeit	[m/s]
d_{hyd}	hydraulischer Durchmesser	[m]
ν	kinematische Viskosität	[$10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Für einen 20 x 40 mm großen Kanal ergibt sich der hydraulische Durchmesser zu 0,0267 Meter. Die kinematische Viskosität beträgt bei 0°C in etwa $135,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$. Somit ergibt sich eine Reynolds-Zahl von:

$$Re = 315,58 < 2300 \rightarrow \textit{laminere Strömung}$$

Durch diese Information kann die Nusselt-Zahl für eine laminare Strömung und eine erzwungene Konvektion laut (HTflux Engineering GmbH) wie folgt berechnet werden:

$$Nu = \sqrt[3]{3,66^3 + 0,7^3 + \left(1,615 \cdot \sqrt[3]{Re \cdot Pr \cdot \frac{d_{hyd}}{l}} - 0,7\right)^3} \quad (4.5)$$

Die Kanallänge resultiert aus der Annahme eines Geschoßes und wird mit 2,50 m gewählt. Nach dem Einsetzen aller Parameter ergibt sich Nusselt zu:

$$Nu = 3,74 \text{ [-]}$$

Mithilfe der Nusselt-Zahl kann der konvektive Anteil berechnet werden:

$$h_c = \frac{\lambda_{Luft}}{L} \cdot Nu \quad (4.6)$$

mit		
h_c	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	[$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$]
λ_{Luft}	Wärmeleitfähigkeit der Luft	0,0262 [W · (m ² ·K) ⁻¹]

Somit ergibt sich ein konvektiver Wärmeübergangskoeffizient von:

$$h_c = 4,90 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

4.2.1.2 Strahlung Wärmeübergangskoeffizient Luftkanal

Um den Strahlungsanteil vom Wärmeübergangskoeffizienten zu berechnen, kommt wiederum ein iteratives Verfahren zur Anwendung. Unter Annahme eines Wärmeübergangskoeffizienten werden die Oberflächentemperaturen vom Kanal berechnet. Anhand dieser Oberflächentemperaturen wird der Koeffizient für den Strahlungsanteil berechnet und in die Anfangsrechnung eingesetzt.

Um die Oberflächentemperaturen zu berechnen, wird wiederum der Wandaufbau vom Hof „Neuhäusli“ herangezogen. Die sich einstellenden Temperaturen an der Kanaloberfläche, sowie die U-Werte der einzelnen Wandabschnitte sind der Abbildung 29 zu entnehmen.

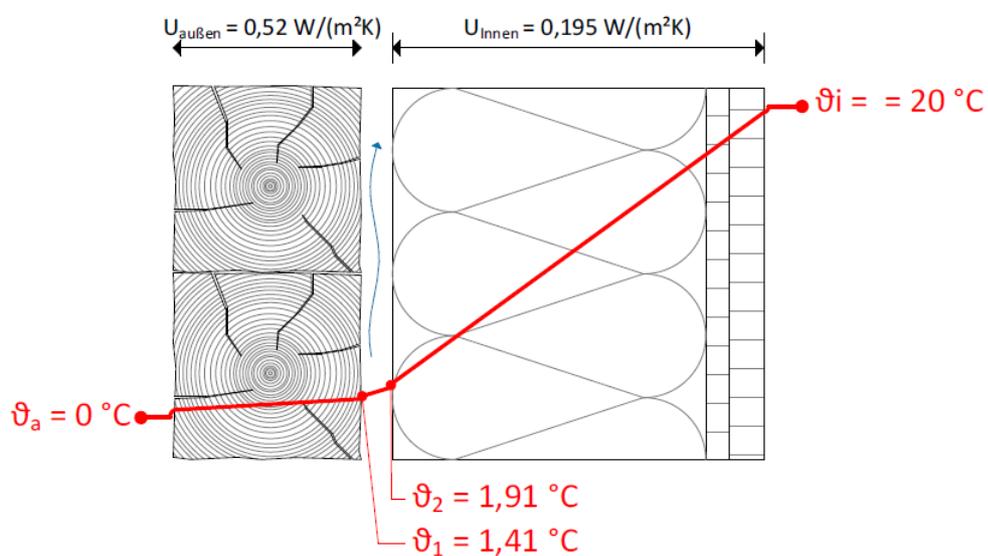


Abbildung 29: Temperaturverlauf im Bereich des Luftkanals bei einer Innentemperatur von 20 °C und einer Außentemperatur von 0 °C

Der Strahlungsaustausch zwischen zwei gegenüberliegenden Oberflächen kann laut (Zürcher und Frank, 2018, S.31) wie folgt beschrieben werden:

$$q_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4.7)$$

mit

q_{12}	spezifische Strahlungsleistung	[W/m ²]
$\varepsilon_{1,2}$	Emissionsgrad	[-]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,67 \cdot 10^{-8}$	[W · (m ² · K ⁴) ⁻¹]
$T_{1,2}$	Oberflächentemperatur	[K]

In der Klammer der Temperaturdifferenz kann $(T_1 - T_2)$ herausgehoben werden. Es vereinfacht sich die Formel (4.7) laut (Feist, Pfluger, Ochs, Janetti, Seibl, 2011, S.51) wie folgt:

$$q_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) \cdot (T_1 - T_2) \quad (4.8)$$

bzw.

$$q_{12} = h_s \cdot (T_1 - T_2)$$

Für den Emissionsgrad wird ein Faktor von 0,9 angesetzt. Somit ergibt sich für den Strahlungsanteil des Wärmeübergangskoeffizienten nach Einsetzen aller Parameter ein Wert von:

$$h_s = 3,85 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$$

Für die Simulation wird für den Luftkanal folgende Zusammenstellung des kombinierten Wärmeübergangskoeffizienten angesetzt:

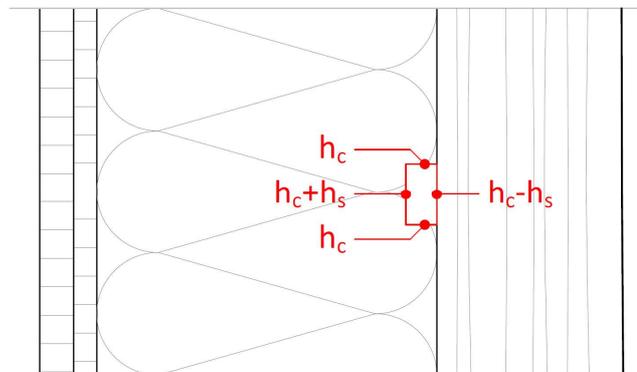


Abbildung 30: Zusammenstellung des Wärmeübergangskoeffizienten im Luftkanal

Mit Hilfe der Gleichung (2.9) kann in der Folge aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Wasserdampfübergangskoeffizient β bestimmt werden.

$$\beta = 37,59 \cdot 10^{-9} [\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})^{-1} = \text{s} \cdot \text{m}^{-1}]$$

4.2.2 Hygrothermische Simulation

Um im Kanal einen Luftwechsel zu simulieren, wird den Elementen im Luftkanal als Quelle ein Luftaustausch mit der Außenluft aufgeprägt. Der Luftwechsel wird mit einem Volumenstrom von $0,000128 \text{ m}^3/\text{s}$ (ca. $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$) angegeben. Dies entspricht dem Volumenstrom bei $0,16 \text{ m/s}$ und einem Querschnitt von $20 \times 40 \text{ mm}$ im Luftkanal.

Da der Volumenstrom immer von der Außentemperatur abhängig ist, wird in einer Variante durch einen Sinusverlauf des Volumenstromes eine Auswirkung der Temperaturunterschiede untersucht. Somit herrscht im Winter und Sommer die größte Temperaturabweichung von der Innenraumtemperatur und folglich auch der größte Luftaustausch infolge des Kamineffektes. Im Frühjahr und Herbst sind die Temperaturen ausgeglichener und der Kamineffekt kommt zum Erliegen. Natürlich herrschen zu jeder Jahreszeit über den Tagesverlauf größere

Temperaturschwankungen, diese Variante soll jedoch nur eine Tendenz veranschaulichen.

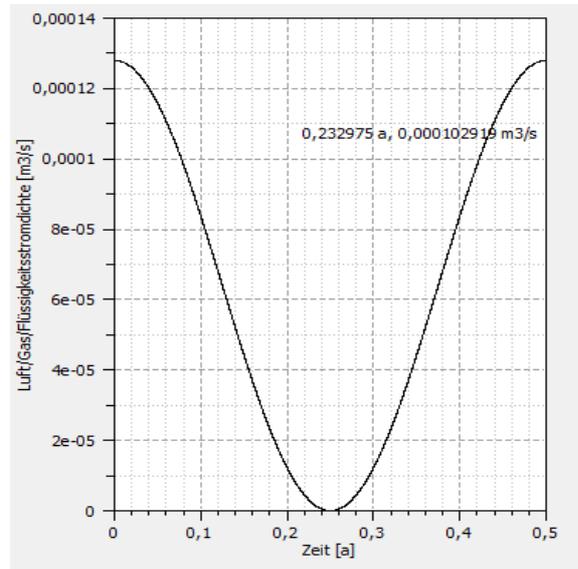


Abbildung 31: Verlauf des Volumenstromes als Sinusfunktion halbjährlich

Für die Anfangsbedingungen werden wiederum eine Standardtemperatur von 20 °C und eine Standardanfängsfeuchte von 80 % gewählt. Die Simulationsdauer beträgt 5 Jahre. Die Diskretisierung erfolgt automatisch in einem Bereich von 3 – 50 mm.

5 Ergebnisse

5.1 Hof „Neuhäusl“

Das 300 Jahre alte Gebäude in Scheffau in Tirol wurde im Jahr 2018 unter der Planung des Architekten DI Hans-Peter Gruber zur Gänze saniert. Die Besonderheit dieser Sanierung liegt in der Tatsache, dass der historische Hof einen Heizwärmebedarf von 17 kWh/(m²-a) aufweist und somit fast Passivhausstandard erreicht. Diese Energieeffizienz wird durch eine 22 cm dicke Zelluloseeinblasdämmung und eine kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung erreicht. Durch die hohe Dämmstärke sind eine genaue Betrachtung der bauphysikalischen Vorgänge sowie eine sorgfältige Detailplanung unabdingbar. In der Folge werden diese Detaillösungen vorgestellt und analysiert und die Ergebnisse der Messung am Bestand vorgestellt.

Zuvor wird kurz auf den Ablauf der Sanierung eingegangen. Wie man in der Abbildung 32 erkennen kann, ist nur der vordere Teil des Hofes erhalten worden. Der hintere Teil war bereits so stark beschädigt, dass eine Sanierung kaum möglich war. Um trotzdem möglichst viel vom „alten Flair“ zu konservieren, wurde die Tragstruktur des hinteren Bereiches abgetragen, nummeriert und wiederum in den Innenraum integriert. In der Abbildung 33 ist die Kombination zwischen alter Struktur und neuer Außenwand sehr gut ersichtlich.



Abbildung 32: Südostansicht Hof „Neuhäusl“ (Foto: Schreyer David)

Der Blockbau des südlichen Bereiches war im Grunde unbeschädigt, jedoch war die Raumhöhe im Erdgeschoß für eine zeitgemäße Nutzung zu gering. Um eine Raumhöhe von 2,50 m zu erreichen, wurde - in einer recht abenteuerlichen Aktion - der gesamte Holzbau mittels Holzstützen, welche an die Blockwände befestigt wurden, aufgeständert. Damit die Blockwände in sich zusammenhielten, wurden diese mit Spanngurten zusammengezurr.



Abbildung 33: Alte Tragstruktur im hinteren Bereich (Foto: Schreyer David)

Nach der Aufständigung wurde das gesamte Gebäude untergraben und eine Stahlbetonfundamentplatte inkl. Sockelwände betoniert. In den folgenden Monaten erfolgte der Innenausbau, auf den in den einzelnen Detaillösungen nun näher eingegangen wird.

5.1.1 Detailbetrachtungen

In den nachstehenden Absätzen werden die wichtigsten Detailpunkte des Gebäudes vorgestellt. Herr DI Gruber erklärte in mehreren Gesprächen den Hintergrund der Detaillösungen, wies aber auch selbstkritisch auf eventuell verbesserungswürdige Punkte hin.

5.1.1.1 Wandaufbau

Um das äußere Erscheinungsbild des Bauernhauses zu erhalten, war man gezwungen eine konsequente Innendämmung umzusetzen. Dies wurde bei der Wand durch eine 22 cm starke Zellulosedämmung erreicht. Der Wandaufbau ist der Tabelle 14 zu entnehmen. Der Aufbau entspricht einem diffusionsbremsenden Innendämmsystem. Die Dampfbremse wurde durch eine verklebte OSB-Platte (15 mm), welche zugleich die luftdichte Ebene bildet, realisiert. Laut Herstellerangaben der Firma Norbord kann die Platte gemäß (DIN 4108-7) als luftdicht angesehen werden. Für den Diffusionswiderstand wird ein μ von 200-300 angegeben. Bei einer Plattendicke von 15 mm ergibt dies einen Sd-Wert von 3,0 – 4,5 m. Der Aufbau wurde vor der Bauausführung mit der Software WUFI hygrothermisch simuliert und geprüft. Die Ergebnisse ergaben trotz der hohen Dämmstärke keine kritischen Werte. Dies kann zum einen an den positiven Eigenschaften der Zellulosedämmung liegen, zum anderen wirkt sich jedoch auch der erhöhte Wärmedurchlasswiderstand der

Holzwand und die damit erhöhte Temperatur in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Außenwand positiv auf das Ergebnis aus.

Stärke [cm]	Bezeichnung	Fabrikat
1,90	Holzschalung	
1,50	OSB stoßverklebt	Norbord OSB 4
22,00	Zellulosedämmung	Termex®
-	Stegträger	Fa. Steico
-	Winddichtung	Delta Vent S
12,00	Blockwand Fichte	

Tabelle 14: Wandaufbau Hof Neuhäusl

Mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen mit der Software DELPHIN wird in der Folge untersucht, warum dieser Wandaufbau im Detail funktioniert bzw. ob dieser auch bei ungünstigen Materialparametern als unkritisch zu beurteilen ist.

Die Beurteilung erfolgt über den Mould growth Index, wie in Kapitel 2.1.7.2 beschrieben. Der in Tabelle 14 dargestellte Wandaufbau wird mit den in der nachfolgenden Tabelle angeführten Materialien erstellt. Für die Holzschalung innen und die Blockwand außen wird eine Fichte mit sehr positiven Eigenschaften gewählt. Dieses Material hat für Fichtenholz einen hervorragenden λ – Wert und ist relativ diffusionsoffen. In der Variante 11 und 12 wird das Material gegen eine weitaus diffusionsdichtere Fichte ausgetauscht, um die Auswirkungen von verschiedenen Materialparameter aufzuzeigen.

Name	ID	Hersteller	ρ [kg/m³]	λ [W/mK]	c_p [J/kgK]	μ [-]	w80 [kg/m³]	wsat [kg/m³]	Porosität [m³/m³]
Zellulose Einblasdämmung	500	Angelbachtal GmbH	55	0,048	2544	2,05	6,33	780,00	0,926
OSB board mitsum	421		640	0,102	1880	191,04	71,38	570,00	0,600
Fichte radial/tangential	626		425	0,079	1245	73,00	72,56	590,17	0,752
Pavatex airtight layer	609		381	0,230	1000	187,53	0,33	345,12	0,666
<i>Fichte SW Radial</i>	460		520	<i>0,130</i>	1189	236,22	67,65	691,97	<i>0,695</i>
<i>Mineral Wool 035</i>	731		67	<i>0,035</i>	840	1,00	0,10	900,00	<i>0,920</i>

Tabelle 15: Materialeigenschaften der simulierten Aufbauten. Die kursiv geschriebenen Materialien werden in der V9, V11 und V12 verwendet.

Alle Varianten werden mit einem Referenzfall verglichen. Dieser entspricht der Variante 1. Die Varianten 2 - 5 bilden verschiedene klimatische Randbedingungen ab. Bei V5 - V9 werden die Dämmstärken variiert sowie ein Vergleich mit einer Mineralwolldämmung gezogen. In der Tabelle 16 sind sämtliche Varianten zur besseren Übersicht zusammengestellt.

5 Ergebnisse

Var.	WRL	Schlagr.	Sonne	Ausricht.	Dämmstärke [mm]	Dämmm.	Fichtenart Blockw.	Fichtenart Innenoberfl.	Dampfbrem.
V1	ja	nein	nein	-	220	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V2	nein	nein	nein	-	220	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V3	ja	ja	ja	West	220	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V4	ja	ja	ja	Süd	220	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V5	ja	nein	ja	Süd	220	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V6	ja	nein	nein	-	150	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V7	ja	nein	nein	-	100	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V8	ja	nein	nein	-	50	Zellulose	ID 626	ID 626	OSB
V9	ja	nein	nein	-	220	Mineralw.	ID 626	ID 626	OSB
V10	ja	nein	nein	-	220	Zellulose	ID 626	ID 626	Feuchte-adaptive
V11	ja	nein	nein	-	220	Zellulose	ID 460	ID 626	OSB
V12	ja	nein	nein	-	220	Zellulose	ID 626	ID 460	OSB

Tabelle 16: Variantenzusammenstellungen für die Simulationen des Wandaufbaus beim Hof „Neuhäusl“

Als erstes wird auf die Ergebnisse bei der Variation der Klimarandbedingungen eingegangen. Im Referenzfall ist keine Sonneneinstrahlung sowie keine Schlagregenbelastung berücksichtigt. Der Innenraum wird durch eine Wohnraumlüftung belüftet. In der Abbildung 35 sind die minimale und maximale Holzfeuchte an der Innenseite der Holzblockwand im eingeschwungenen Zustand aufgetragen. Verzichtet man auf eine Wohnraumlüftung, steigt diese um ca. 3 % an. Viel deutlicher wird der Unterschied beim Mould growth Index. Erreicht der Referenzfall nach ca. 3,5 Jahren unkritische Werte, steigt der Index bei der Variante 2 sogar noch weiter an und liegt deutlich über dem Grenzwert von 1. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Berechnung des Mould growth Index unter der Annahme von hoch sensiblen Oberflächenbedingungen erfolgt. Damit liegt man zwar auf der sicheren Seite, jedoch fallen die Ergebnisse bei der Wahl von einer „normalen“ Oberflächenempfindlichkeit deutlich besser aus. Abbildung 34 verdeutlicht den Unterschied.

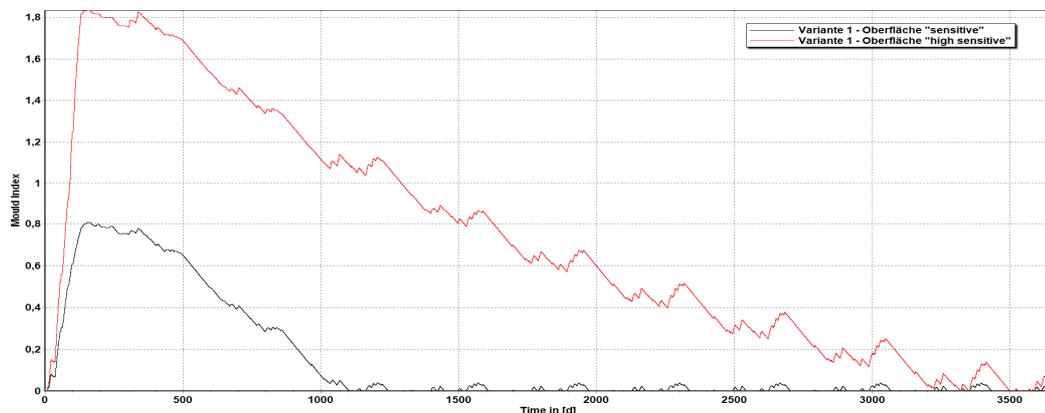


Abbildung 34: Mould growth Index in Abhängigkeit von der Oberflächenempfindlichkeit, rot „hoch sensibel“, schwarz „sensibel“.

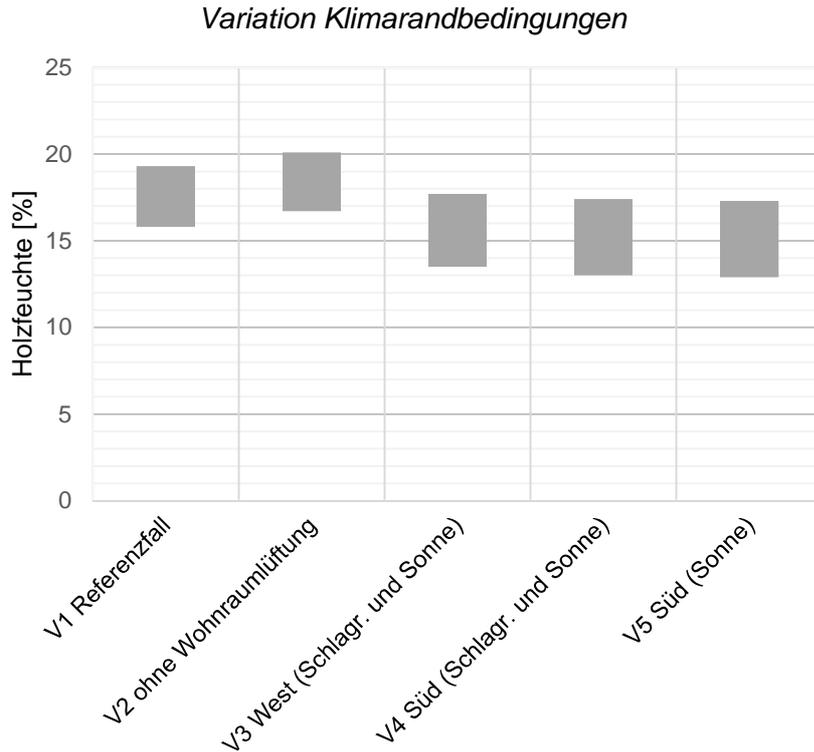


Abbildung 35: Holzfeuchte auf der Innenseite der Holzblockwand, unter Berücksichtigung von verschiedenen Klimarandbedingungen

Berücksichtigt man die Klimarandbedingungen für Solarstrahlung und Schlagregen, verbessern sich die Ergebnisse deutlich. Durch die Sonne wird die Oberfläche der äußeren Holzschicht trockener, was zu einer erhöhten Austrocknung der Konstruktion führt. Die Ergebnisse für den Schlagregen sind in Bezug auf Kap. 4.1.2.1 mit großer Vorsicht zu beurteilen. Die Einflüsse führen nur zu minimalen Ergebnisunterschieden, was wohl kaum der Realität entsprechen dürfte.

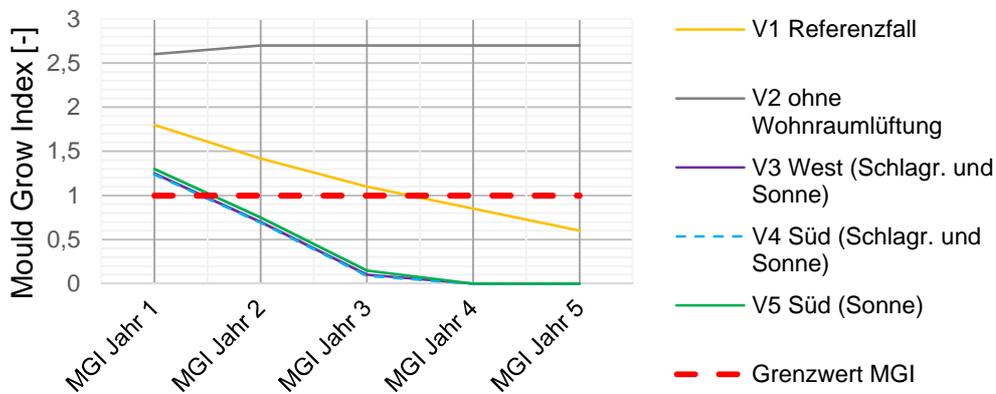


Abbildung 36: Mould growth Index V1 – V5

Im Kapitel 3.1.1 wurde der Ansatz „Mehr Dämmung weniger Feuchte“ vorgestellt. Da der Aufbau beim Hof „Neuhäusl“ durch die Blockwand genau der Fragestellung von 3.1.1 entspricht, wird durch die Variation der Dämmstärke diese Aussage überprüft. Die Ergebnisse beziehen sich wiederum auf den Mould growth Index. Eine reine Betrachtung der relativen Luftfeuchtigkeit hätte keine hohe Aussagekraft, da sich durch die unterschiedlichen Dämmstärken auch die Temperatur an der Innenoberfläche der Holzwand massiv verändert.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 36 verbildlicht. Ein positiver Effekt durch eine stärkere Dämmung kann nicht bestätigt werden. Dies könnte an der sehr niedrigen Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von Zellulose liegen.

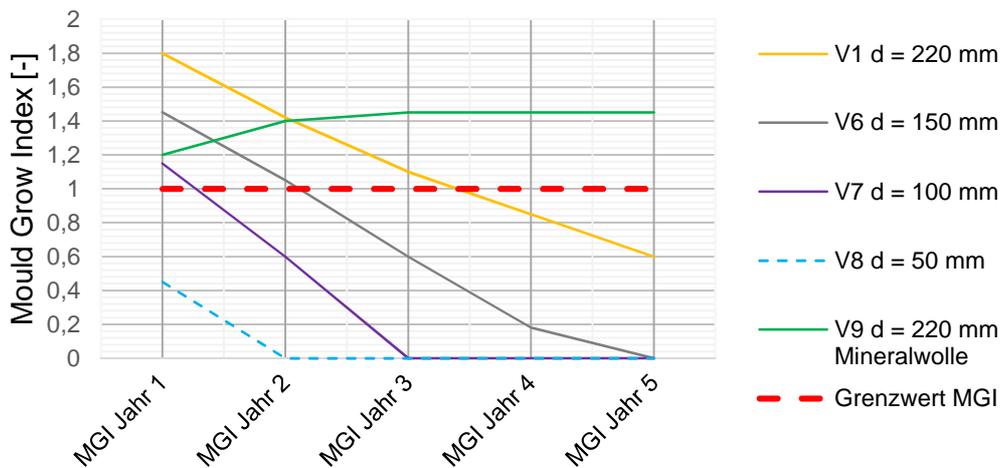


Abbildung 37: Mould growth Index V6 – V9

Auch der Temperaturverlauf der Grenzschicht unterscheidet sich bei diesem Beispiel stark vom angeführten Beispiel im Kap. 3.1.1. Durch die Holzaußenwand findet der Temperaturrückgang pro zusätzlichem Zentimeter Dämmung auf einem viel höheren Temperaturniveau statt. Betrachtet man ein Mollier-h-x-Diagramm, wird klar, dass eine Temperaturdifferenz von einem Kelvin bei 10 °C einen viel größeren Einfluss auf die aufzunehmende Feuchtigkeit hat, als die gleiche Temperaturdifferenz bei 0°C.

Ich will dies kurz anhand eines Beispielles erläutern. Ausgehend von einer 50 mm starken Innendämmung auf einer 12 cm starken Holzblockwand und einer 20 cm starken Betonwand, wird die Dämmung auf 100 mm erhöht. Es stellt sich zwischen Dämmung und Außenwand in etwa der Temperaturverlauf lt. Abbildung 38 ein. Bei einer Außentemperatur von -10 °C und einer Innentemperatur von 20° C ergeben sich zwischen Dämmschicht und Außenwand beim Beton ca. -6,3 °C und bei der Holzwand 5,0 °C. Erhöht man nun die Dämmstärke, verringern sich diese Temperaturen beim Beton auf -7,9 °C und bei der Holzwand auf 0,5 °C. Vergleicht man bei diesen Temperaturdifferenzen die Feuchtedifferenz der absoluten Luftfeuchtigkeit, ergibt sich beim Beton eine Differenz von ca. 0,35 g/m³ Luft und bei der Holzwand von 1,78 g/m³ Luft. Somit müsste der Effekt der Erhöhung des S_d - Wertes bei einer Holzaußenwand mehr als 6-mal so groß sein, um das gleiche

Ergebnis wie bei einer Betonwand zu erzielen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Schimmelbildung bei höheren Temperaturen noch begünstigt wird.

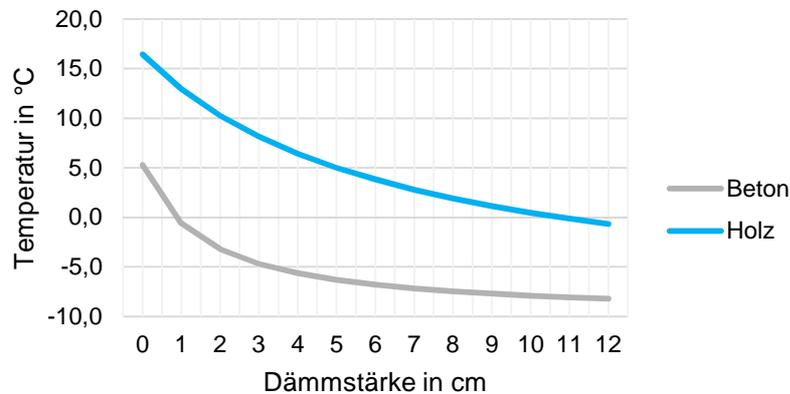


Abbildung 38: Temperaturverlauf zwischen Außenwand und Dämmung

Um den Effekt der Feuchtespeicherung bzw. Pufferung der Zellulose darzustellen, wird eine weitere Simulation mit Mineralwolle durchgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass dieses Dämmmaterial für eine Sanierung einer Holzblockwand in dieser Ausführung nicht geeignet ist.

Beim letzten Variantenvergleich möchte wird auf die Variation der Materialparameter eingegangen. In der Variante 10 wird die OSB-Platte durch eine feuchtheadaptive Dampfbremse ersetzt. Durch die erhöhte sommerliche Austrocknung nach innen sollte theoretisch ein besseres Ergebnis erzielt werden. Die Simulationsergebnisse bestätigen einen positiven Effekt. Baupraktisch muss man natürlich den Vorteil der OSB-Platte anerkennen. Diese hat ihre Vorzüge in der unkomplizierten Montage und der Funktion als Schalung für die Einblasdämmung.

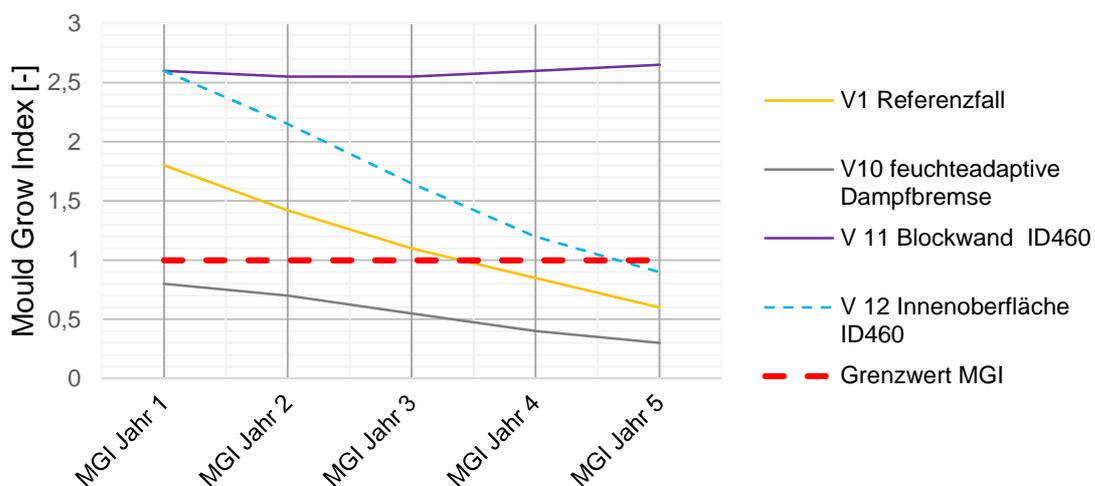


Abbildung 39: Mould growth Index V10 – V12

Bedenkliche Ergebnisse liefert die Variation der Materialparameter vom Baustoff Fichte. In der Materialdatenbank von DELPHIN sind mehrere, unterschiedliche Fichtenmaterialien hinterlegt. Bei der Variante 11 werden zwei relativ unterschiedliche Fichtenparameter für die Blockwand verwendet. Die gleiche Variation wird für die Beplankung der OSB-Platte im Innenraum vorgenommen. Mit dieser „diffusionsdichteren“ Fichte ergeben sich komplett andere Ergebnisse. Selbst die nur 19 mm starke Beplankung Innen, führt zu viel schlechteren MGI – Werten.

Mit diesen Ergebnissen soll ein Appell gesetzt werden. Eine Simulation ist für eine Innendämmung in dieser Stärke notwendig, jedoch ist die Wahl der Materialparameter ein entscheidender Faktor, ob eine Konstruktion funktioniert oder nicht. Aus diesem Grund ist es extrem wichtig, dass eine Bestandswand auf ihre genauen Eigenschaften untersucht wird beziehungsweise auch eine genaue Kenntnis der verbauten Materialparameter vorhanden ist. Ansonsten täuscht man mit der Simulation eine Genauigkeit vor, die es in Wahrheit gar nicht gibt!

5.1.1.2 Fundament / Sockelbereich

Die Detailplanung des Sockels stellt bei diesem Projekt einen Knackpunkt dar. Durch das Untergraben der gesamten Holzkonstruktion kann der komplette Boden- und Sockelbereich wie ein Neubau betrachtet werden. Aufsteigende Feuchte wird durch den 80 cm hohen Sockel sowie durch eine horizontale Feuchtigkeitsabdichtung auf der Stahlbetonwand verhindert. Von außen eindringende Feuchte wird durch eine einlagige Abdichtung (EKV5) gestoppt. In Abbildung 40 ist der Detailschnitt durch den Sockel zu sehen.

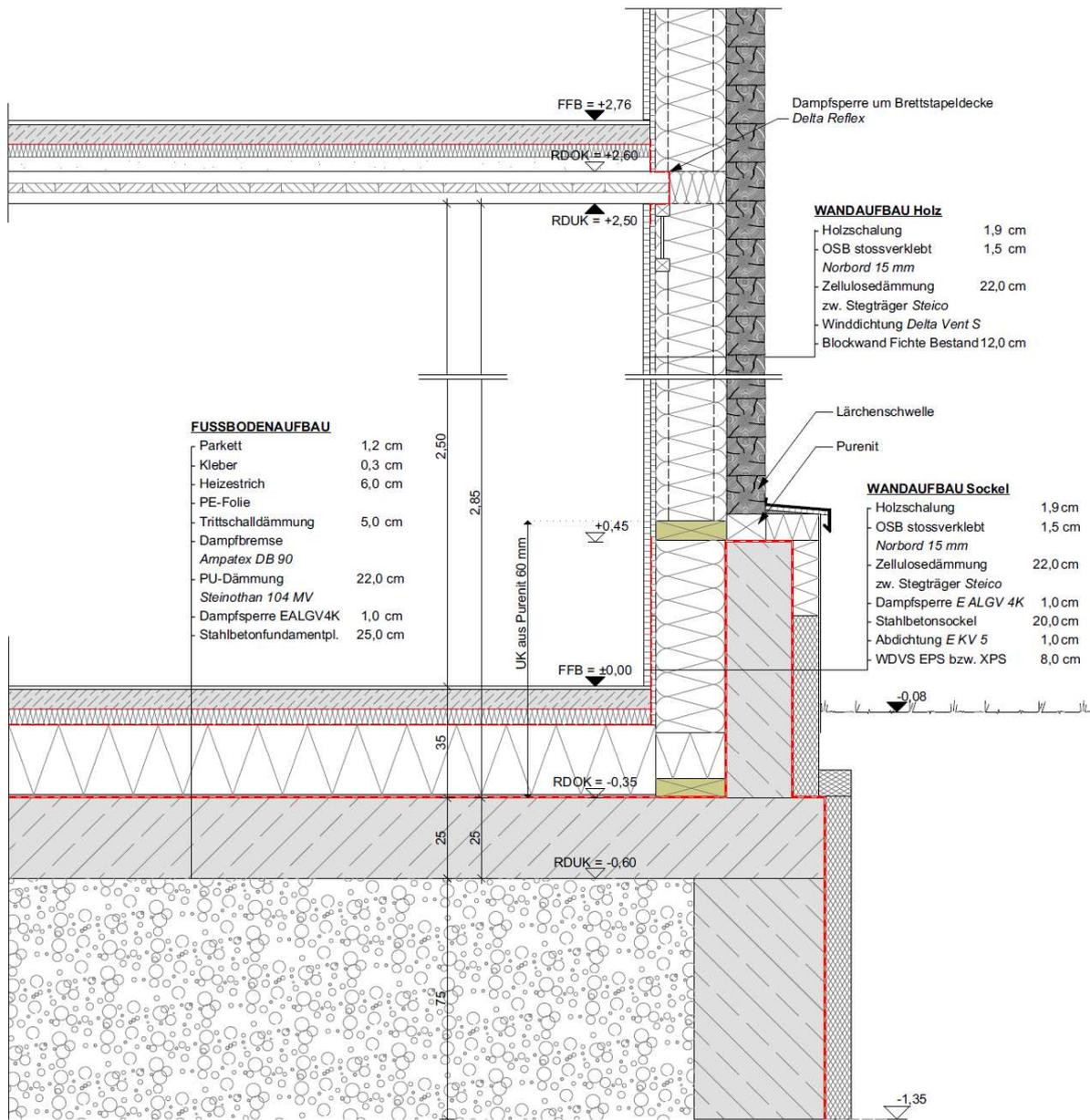


Abbildung 40: Sockeldetail Hof Neuhäusl nach DI Hans Peter Gruber

Da der Sockel als diffusionsdicht anzusehen ist, darf die Innenoberfläche der Betonwand nicht zu kalt sein. Dies wird durch eine 8 cm starke Außendämmung

erreicht. Um trotzdem den Diffusionseintrag im Bereich des Sockels zu minimieren, wird auf die PU-Dämmung der Bodenkonstruktion sowie der Innenschale im Sockelbereich eine Dampfbremse mit $S_d = 20 \text{ m}$ aufgebracht (Ampatex DB90). Dies erschwert zwar in den Sommermonaten das Austrocknungsverhalten nach innen, verhindert jedoch einen übermäßigen Diffusionseintrag in den unteren Bereich. Da der Dampfdiffusionsstrom dem Weg des geringsten Widerstandes folgt, muss man davon ausgehen, dass der Dampfdiffusionstransport auch nach oben, Richtung Holzwand, stattfindet.

Um auf Nummer sicher zu gehen, wird die Unterkonstruktion im Bereich des Betonsockels komplett aus feuchtebeständigem Purenit ausgeführt. (Abbildung 41)



Abbildung 41: Montage der Unterkonstruktion welche im Sockelbereich aus Purenit ausgeführt wurde (Foto: DI Hans Peter Gruber)

Um den Sockel möglichst genau abzubilden, wird eine zweidimensionale Simulation erstellt. Somit können die Effekte des geringeren Dampfdiffusionswiderstandes der Holzwand gegenüber dem des Sockels berücksichtigt werden. Bei dieser Simulation werden im Speziellen drei Punkte auf ihren Mould Growth Index geprüft. Die Mitte des Betonsockels, der Auflagerbereich der Holzwand, sowie die Holzwand ca. 70 cm über der Oberkante des Betonsockels. Durch die Simulation wird geprüft, ob im Auflagerbereich der Holzwand Probleme auftreten beziehungsweise ob es eine zusätzliche Feuchtebelastung für den herkömmlichen Wandaufbau, wie in Kap. 5.1.1.1 beschrieben, gibt.

In der Tabelle 17 sind die für die 2D - Simulation verwendeten Materialien und ihre Eigenschaften aufgelistet.

Name	ID	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	cp [J/kgK]	μ [-]	w80 [kg/m ³]	wsat [kg/m ³]	Porosität [m ³ /m ³]
OSB board mitsum	421	640	0,102	1880,00	191,04	71,38	570,00	0,600
Concrete B25	411	2320	2,100	850,00	110,00	58,21	142,99	0,143
Zellulose Einblasdämmung	580	55	0,048	2544,42	2,05	6,33	780,00	0,926
Unterputz leicht	482	1254	0,507	581,54	12,53	19,15	400,00	0,527
Mineralischer Edelputz	475	586	0,134	1197,86	12,64	38,07	360,00	0,779
EPS	186	35	0,040	1500,00	50,00	1,09	935,00	0,935
Bitumen	28	1200	0,145	2000	15000	0,01	2,50	0,003
Fichte radial/tangential	626	425	0,079	1245	73,00	72,56	590,17	0,752

Tabelle 17: verwendete Materialparameter für die Simulation des Sockeldetails

In der nachstehenden Abbildung sind die Ergebnisse der Simulation wiederum als Mould growth Index aufgetragen. Für den Betonsockel wird die Oberflächenempfindlichkeit sowie das Material zwischen „sensitive“ und „medium“ variiert. Man kann sehr gut erkennen, dass die Wahl der Unterkonstruktion aus Purenit im Sockelbereich durchaus ihre Berechtigung findet. Würde man hier ein empfindlicheres Material, wie Holz, verbauen, wäre ein Schimmelbefall wahrscheinlich – siehe Betonsockel sensitive.

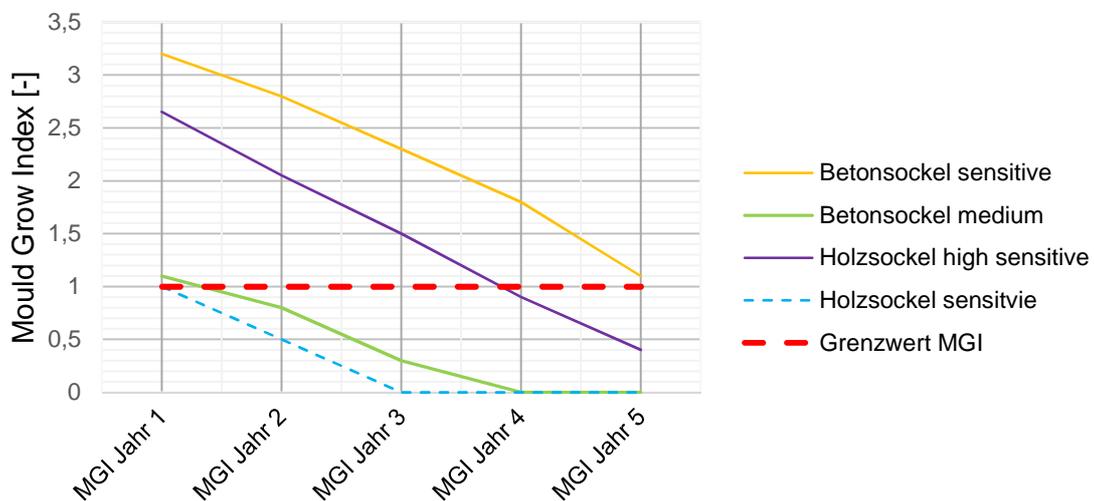


Abbildung 42: Mould growth Index am Betonsockel sowie am Auflager der Holzwand unter Variation der Oberflächenempfindlichkeit

Auch beim Auflager der Holzwand würde man bei der Wahl derselben Oberflächenempfindlichkeit wie in Kap. 5.1.1.1 kritische Werte erreichen. Jedoch muss bedacht werden, dass man mit der Oberflächenempfindlichkeit von „high sensitive“ auf der sehr sicheren Seite liegt. Bei der Wahl von „sensitive“ erreicht man

bereits Werte von unter 1,0. Beim Hof „Neuhäusl“ wird die erste Balkenlage sogar mit Purenit ausgeführt. Somit besteht erst recht keine Gefahr von Schimmel.

Eine zusätzliche Feuchtebelastung durch den Sockelaufbau kann für den herkömmlichen Wandaufbau nicht beobachtet werden.

5.1.1.3 Einbindung Innenwände / Innendecke

Die Einbindung der Innenwände sowie der Decke bringt immer Herausforderungen in Bezug auf die Luftdichtheit und der Wärmebrücken mit sich. Vor allem der luftdichte Anschluss an Innenblockwände, ist aufgrund der unebenen Oberfläche und der Risse im Holz problematisch. Das Durchstoßen der Dämmebene und der damit verbundene Abfall der Oberflächentemperaturen kann zu Problemen führen. Beim Hof „Neuhäusl“ wurde dieses Detail mit einer nicht durchgehenden Ständerkonstruktion gelöst, die, zugegebener Maßen, nicht gerade die günstigste Lösung ist, jedoch eine durchgehende luftdichte Ebene und einen wärmebrückenfreien Anschluss gewährleistet. Für die Umsetzung wurde ein Ständerwerk aus Holz erstellt. Dieses wurde beidseitig mit Altholz beplankt. Das Altholz bildeten in diesem Fall die alten Innenwände. Sie wurden in der Mitte durchgesägt und wurden zu einer 50 mm starken Schalung umfunktioniert. Somit konnten die Installationen hauptsächlich in die Innenwände verlegt werden und die Außenwände blieben von Installationen ungestört. In Abbildung 43 ist der schematische Aufbau und Anschluss der Innenwände dargestellt.

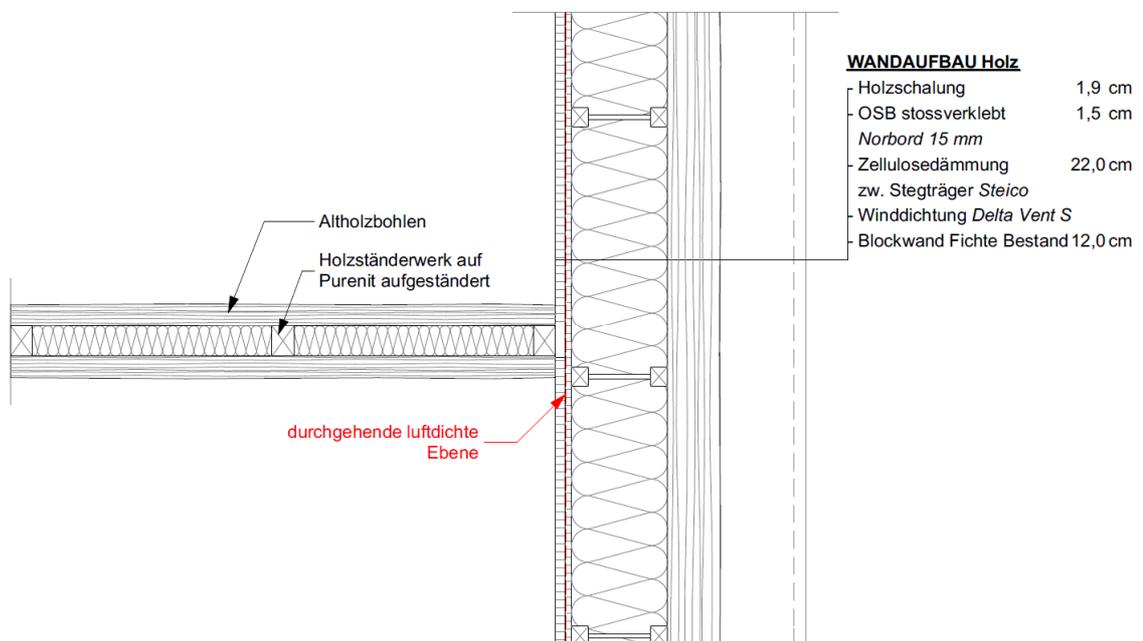


Abbildung 43: Prinzipdetail für den Anschluss der Innenwand zur Außenwand

Das Ständerwerk verläuft nur bis zur OSB-Platte der Außenwandkonstruktion. So bleibt zum einen die luftdichte Ebene komplett ungestört und zum anderen wird die

Dämmung an keiner Stelle durchbrochen oder geschwächt. Siehe dazu auch Abbildung 44.

Das Prinzip der wärmebrückenfreien Anschlüsse wurde auch bei der Einbindung der Decke konsequent durchgezogen. Durch die neue Aufteilung der Raumhöhen wurde eine 10 cm starke Brettsperrholzdecke in das Bestandsgebäude eingezogen. Um auch hier einen nahezu wärmebrückenfreien und luftdichten Anschluss zu gewährleisten, wurde die Holzdecke auf einen aufgestellten Steico-Träger aufgelagert.



Abbildung 44: Ständerwerk der Innenwände, die luftdichte Ebene (OSB-Platte) bleibt durchgehend erhalten (Foto: DI Hans Peter Gruber)

Im Detailschnitt der Abbildung 40 ist der Anschlusspunkt zu sehen. Somit wurde die ursprünglich Wandkonstruktion komplett von der neuen Decke getrennt. Um konvektive Feuchteinträge in die Dämmebene zu verhindern, wurde die Holzdecke mit einer Dampfsperre „umhüllt. Diese wurde wiederum oben und unten an die OSB-Ebene luftdicht angeschlossen. In der Abbildung 44 ist die Dampfsperre als silberne Folie zu erkennen.

Gerade bei alten Tramdecken ist der Anschluss der Trambalken zur Außenwand ein viel diskutiertes Thema. Bei solchen Tramdecken ist eine konvektive Hinterspülung der Balkenköpfe unbedingt zu verhindern. Des Weiteren sollte der restliche Wandaufbau nach außen diffusionsoffen gestaltet sein, um den Abtransport der diffundierten Feuchtigkeit zu fördern. Beim Hof „Neuhäusl“ wurde genau das Gegenteil gemacht. Eine konvektive „Umspülung“ der Stirnseite wird in keiner Weise erschwert und durch die Dampfsperre ein Abtransport nach außen verhindert.

Warum es trotzdem funktioniert, liegt an der Tatsache, dass der Randbereich der Decke mit über 17 cm Zellulose überdämmt wurde. Somit stellen sich an der Stirnseite der Decke kaum andere Temperaturen wie an der Wandoberfläche ein und die relative Luftfeuchtigkeit wird nur minimal erhöht.

5.1.1.4 Fenster

Um das historische Erscheinungsbild mit der Eigenschaft von zeitgemäßen, passivhaustauglichen Fenstern zu verbinden, wurde ein Fensterrahmen gewählt, der eine möglichst schmale Ansichtsbreite aufweist.

Mit dem Lignumma Fenster der Firma Optiwin, wurden diese Anforderungen erfüllt. Der Einbau erfolgte in der Dämmebene und entspricht im Grunde dem einer klassischen Neubauaußenwand, wobei in diesem Fall innen und außen vertauscht sind. Eine Verbesserung der Einbausituation könnte durch eine Überdämmung des Blendrahmens mit Dämmstoff anstelle des Konstruktionsholzes erfolgen.

Durch die Lage in der Dämmebene wurden nur kleine Leibungstiefen erzeugt, was sich positiv auf die Belichtung des Raumes auswirkt. Bei größeren Leibungstiefen kann eine Abschrägung der Innenleibung Abhilfe schaffen. Durch den schrägen Einbau verringert sich der Kontrast zwischen vertikaler Wand und der Leibung. Ein besserer Lichteinfall sowie ein optisch größer wirkendes Fenster sind die Folge. In Abbildung 45 ist der vertikale Schnitt durch ein Standardfenster am Hof „Neuhäusl“ abgebildet.

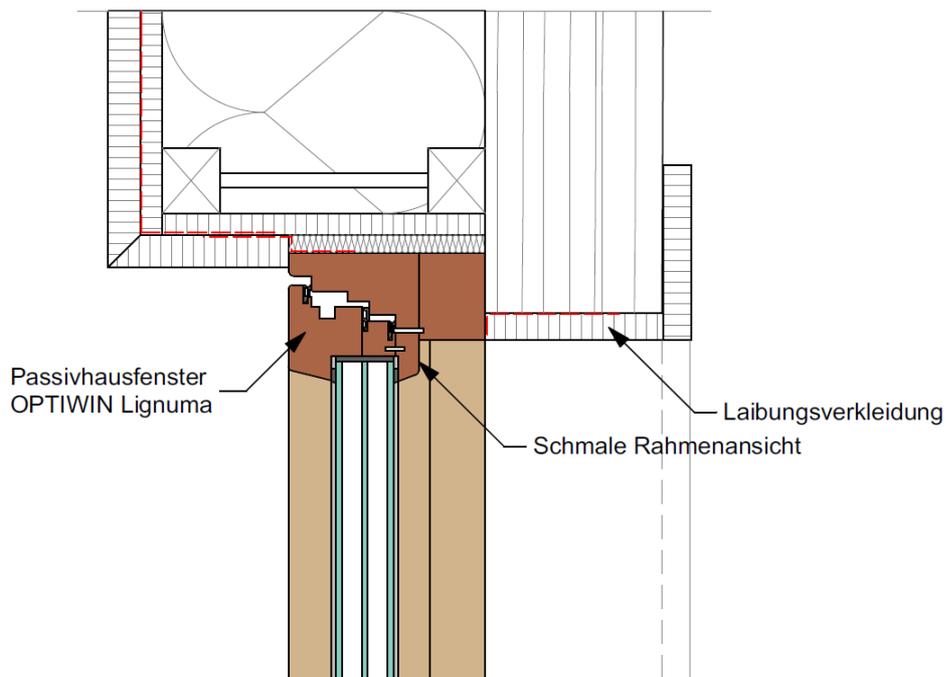


Abbildung 45: Vertikalschnitt durch das Fenster beim Hof „Neuhäusl“ nach DI Hans Peter Gruber

5.1.1.5 Dachanschluss

Auf das Dach wird nicht näher eingegangen, da es sich im Grunde nur um einen herkömmlichen Sichtdachstuhl mit einer Aufsparrendämmung handelt. Um die rustikale Optik zu erhalten, wurden die originalen Pfetten und Sparren aufbereitet und wiederum verbaut.

Ein besonderes Augenmerk ist bei dieser Konstruktion auf den Anschluss der luftdichten Ebene zu den alten Balken zu legen. Durch die rissige Struktur der Balken ist ohne besondere Maßnahmen ein konvektiver Feuchteintrag kaum zu verhindern.

Aus diesem Grund wurden die Risse an den Balken mit einem 8 mm Bohrer bis zum Kern angebohrt und mit einem dauerelastischen Spezialkautschuk ausgepresst (z.B. Fa. Dörken, Delta Than). Durch einen Blower Door Test wurden sämtliche Sparren und Pfetten noch einmal überprüft.

5.1.2 Messergebnisse

Wie bereits im Kapitel 4.1.3 erwähnt, erfolgte die Installation der Messgeräte erst Ende November 2019. Aus diesem Grund können keine Aussagen über die Schlagregenbelastung bzw. über das daraus resultierende Feuchteverhalten an der Innenoberfläche der Holzwand getroffen werden. Jedoch kann man sehr wohl eine Aussage treffen, ob die Konstruktion im Moment funktioniert oder nicht beziehungsweise wo Problemstellen zu finden sind. Auf diese Ergebnisse wird in der Folge näher eingegangen.

Die Installation der Messsensoren erfolgte nach einem extrem regenreichen Wochenende. Durch dieses Ereignis konnte man bei der Ankunft vor Ort Schwachstellen erkennen. Die gesamte Fassade wies kaum Spuren von den starken Regenfällen auf und lieferte bei einer ersten Feuchtemessung mittels Handmessgerät an keiner Stelle untypische Werte. Die einzigen Problemstellen fand man an der ehemaligen „Remmwand“ (Wand zwischen Wohnbereich und Heustadl). Die sogenannten „Schrottvorköpfe“ stehen an dieser Stelle ost- und westseitig über die Flucht der restlichen Holzfassade hervor (siehe Abbildung 46). Die Köpfe sind relativ ungleichmäßig bearbeitet und bieten dem ablaufenden Wasser viele Möglichkeiten über Ritzen und Spalten in den Innenraum zu gelangen. Durch die um 90 Grad verdrehte Faserrichtung im Vergleich zur restlichen Fassade wird die kapillare Leitung zum Innenraum noch begünstigt.



Abbildung 46: Kritischer Bereich bei Schrottvorköpfen an der Westfassade durch kapillare Wasseraufnahme

Da die Balken beim Lokalaugenschein regelrecht nass waren, muss davon ausgegangen werden, dass das Regenwasser vom Balkon über die Luftspalte der Balkonbodenbretter auf die Schrottvorköpfe fließt. Diese nehmen das Wasser kapillar auf und verursachen auch in der benachbarten Wand eine ungewöhnlich hohe Holzfeuchtigkeit. Auf der Ostfassade (Abbildung 47) ist der Verlauf zur benachbarten Wand deutlich zu erkennen.

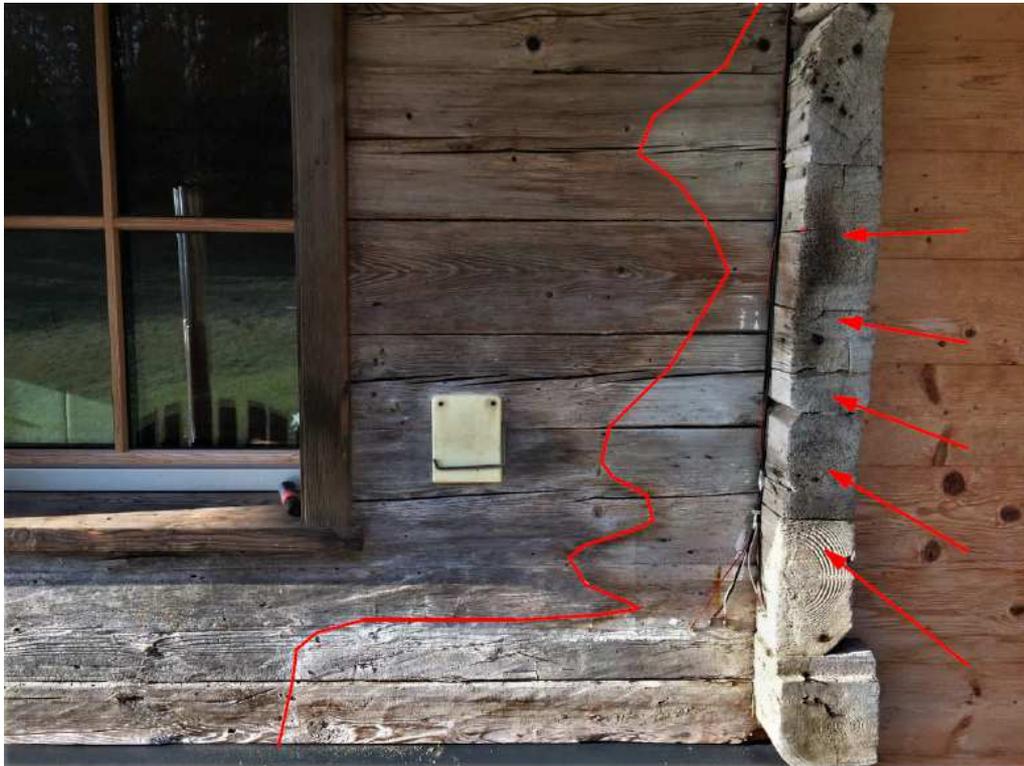


Abbildung 47: Feuchteverlauf der benachbarten Wand durch den kapillaren Feuchteintrag über die „Schrottvorköpfe“

Aus diesem Grund werden an dieser Stelle eine oberflächennahe Messung (20-30 mm) und eine Messung an der Innenoberfläche (120 mm) der Balkenwand durchgeführt. Als Referenzwert dient eine Kontrollmessung im ersten Obergeschoß. Diese ist wiederum oberflächennah und an der Innenoberfläche installiert. Um eventuelle Unterschiede aufgrund der Schlagregenbelastung beurteilen zu können, sind dieselben Punkte auch auf der Westseite montiert.

Als Ergebnis der Messung können im Zuge dieser Masterarbeit leider nur die ersten Daten der Holzfeuchten präsentiert werden und somit kaum eine Aussage über die Auswirkungen des Schlagregens getroffen werden. Jedoch wird an dieser Stelle auf den Arbeitsbereich der energieeffizienten Bauweise der Universität Innsbruck verwiesen, der die Messung im Zuge eines EU-Projektes weiter betreuen wird. Trotzdem lässt sich durch diese ersten Daten bereits feststellen, ob der Wandaufbau mit 22 cm Zellulose im Falle des Standortes Scheffau funktioniert oder nicht. Mit Innenholzfeuchten von 12,5 % - 14,0 % kann man davon ausgehen, dass in diesem Fall mit Sicherheit keine kritischen Werte erreicht werden. Problematischer

sehen die Ergebnisse an den zuvor beschriebenen Schrottvorköpfen aus. An der Ostfassade wird dort kurz nach den Regenfällen eine Holzfeuchte von bis zu 65 % gemessen. Auch auf der Innenoberfläche werden mit bis zu 24 % Holzfeuchte kritische Werte erreicht. Es findet zwar eine leichte Austrocknung statt, jedoch werden bei weitem keine herkömmlichen Holzfeuchtwerte erreicht.

Interessanterweise ist die Westseite von diesem Problem bei weitem nicht so stark betroffen. Dies kann daran liegen, dass die Ritzen und Spalten das Schlagregenwasser besser ableiten, oder es liegt an den unterschiedlichen Wetterverhältnissen von Vormittag und Nachmittag. Gerade in der Region um den Wilden Kaiser ist im Herbst Frühnebel keine Seltenheit. Somit wird die Ostfassade am Vormittag kaum von der Sonne bestrahlt. Am Nachmittag löst sich der Nebel meistens auf und ein Sonneneintrag an der Westfassade bewirkt eine schnellere Trocknung. Ein weiteres Indiz dafür ist das viel braunere, sonnenverbrannte Holz auf der Westseite.

5.1.3 Ausblick

Gerade Simulationen vermitteln das Gefühl von Sicherheit im Hinblick auf ihre Ergebnisse. Am Beispiel Neuhäusl kann jedoch sehr schön gezeigt werden, wie knapp Richtig und Falsch beieinander liegen. Die Variation eines Parameters kann bereits fatale Auswirkungen haben. Die absolute Gewissheit liefert nur ein fix installiertes Monitoring System. Durch die vermehrte Anbringung solcher Systeme in renovierten Gebäuden können Theorie und Praxis besser verglichen werden.

Im Hinblick auf die Schlagregenbelastung verlangt die Sanierung von historischen Bauernhäusern klarere Randbedingungen und technisches Know-How, um gewisse, fehleranfällige Details ausschließen zu können. Lokale Schlagregenmessungen könnten die Information der Normen ergänzen und genauere Modelle in die Simulation einfließen lassen.

5.2 Hinterlüftung mittels Luftkanälen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in 4.2 beschriebenen Simulation vorgestellt. Die Erkenntnisse sollen die Idee von (Ojanen, 2007) genauer untersuchen und einen Aufschluss über die Anwendbarkeit bzw. den Nutzen von Luftkanälen liefern. Die Ergebnisse beziehen sich im Speziellen auf den Wandaufbau vom Hof „Neuhäusl“ und sollten eine mögliche Verbesserung von Innendämmungen in Passivhausqualität auf Holzblockwänden darstellen.

Im Kapitel 4.2 wurde schon genauer auf die Randbedingungen eingegangen. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei starken Dämmungen eine Temperaturerhöhung von 3 °C im Kanal nicht möglich ist. Somit sind die von Ojanen angegebenen 0,34 Pa Druckdifferenz bei sehr gut gedämmten Gebäuden nicht realistisch. Ein weiteres Problem stellen die hohen Druckverluste im Kanal dar. Um diese Problematik zu lösen, müssten detaillierte Forschungen und Versuche betrieben werden. Es werden nun trotzdem die Ergebnisse bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,16 m/s vorgestellt, da diese durch weitere Forschung eventuell erreicht werden könnte. Des Weiteren soll die Frage geklärt werden, ob dieser geringe Volumenstrom überhaupt einen positiven Effekt auf die Konstruktion darstellt.

5.2.1 Ergebnisse

Um einen aussagekräftigen Vergleich zu erhalten, werden der Fall der „dichteren“ Holzblockwand (Variante 11) vom Hof „Neuhäusl“ mit den Simulationsergebnissen vom Luftkanal mit konstantem bzw. sinusförmigem Volumenstrom verglichen.

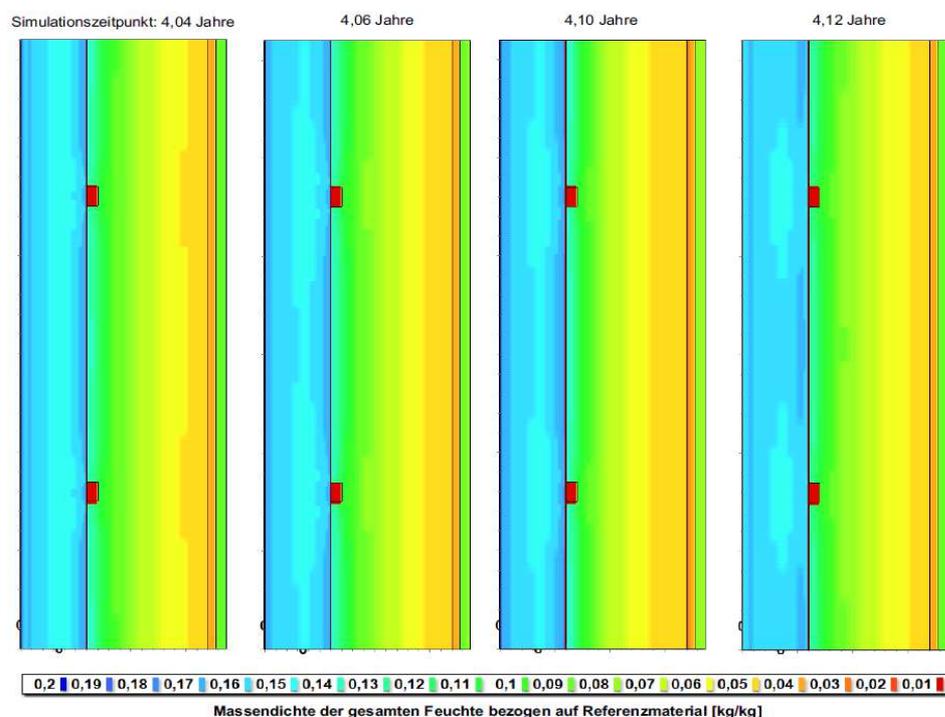


Abbildung 48: Verlauf der Materialfeuchten (massebezogen) zu unterschiedlichen Simulationszeitpunkten

Der Wandaufbau mit Luftkanal stellt die gleichen Materialeigenschaften wie die der Variante 11 dar. Dieser Aufbau entspricht laut den Ergebnissen des vorherigen Kapitels den „Worst Case“ einer Bestandholzblockwand. Der Vergleich soll somit zeigen, ob unter diesen Umständen dank der Belüftung unkritische Werte erreicht werden. Bei allen Simulationen sind dieselben Randbedingungen für das Innen- und Außenklima angesetzt.

In Abbildung 48 ist sehr schön das Verhalten der Holzfeuchte aufgrund des Lüftungskanales zu erkennen. Die Simulationszeitpunkte entsprechen dem eingeschwungenen Zustand zum Anfang des vierten Jahres. Dies entspricht in etwa dem Monat Jänner. In den Wandabschnitten kann man eindeutig den positiven Trocknungseffekt durch den Lüftungskanal erkennen. Im ersten Wandquerschnitt kann man feststellen, dass eine leichte, trichterförmige Ausbuchtung der Feuchte in der Zellulose entsteht. Durch den erhöhten Feuchteabtransport im Bereich des Luftkanales werden auch die umliegenden Bereiche getrocknet. Eine Auswirkung bis zur Kammermitte ist speziell bei der Holzfeuchtigkeit gut zu erkennen. Diese Ergebnisse werden in der Folge noch etwas genauer in Zahlen gefasst.

Die Variante 11 liefert Holzfeuchten im Bereich von 12-18 %. Bei Berücksichtigung eines Volumenstromes im Sommer und Winter (sinusförmiger Verlauf) verbessert sich die Holzfeuchte nur minimal. Beim konstanten Volumenstrom kann man auch in Kanalmitte eine deutliche Verbesserung erkennen. Da es natürlich auch im Frühjahr und Herbst Temperaturschwankungen gibt, wird die Wahrheit irgendwo zwischen den zwei Ergebnissen liegen.

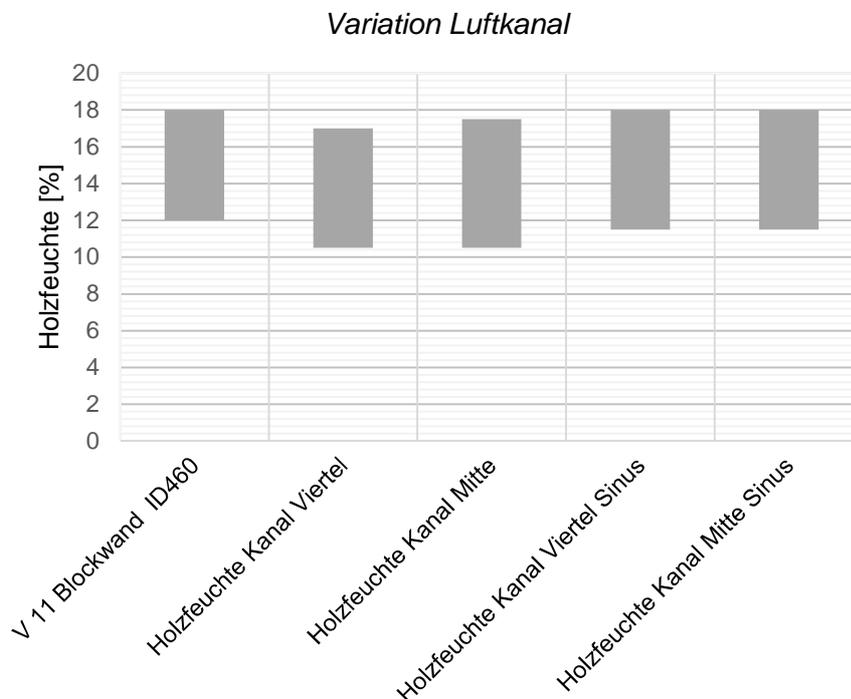


Abbildung 49: Holzfeuchte (Minimum, Maximum) der Vergleichswand V11, sowie mit Lüftungskanal als konstanter Volumenstrom bzw. als Sinusfunktion mittig zwischen den Kanälen und in den Viertelpunkten

Viel deutlicher werden die Ergebnisse beim Mould growth Index. Werden bei der Variante 11 nur Werte um 2,5 erreicht, liegt der Index bei konstantem Volumenstrom nur knapp über dem Grenzwert. Somit führt der Luftkanal zwar auch zu keinem eindeutig positiven Ergebnis, jedoch sind diese Ergebnisse auch auf der extrem sicheren Seite, da sehr ungünstige Materialparameter für die Blockwand verwendet wurden. Auch die Oberflächenempfindlichkeit ist mit „very sensitive“ sehr pessimistisch angesetzt worden.

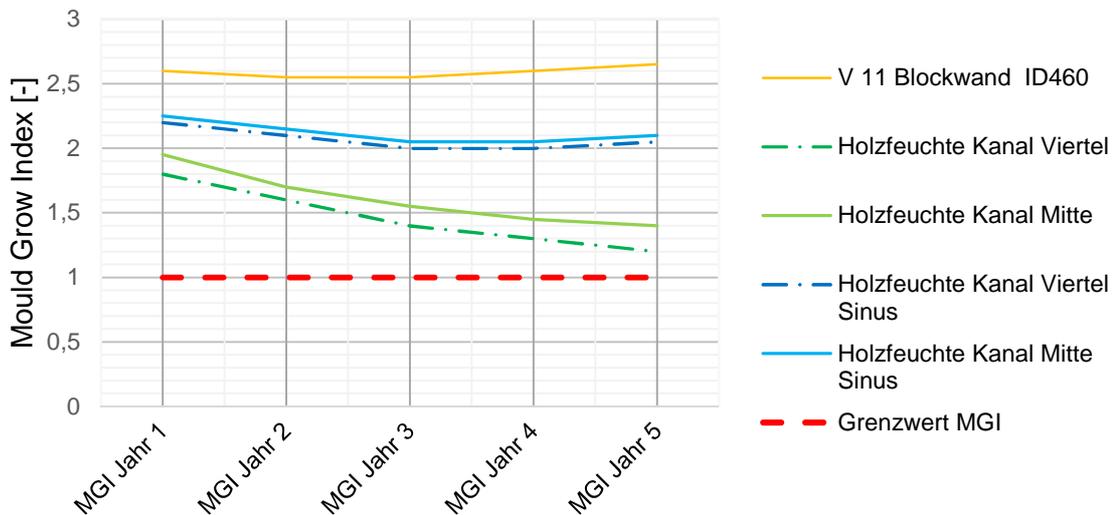


Abbildung 50: Mould growth Index bei der Vergleichsvariante 11 sowie unter Berücksichtigung eines Lüftungskanales mit konstantem bzw. sinusförmigem Volumenstrom

In Summe muss man feststellen, dass ein Lüftungskanal keine Wunder bewirkt, jedoch sehr wohl den gewissen Unterschied liefert, ob eine Konstruktion funktioniert oder nicht. In jedem Fall hat er eine positive Auswirkung auf den Abtransport von Feuchtigkeit.

5.2.2 Ausblick

Die Ergebnisse zeigen einen klaren Trend und bestätigen einen positiven Einfluss von Lüftungskanälen. Um detaillierte Ergebnisse zu erhalten, müssten die Simulationen um einiges aufwendiger gestaltet werden. Es müsste ein temperaturabhängiger Volumenstrom generiert werden. Dafür müsste die sich einstellende Lufttemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur gesetzt werden. Weiters müsste auch der Effekt der Feuchtaufnahme von der Luft im Kanal berücksichtigt werden. Die oben angeführte Simulation stellt im Endeffekt nur den Lufteintritt am Kanalanschluss dar. Diese Luft würde über die Kanallänge immer mehr Feuchte aufnehmen und das Trocknungspotential verringern. Positiv würde sich dagegen die Berücksichtigung des Windes auswirken. Durch den Wind ist eine leichte Belüftung zwischen Dämmschicht und Holzwand anzunehmen, da die Blockwände eine sehr geringe Winddichtheit aufweisen. Diese würde durch die Luftkanäle noch weiter gesteigert werden.

Damit eine solche Konstruktion überhaupt funktionieren kann, müsste einige Zeit in die Entwicklung von geeigneten Luftkanälen gesteckt werden. Diese müssten eine sehr geringe Reibungszahl ($< 0,01$) aufweisen, um die Problematik der Druckdifferenz in den Griff zu bekommen. Eine weitere, notwendige Eigenschaft wäre eine geringe Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, um einen hohen Feuchteabtransport zu gewährleisten.

Gerade bei hohen Dämmstärken ist das Argument des verlorenen Wärmedurchlasswiderstandes der Blockwand nicht mehr maßgebend und eine durchgehende Hinterlüftung könnte durchaus eine Lösung darstellen. Würde die Frischluft der Lüftungsanlage durch den Luftspalt angesaugt, könnte ein kontrollierter Luftwechsel erzielt werden und die vorgewärmte Luft wiederum dem Innenraum zugeführt werden. Dem gegenüber würde eine aufwendige Montage und komplizierte Luftführung stehen. Die Montage von Luftkanälen könnte hingegen sehr einfach in den Wandaufbau integriert werden und würde die Blockwand statisch nur punktuell schwächen.

Desweiteren wäre noch die Ausbildung der Kanäle als Drainageschicht zur Ableitung von eindringendem Schlagregen zu untersuchen, um die Robustheit gegenüber Flüssigwasser von außen zu erhöhen, da dieses gerade bei Holzbauten nie vollständig zu vermeiden ist.

6 Zusammenfassung

Eine thermisch hochwertige Sanierung von historischen Gebäuden, wie beispielsweise eines Bauernhofes, stellt eine große Herausforderung an die Planung dar. Der Einbau einer Innendämmung ist an sich schon ein heikles Unterfangen. Wird diese in passivhausstandardtauglicher Stärke aufgebracht, ist eine genaue Analyse unabdinglich.

Durch die detailreiche Betrachtung des 300 Jahre alten Hofes „Neuhäusl“ in Scheffau, konnten viele Zusammenhänge, welche aus der bestehenden Fachliteratur bekannt waren, überprüft und kontrolliert werden. Durch die hygrothermischen Simulationen mit dem Programm DELPHIN wurde der Wandaufbau unter Variation von Klimabedingungen, Dämmstärken und Materialeigenschaften auf ihre Tauglichkeit geprüft. Themen, wie „mehr Dämmung, weniger Feuchte“, konnten bei Holzblockwänden durch die Simulation mit unterschiedlichen Dämmstärken widerlegt werden. Andere Themen, wie die Schlagregenbelastung, konnten durch die umlaufenden Balkone als etwas weniger heikel als ursprünglich angenommen betrachtet werden. Die Variation der Materialeigenschaften der Bestandsblockwand lieferte bedenkliche Ergebnisse und zeigte die Sensibilität in Bezug auf Simulationen auf. Dank dieser wird klar dargestellt, wie heikel Innendämmungen in solch einer Stärke zu betrachten sind. Ergebnisse sind nur schwer zu verallgemeinern und sind - je nach Standort und Situation - neu zu beurteilen. Die Leitdetails beim Hof „Neuhäusl“ können bei anderen Sanierung dieser Art angewandt werden.

Durch die Installation eines Holzfeuchtemesssystems wurde das Gebäude vor Ort überprüft. Obwohl die Messergebnisse lediglich den Zeitraum von November bis Dezember abbilden, konnte eine Funktionstüchtigkeit des Wandaufbaus festgestellt werden. Eine ganzjährige Messung wird von der Universität Innsbruck weiter betreut. Dadurch werden auch die Zusammenhänge zwischen Schlagregenbelastung und die Auswirkung auf die Innenoberfläche der Blockwand erforscht.

Aufgrund der Frage nach absolut sicheren Wandaufbauten für historische Bauernhäuser in Holzblockbauweise wurde eine Belüftung der Dämmebene untersucht. Die Installation von Luftkanälen im Abstand von 60 cm stellt einen Kompromiss zu einer durchgehend hinterlüfteten Holzblockwand dar. Durch die Luftkanäle wird der Verlust des thermischen Widerstandes der Holzblockwand minimiert und dennoch ein Feuchteabtransport erreicht.

Dieses Detail wurde mit dem Simulationsprogramm Delphin untersucht und mit dem „Worst Case“ der variierten Materialparameter für die Holzblockwand vom Hof „Neuhäusl“ verglichen. Tatsächlich konnte mit einem Volumenstrom von ca. 0,5 m³/h pro Kanal eine deutliche Reduktion der Schimmelanfälligkeit nachgewiesen werden. Es wurde auf die Problematik der Reibungsverluste im Kanal hingewiesen. Diese Verluste könnten unter Umständen die Luftströmung im Kanal zum Erliegen bringen. Es wurden Überlegungen für weitere Forschungsarbeiten angestellt und begründet.

Der Wunsch nach komplett sicheren Detaillösungen kann somit nicht zur Gänze erfüllt werden. Diese Arbeit liefert aber gute Ansätze und Lösungen für die Sanierung

unter den oben genannten Aspekten und Anregungen für weitere Forschungstätigkeiten im Bereich der Luftkanäle.

7 Literaturverzeichnis

- [AGÖF-Fachkongress (2004)] **MVOC - zum Nachweis von Schimmel ungeeignet?** Unter Mitarbeit von H. Schleibinger, D. Marchl, D. Laußmann, P. Braun, C. Brattig, M. Mangler, D. Eis, A. Nickelmann, H. Rueden. Institut für Hygiene und Umweltmedizin, Charité - Universitätsmedizin in Berlin, Beratung und Analyse - Verein für Umweltchemie B.A.U.CH. e. V., Berlin, Robert Koch-Institut (RKI), Berlin.
- [Andre Konrad, Mag. Chimani Barbara (2012)] **Klimamittelwerte für den Zeitraum 1981–2010.** Hg. v. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Online verfügbar unter <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/daten-download/klimamittel>, zuletzt geprüft am 01.10.2019.
- [ÖNORM EN ISO 10456, 15.02.2010] **Baustoffe und Bauprodukte Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften** — Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.
- [ÖNORM - B 6015-5 01.11.2009] Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät - Teil 5.
- [ÖNORM EN ISO 6946, 01.02.2018] **Building components and building elements** — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods.
- [Christian Dold BSc., DI Arch. Sabine Erber (2012)] **Innendämmung Anwendung und Risiken.** Hg. v. Energieinstitut Vorarlberg.
- [Dr. Wolfgang Feist; Passivhaus Institut, (Überarbeitung 2005)] **Protokollband Nr. 32 ZUSATZ:** Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten. Unter Mitarbeit von Dr. Ing Rainer Pfluger, DI Tanja Schulz.
- [Dr. Wolfgang Feist; Passivhaus Institut, (2005)] **Protokollband Nr. 32:** Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung.
- [Fachverband Innendämmung (2016)] **Praxis-Handbuch Innendämmung Planung - Konstruktion - Details - Beispiele.** Köln: Rudolf Müller (Architektur). Online verfügbar unter <https://www.baufachmedien.de/praxis-handbuch-innendaemmung.html>.
- [Gänßmantel, Jürgen; Geburtig, Gerd (2008)] Richtig dämmen. Handbuch für zeitgemäßes Bauen im Bestand. 1. Aufl. Geislingen (Steige): Maurer (Praxis kompakt, 3).
- [H. Erhorn (1990)] **Schimmelpilzanfälligkeit von Baumaterialien.** Kurzmitteilung Nr. 196. Hg. v. Fraunhofer Institut für Bauphysik. Stuttgart.

- [Häupl, Peter (2008)] **Bauphysik. Klima, Wärme, Feuchte, Schall** ; Grundlagen, Anwendungen, Beispiele. Berlin: Ernst & Sohn. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10522325>.
- [HTflux Engineering GmbH:] **Thermische und hygrothermische Simulation.** Online verfügbar unter <https://www.htflux.com/de/documentation/randbedingungen/waermeuebergangswiderstand/waermeuebergang-rohrstroemung/>, zuletzt geprüft am 06.12.2019.
- [Luisa Sontag, Andreas Nicolai, Stefan Vogelsang] Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin. Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden.
- [Marek, Rudi; Nitsche, Klaus (2011)] **Praxis der Wärmeübertragung.** Grundlagen ; Anwendungen ; Übungsaufgaben. 2. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- [Prof. Dr. Martin Krus (2019)] Update historische Gebäude. Innendämmung. Energie Tirol. Wifi Innsbruck, 25.02.2019.
- [Rathmanner, Johann (2011)] Altbau-Sanierung. Gebäude richtig und nachhaltig revitalisieren; ein Praxis-Ratgeber. Graz: Stocker.
- [Scheffler, Gregor A. (2016)] **Bauphysik der Innendämmung.** Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [Schnieders J., W. Feist, R. Pfluger, O. Kah (2001)] CEPHEUS Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht. Hg. v. Darmstadt Passivhaus Institut.
- [ÖNORM EN ISO 13786] Thermal performance of building components — Dynamic thermal characteristics — Calculation methods.
- [Tuomo Ojanen (2007)] **Low energy log walls under cold climate conditions.** VTT Technical research Centre of Finland LTD.
- [Tuomo Ojanen, Hannu Viitanen (2016)] **VTT mold model** – Equations, parameters, performance criteria. Hg. v. VTT Technical research Centre of Finland LTD.
- [Üllar Alev (2017)] Renovation and Energy Performance Imporvement of Estonian Wooden Rural Houses. Tallinn University of Technology.
- [W. Feist, R. Pfluger, F. Ochs, M. Janetti, J. Seibl (2011)] **Bauphysik für Bau- und Umweltingenieure.** Studienbehelf für Studierende des Bachelorstudiums Bau- und Umweltingenieurwissenschaften. Sommersemester 2016. Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen / Bauphysik der Universität Innsbruck. Innsbruck.
- [ÖNORM EN ISO 15927-3, 01.07.2009] **Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden** — Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 3: Berechnung des Schlagregenindex für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten.
- [DIN EN ISO 15148, 2016] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.

- [ÖNORM B 8110-2, 01.07.2003] **Wärmeschutz im Hochbau Teil 2:** Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz.
DIN 4108-2, 02.2013: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [DIN 4108-3, 10.2018] **Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3:** Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- [DIN 4108-7, 01.2011] **Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7:** Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie Beispiele.
- [WTA 6-2 (2014)] **Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.** Unter Mitarbeit von Daniel Kehl. Ausg.: 12.2014/D, Fassung: Dezember 2014. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. (WTA-Merkblatt, 6-2).
- [WTA 6-4 (2016)] **Innendämmung nach WTA I.** Planungsleitfaden = Internal thermal insulation according to WTA I ; planning guide. Unter Mitarbeit von Anatol Worch. Ausgabe: 10.2016/D. Stuttgart, München: Fraunhofer IRB-Verl.; WTA Publ (WTA-Merkblatt, 6-4).
- [WTA 6-5 (2014)] **Innendämmung nach WTA II** - Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Unter Mitarbeit von Anatol Worch. Ausg.: 04.2014/D, Fassung: Mai 2014. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. (WTA-Merkblatt, 6-5).
- [Zürcher, Christoph; Frank, Thomas (2018)] **Bauphysik. Bau und Energie.** 5. Auflage.
Zürich: vdf Hochschulverlag (Bau und Energie).

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbstständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit die Universität, das Institut und der Arbeitsbereich, an dem die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und die Betreuer zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatssoftware elektronisch im Dateiformat pdf ohne Kennwortschutz bei dem Betreuer einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur der Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck, am 10. Jänner 2020

.....

Alexander Rieser, BSc