
Master-Thesis

Thema: **Energetische Sanierung eines historischen Holzblockhauses am Beispiel eines Strickbaus**

Energetic retrofit of a historic log house on the example of a „Strickbau“



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für Massivbau
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing Harald Garrecht

Bearbeiter **Florian Schweikert**

Datum **Dienstag, den 23. Oktober 2012**

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der energetischen Sanierung eines Appenzeller Strickbaus aus dem 17. Jahrhundert.

Zunächst erfolgt eine Darlegung der Besonderheiten von Strickbauten und ein Überblick über die Entwicklungsgeschichte sowie den Bestand Appenzeller Strickbauten.

Anschließend wird eine ausführliche Aufnahme des Gebäudes sowie eine Schwachstellenanalyse unter Zuhilfenahme von thermographischen Untersuchungen, Wärmebrückenberechnungen und Ermittlung der Luftdichtheit durchgeführt. In diesem Zusammenhang werden auch die Sanierungsmaßnahmen erläutert, die im November 2011 durchgeführt wurden.

Da die physikalischen Grundlagen erheblich zur Interpretation der späteren Berechnungsergebnisse beitragen, wurde diesen und der Konstruktionsweise von Innendämmungen im Allgemeinen jeweils ein separater Abschnitt gewidmet.

Die Beurteilung der Energieeffizienz des Bestandes und der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen erfolgte mittels des Passivhaus-Projektierungs-Paketes (PHPP) sowie dynamischen Gebäudesimulationen mit IDAICE. In diesem Zusammenhang wurden weitere mögliche Sanierungsvarianten dargelegt und sogleich energetisch sowie ökonomisch bewertet.

Den Abschluss dieser Arbeit bilden hygrothermische Bauteilsimulationen zur Beurteilung der Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Schadenspotentiale.

Abstract

This thesis' topic is the energetic retrofit of an "Appenzeller Strickbau" which was built in the 17th century.

First of all an overview of the specific features of Strickbau-Buildings and their history including the actual stock of "Appenzeller Strickbauten" is given.

Subsequently an analysis of the building and its weak spots with the aid of thermographic images, thermal bridges calculations and tests of air tightness is performed. In this context, the energetic retrofit measures, which were carried out in November 2011, are explained.

Since the physical principles are important for the following interpretation of the calculation results, there are separate chapters about this topic and the principles of interior insulations.

The evaluation of the energy efficiency of the stock and the realized renovations was performed using the passive house planning package (PHPP) and the dynamic building simulation tool IDA ICE. In this regard, other possible renovation options are presented and assessed energetically and economically.

Hygrothermal simulations of building components in order to estimate potential damages of renovation concepts are concluding this thesis.

Danksagung

Danken möchte ich an dieser Stelle

Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald GARRECHT

für die Ermöglichung und Betreuung dieser interessanten Arbeit sowie seine lehrreichen Vorlesungen, durch die mein Interesse für die Bauphysik und Sanierung geweckt wurde.

meinen Betreuerinnen Frau Dipl.-Ing. Simone REEB und Frau Dipl.-Ing. Elena ALEXANDRAKIS

für die fachliche und freundliche Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	10
2.	Der Appenzeller Strickbau	11
2.1.	Block- und Strickbau	11
2.2.	Appenzeller Strickbau	14
3.	Physikalische Grundlagen	19
3.1.	Wärme	19
3.2.	Feuchte	22
3.3.	weitere Randbedingungen	33
3.4.	Bautechnischer Feuchteschutz	33
4.	Objektbeschreibung	37
4.1.	Einführung	37
4.2.	Fundamente	41
4.3.	Wandaufbauten	41
4.4.	Decken	41
4.5.	Fenster und Eingangstüren	42
4.6.	Dachgeschoss	42
4.7.	Keller	42
5.	Sanierungsmaßnahmen	43
5.1.	Wände	43
5.2.	Dachboden	45
5.3.	Kellerdecke	46
5.4.	Fenster	47
6.	Thermographie	48
6.1.	Grundlagen	48
6.2.	Durchführung	48
6.3.	Ergebnisse	51
6.4.	Beurteilung	57
7.	Luftdichtheit	58
7.1.	Grundlagen	58
7.2.	Luftdichtheitsmessungen	58
7.3.	Ergebnisse	59
7.4.	Beurteilung	59
8.	Material- und Bauteilkennwerte	60
8.1.	Wände und Decken	60
8.2.	Fenster und Türen	60
8.3.	Vorsatzschalen mit Holzfaserdämmplatten und Dampfbremse	67
8.4.	Übersicht Bauteilkennwerte	67

9.	Wärmebrückenberechnung	68
9.1.	Grundlagen	68
9.2.	Definition	68
9.3.	Auswirkungen	70
9.4.	Rechnerische Untersuchungen	70
9.5.	Wärmebrückenkatalog	79
9.6.	Beurteilung	83
9.7.	Fenster und Türen	86
10.	Innendämmungen	88
10.1.	Außendämmung vs. Innendämmung	89
10.2.	Befeuchtungsrisiko durch Dampfkongvektion	91
10.3.	Dampfbremsen	92
10.4.	Kapillaraktive Innendämmsysteme	94
11.	Energetische Bewertung mit PHPP	97
11.1.	PHPP	97
11.2.	Geometrische Randbedingungen	97
11.3.	Klimatische Randbedingungen	100
11.4.	sonstige Randbedingungen	102
11.5.	Ergebnisse	102
11.6.	Sanierungsvarianten	106
12.	IDA ICE	114
12.1.	Randbedingungen und Eingaben	114
12.2.	Ergebnisse	116
12.3.	Vergleich mit Messwerten	128
13.	Thermisch-hygrische Berechnungen mit DELPHIN	129
13.1.	DELPHIN	129
13.2.	Klimatische Randbedingungen	129
13.3.	Geometrische Randbedingungen und Bauteilquerschnitte	135
13.4.	Testrechnungen	140
13.5.	Vergleich mit Messwerten	147
13.6.	untersuchte Konstruktionen	152
13.7.	Materialkennwerte	162
13.8.	Ergebnisse	164
13.9.	Zusammenfassung	184
14.	Zusammenfassung und Ausblick	185
15.	Literatur	186
16.	Normen und Verordnungen	188

Anhang & CD-ROM

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: einfacher Blockbau mit Rundhölzern und Vorstoß	12
Abbildung 2-2: Blockbau mit besägten Hölzern	12
Abbildung 2-3: Abdichtung mit Moos	12
Abbildung 2-4: Auswahl regionaler Eckverbindungen mit und ohne Vorstoß	13
Abbildung 2-5: Modell eines Appenzeller Stricks mit Sicherung	15
Abbildung 2-6: Hauptfassade (Ost) des untersuchten Objektes mit Appenzeller Täfer	16
Abbildung 2-7: relativer Anteil historischer Gebäude im Appenzell Ausserrhoden	17
Abbildung 2-8: Gebäudeverluste zwischen 1956 und 1996	18
Abbildung 3-1: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte	20
Abbildung 3-2: Beispiele instationärer Temperaturrandbedingungen	21
Abbildung 3-3: Carrier-Diagramm	22
Abbildung 3-4: Wassergehaltsbereiche in feinporigen, hygroskopischen Baustoffen	24
Abbildung 3-5: Phasen fortschreitender Durchfeuchtung poröser Baustoffe	26
Abbildung 3-6: Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit vom Porenradius	27
Abbildung 3-7: Oberflächendiffusion im Winterfall	28
Abbildung 3-8: Wirkungen der Oberflächenspannung	29
Abbildung 3-9: Knickpunktskurve für Porenbeton nach Krischer	32
Abbildung 4-1: Lage des Objekts	37
Abbildung 4-2: Zeitung von 1873 unter Tapete	37
Abbildung 4-3: Kellergeschoss	38
Abbildung 4-4: Erdgeschoss	38
Abbildung 4-5: Obergeschoss	39
Abbildung 4-6: Dachgeschoss	39
Abbildung 4-7: Schnitt von Osten	40
Abbildung 4-8: Ostfassade	40
Abbildung 4-9: Westfassade	41
Abbildung 4-10: Decken-Boden-Bohlen	42
Abbildung 5-1: Skizze Vorsatzschale und Einbau	43
Abbildung 5-2: Kompriband unterhalb Dampfbremse und Rahmenkonstruktion	44
Abbildung 5-3: Endzustand Innendämmung	44
Abbildung 5-4: von außen gedämmte Südwand des Raumes 0.2	45

Abbildung 5-5: Dämmkonstruktion Dachgeschoss im Bauzustand	45
Abbildung 5-6: Endzustand Dämmung Dachboden	46
Abbildung 5-7: Endzustand Kellerdecke	46
Abbildung 5-8: Details Fensterkonstruktion	47
Abbildung 6-1: Fotografie und Thermographie Ostfassade	48
Abbildung 6-2: Übersicht IR-Aufnahmen im EG	49
Abbildung 6-3: Übersicht IR-Aufnahmen im 1. OG	50
Abbildung 6-4: Übersicht IR-Aufnahmen im DG	50
Abbildung 6-5: Außenecke Nordost, IR-Aufnahme 002	51
Abbildung 6-6: Zimmerecke Nordwest, IR-Aufnahme 003	51
Abbildung 6-7: Wandfuß Südwand, IR-Aufnahme 015	52
Abbildung 6-8: Türschwelle, IR-Aufnahme 014	52
Abbildung 6-9: niedrigere Oberflächentemperaturen rechts, IR-Aufnahme 095	52
Abbildung 6-10: einbindender Balken, IR-Aufnahme 110	52
Abbildung 6-11: Zimmerecke Nordwesten, IR-Aufnahme 050	53
Abbildung 6-12: Zimmerecke Südwesten, IR-Aufnahme 048	53
Abbildung 6-13: erhöhte Temperaturen an der Türschwelle, IR-Aufnahme 045	54
Abbildung 6-14: konstruktive Wärmebrücke durch Vorsatzschale, IR-Aufnahme 059	54
Abbildung 6-15: Türanschlussbereich unten, IR-Aufnahme 034	54
Abbildung 6-16: Türanschlussbereich oben, IR-Aufnahme 037	54
Abbildung 6-17: Ausbesserung Brandschaden in Raum 0.5	55
Abbildung 6-18: Ausbesserung in Nordwand Raum 1.2 neben Türzarge , IR-Aufnahme 040	55
Abbildung 6-19: Bereich vor Tür zu Raum 2.2, IR-Aufnahme 076	56
Abbildung 6-20: Durchstoßene Dämmebene Raum 2.2, IR-Aufnahme 066	56
Abbildung 6-21: am Rand ausgefrante Dämmung	56
Abbildung 6-22: IR-Aufnahme 064 zu Abbildung 3-17	56
Abbildung 6-23: Holzleiste mit eingebautem Dichtungsprofil aus Gummi	57
Abbildung 8-1: Modell zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterrahmen	62
Abbildung 8-2: Modell für vorliegende Einfachfenster	62
Abbildung 8-3: Kennwerte für Hohlraum zwischen Flügel und Rahmen	63
Abbildung 8-4: Temperatur-Isothermenverlauf im Fensterrahmen	65
Abbildung 8-5: Wärmestromdichten im Fensterrahhhmen	65
Abbildung 8-6: Temperatur-Isothermenverlauf Türrahmen	66

Abbildung 9-1: Konstruktive Wärmebrücke	69
Abbildung 9-2: geometrische Wärmebrücke	69
Abbildung 9-3: Berechnungsergebnisse THERM	73
Abbildung 9-4: Temperaturverlauf in Isothermendarstellung und niedrigste Oberflächentemperatur	73
Abbildung 9-5: Bereiche der Wandkonstruktion	76
Abbildung 9-6: Darstellung des Gefachebereiches mit Holzpfeilen und -riegel	77
Abbildung 9-7: U-Werte nach THERM	78
Abbildung 9-8: Grundriss mit untersuchten Wärmebrücken	79
Abbildung 9-9: Schnitt von Nord und von Süd	80
Abbildung 9-10: Schnitt von Ost und Schnitt von West	80
Abbildung 9-11: Wärmebrücke N5 im Bereich des ehemaligen Wohnzimmers	85
Abbildung 9-12: Verlauf der Temperatur-Isothermen im Fensteranschlussbereich	86
Abbildung 10-1: Temperatur- und Dampfstromverlauf Außen-/Innendämmung	90
Abbildung 10-2: wärme- und feuchtetechnische Einwirkungen am Beispiel eines Steildaches	90
Abbildung 10-3: Schimmelpilzbildung hinter einer punktuell verklebten Gipskartonplatte	91
Abbildung 10-4: Hinterströmung von Hohlräumen hinter Innendämmungen	91
Abbildung 10-5: Durchströmungspfade einer innengedämmten Wand	92
Abbildung 10-6: Verlauf Diffusionswiderstand einer feuchteadaptiven Dampfbremse	93
Abbildung 10-7: Feuchtegehalt an der Innenseite eines Fachwerkiegels	93
Abbildung 10-8: Wirkprinzip kapillaraktive Innendämmung	94
Abbildung 10-9: Entkopplung durch Drahtgeflecht	95
Abbildung 10-10: Wassergehalte mit und ohne hygrischen Kontakt	96
Abbildung 11-1: Bandbreite Monatstemperaturen mit Monatsmittelwerten	100
Abbildung 11-2: monatliche Niederschlagsmenge und Tage mit Niederschlag pro Monat	100
Abbildung 11-3: monatliche Sonnenscheindauer	101
Abbildung 11-4: monatliche Einstrahlung durch diffuse und direkte Strahlung	101
Abbildung 11-5: Jahresgang Monatsmitteltemperatur und Strahlung	101
Abbildung 11-6: Wärmegewinne, Wärmeverluste und Heizwärmebedarf pro m ² TF	104
Abbildung 11-7: solare Wärmegewinne im Jahresgang	105
Abbildung 12-1: 3D-Modell des untersuchten Gebäudes	114
Abbildung 12-2: Zeitplan für Wohnnutzung der Zone	115
Abbildung 12-3: Zeitplan für Beleuchtung der Zone	116
Abbildung 12-4: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Erdgeschoss, winddruckabhängig	117

Abbildung 12-5: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Erdgeschoss, Infiltrationsrate	118
Abbildung 12-6: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Erdgeschoss, Luftdichtheit EnEV	119
Abbildung 12-7: Wärmeverluste und -gewinne im sanierten Erdgeschoss	121
Abbildung 12-8: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Obergeschoss	122
Abbildung 12-9: Wärmeverluste und -gewinne im sanierten Obergeschoss	123
Abbildung 12-10: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im unsanierten Erdgeschoss	124
Abbildung 12-11: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im sanierten Erdgeschoss	125
Abbildung 12-12: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im unsanierten Obergeschoss	126
Abbildung 12-13: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im sanierten Obergeschoss	127
Abbildung 12-14: Vergleich gemessene und berechnete Temperaturen im Fensterbereich	128
Abbildung 13-1: Jahresverlauf Innentemperatur	130
Abbildung 13-2: Jahresverlauf Innenluftfeuchte	130
Abbildung 13-3: Außentemperatur im Jahresverlauf	131
Abbildung 13-4: Außenluftfeuchte im Jahresverlauf	132
Abbildung 13-5: Niederschlagsmengen im Jahresverlauf	132
Abbildung 13-6: direkte Strahlung im Jahresverlauf	133
Abbildung 13-7: Windgeschwindigkeiten im Jahresverlauf	133
Abbildung 13-8: Windrichtungen im Jahresverlauf:	134
Abbildung 13-9: Stärke Sparschalung	136
Abbildung 13-10: Abstand Verschindelung zur Strickoberfläche	136
Abbildung 13-11: Wandaufbau EG , OG sowie generiertes Gitter EG in DELPHIN	137
Abbildung 13-12: Querlattung in Wandmitte hinter Holzverkleidung	138
Abbildung 13-13: Außenecke Nordost ohne und mit Gitter	139
Abbildung 13-14: untersuchter Wandquerschnitt EG Nord nach Sanierung	139
Abbildung 13-15: Feuchtegehaltsintegral der Konstruktion bei stündlicher und täglicher Ausgabe	140
Abbildung 13-16: relative Luftfeuchte Innenoberfläche bei täglicher und stündlicher Ausgabe	140
Abbildung 13-17: Feuchtegehaltsmittelwerte im Strick im Jahresverlauf	142
Abbildung 13-18: Temperaturmittelwerte im Strick im Jahresverlauf	142
Abbildung 13-19: Feuchtegehaltsmittelwerte STEICOflex	143
Abbildung 13-20: Luftfeuchtemittelwert Innenoberfläche	143
Abbildung 13-21: Temperaturmittelwert Innenoberfläche	144
Abbildung 13-22: untersuchter Wandquerschnitt EG Ost nach Sanierung	144
Abbildung 13-23: Feuchtegehaltsintegral im Jahresverlauf in Nord- sowie Ostwand	145

Abbildung 13-24: Luftfeuchtemittelwert Innenoberfläche im Jahresverlauf an Nord- und Ostwand	145
Abbildung 13-25: Temperaturmittelwert Innenoberfläche im Jahresverlauf an Nord- und Ostwand	146
Abbildung 13-26: Feuchtegehaltsmittelwerte Strick im Jahresverlauf an Nord- und Ostwand	146
Abbildung 13-27: Temperaturverlauf außen: Messwerte und Referenzklima	148
Abbildung 13-28: Verlauf der relativen Luftfeuchte außen: Messwerte und Referenzklima	148
Abbildung 13-29: Jahresverlauf Raumklima 0.3 gemessen	149
Abbildung 13-30: Vergleich Mess- und Rechenwerte	149
Abbildung 13-31: gemessene Temperaturen hinter der Dämmung	150
Abbildung 13-32: Messwerte der relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung	151
Abbildung 13-33: Vergleich berechnete und gemessene Werte	151
Abbildung 13-34: Modell des Bestandes in DELPHIN	152
Abbildung 13-35: Modell der Sanierungsmaßnahme in DELPHIN	153
Abbildung 13-36: Modell STEICOflex-Dämmung mit OSB-Platte in DELPHIN	154
Abbildung 13-37: Modell Calcium-Silikat-Platte mit Ausgleichslehm und Kalkputz in DELPHIN	155
Abbildung 13-38: Modell Variante mit Wärmedämmputz und Kalkputz in DELPHIN	156
Abbildung 13-39: Modell der Variante mit Wärmedämmlehm in DELPHIN	157
Abbildung 13-40: Modell der Variante mit Zellulosedämmung in DELPHIN	158
Abbildung 13-41: Modell der EPS-Dämmung in DELPHIN	159
Abbildung 13-42: Modell der XPS-Dämmung in DELPHIN	160
Abbildung 13-43: Modell der Mineralwollgedämmkonstruktion in DELPHIN	161
Abbildung 13-44: Feuchtegehaltsintegrale der Konstruktionen im Verlauf von sieben Jahren	166
Abbildung 13-45: Temperaturverlauf Bauteiloberfläche im vierten Jahr	167
Abbildung 13-46: relative Luftfeuchten an der Bauteiloberfläche im vierten Jahr	168
Abbildung 13-47: Feuchtegehalt in der Strickkonstruktion im Verlauf von vier Jahren	171
Abbildung 13-48: Feuchtegehalt in der Strickkonstruktion im Jahresverlauf	172
Abbildung 13-49: Feuchtegehalte der STEICOflex im Verlauf von vier Jahren	173
Abbildung 13-50: Feuchtegehalte STEICOflex im vierten Jahr	174
Abbildung 13-51: Feuchtegehalt Sparschalung im Verlauf von vier Jahren	174
Abbildung 13-52: Überhygroskopische Feuchtemasse im vierten Jahr (STEICOflex mit OSB-Platte)	175
Abbildung 13-53: Wassergehalte im vierten Jahr (STEICOflex mit OSB-Platte)	175
Abbildung 13-54: relative Feuchte Strickoberfläche im Jahresverlauf	178
Abbildung 13-55: Klimatische Zustände mit den Wachstumsgrenzen von Schimmelpilzen	179
Abbildung 13-56: Temperaturverlauf Innenecke innerhalb eines Jahres	180

Abbildung 13-57: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Innenecke innerhalb eines Jahres	181
Abbildung 13-58: Feuchtegehalt in der Strickkonstruktion im Verlauf von bis zu sieben Jahren	182
Abbildung 13-59: Luftfeuchtefeld am 19. Januar (STEICOflex mit OSB-Platte)	183
Abbildung 13-60: Luftfeuchtefeld am 30. Juni (STEICOflex mit OSB-Platte)	184

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7.1: n_{50} -Werte Blower-Door-Test	59
Tabelle 8.1: Übersicht der wichtigsten Bauteilkennwerte	67
Tabelle 9.1: Verwendete Wärmeübergangswiderstände für Wärmebrückenberechnungen	71
Tabelle 9.2: Ergebnisse Referenzprüffall	75
Tabelle 9.3: Beispiel Berechnung Ψ - und f_{Rsi} -Wert Außenecke 1	81
Tabelle 11.1: alle berücksichtigten TFA	98
Tabelle 11.2: wichtigste Ergebnisse PHPP	102
Tabelle 11.3: Überhitzungsrate ($T > 25^\circ\text{C}$) und tägliche Temperaturschwankungen	105
Tabelle 11.4: wichtigste Materialkennwerte verwendete Materialien	107
Tabelle 11.5: innere Wärmedurchlasswiderstände der untersuchten Varianten	108
Tabelle 11.6: Wärmedurchgangskoeffizienten der Sanierungsvarianten	109
Tabelle 11.7: spezifische Heizwärmebedarfe und Verbesserung gegenüber Bestand	110
Tabelle 11.8: Preise für reine Dämmstoffe in € pro m^2 Wandfläche	111
Tabelle 11.9: Preise für Konstruktionen pro m^2 Wandfläche	112
Tabelle 12.1: Übersicht jährliche spezifische Heizwärmebedarfe	120
Tabelle 13.1: Raumklimabedingungen nach WTA-Merkblatt 6-2-01	129
Tabelle 1.2: Wärme- und Wärmeübergangskoeffizienten nach WTA-Merkblatt 6-2-01/D	134
Tabelle 13.3: wichtigste Materialkennwerte der verwendeten Materialien	162
Tabelle 13.4: diffusionsäquivalente Schichtdicken der Innendämmungsvarianten	163

1. Einleitung

Der Erhalt historischer Bausubstanz kann langfristig nur durch deren Weiternutzung erfolgen. Im Spannungsfeld zwischen zeitgemäßem Nutzungskomfort und den bauphysikalischen Eigenschaften solcher Bauwerke, kam es in der Vergangenheit zu nicht sachgerechten Maßnahmen und Eingriffen, welche den unwiederbringlichen Verlust zahlreicher Gebäude nach sich zog.

Zur Untersuchung möglicher Maßnahmen und Problemstellungen befasst sich die vorliegende Arbeit im Wesentlichen mit der energetischen Sanierung eines sogenannten „Appenzeller Strickbaus“ im Rahmen des EU-Projektes „3EnCult“.

Zunächst wird hierzu eine kurze Einführung zu Strickbauten allgemein und anschließend zu Appenzeller Strickbauten im Speziellen mit Darlegung des gegenwärtigen Gebäudebestandes gegeben, um für diese Bauweise zu sensibilisieren.

Nach einer Bestandsaufnahme des vorliegenden Objektes folgt die Darstellung physikalischer Grundlagen, welche für die weitere Untersuchung von Bedeutung sind. Die anschließende Schwachstellenanalyse deckt konstruktions- und gebäudespezifische Problempunkte auf und schließt mit einer energetischen Bewertung mittels statischer und dynamischer Verfahren.

Da im vorliegenden Fall ausschließlich Innendämmungen in Frage kommen, widmet sich ein Kapitel den Besonderheiten solcher Systeme und bauphysikalischen Problemstellungen, die mit ihnen einhergehen.

Ein weiterer elementarer Bestandteil dieser Arbeit ist die Vorstellung und Bewertung sowohl alternativer als auch der durchgeführten Sanierungsmaßnahmen, welche zunächst ebenfalls energetisch bewertet werden.

Abschließend folgt die Beurteilung möglicher Schadenspotentiale der durchgeführten Maßnahmen sowie der verschiedenen Alternativmaßnahmen mithilfe hygrothermischer Simulationen.

2. Der Appenzeller Strickbau

Bei dem untersuchten Objekt handelt es sich um einen sogenannten „Appenzeller Strickbau“. Zur Deutung dieses Begriffes sind einige Hintergrundinformationen hilfreich, die im Folgenden dargelegt werden.

2.1. Block- und Strickbau

Nach [1] ist der Strickbau wie folgt definiert:

„Strickbau: Bezeichnung für einen Blockbau mit Vorstößen (Gwettkopf) aus sich an den Enden kreuzenden Balken in einigen Gegenden der Schweiz. Gestrickte Wände sind entsprechend Blockbauwände“

Es handelt sich also zunächst lediglich um eine sprachliche Variation der weit verbreiteten, hölzernen Blockbauten. Der Blockhausbau lässt sich dabei bis in die frühe Bronzezeit (2. Jahrtausend v. Chr.) zurückverfolgen als man dazu überging, die Konstruktionen nicht mehr über Pfosten im Boden zu befestigen, sondern in Ständer- und Blockbauweise Konstruktionen zu schaffen, die auf dem Boden stehen. Im Laufe der Jahrhunderte wurden Blockbauten im breiten Spektrum vom Stall über die Scheune, das einfache Wohnhaus bis hin zum repräsentativen Bauernhaus hergestellt. [1]

Innerhalb Europas sind viele Varianten solcher Bauten aufgrund ihres hohen Holzverbrauches am weitesten in der großen Waldregion verbreitet, die sich über Schweden, Finnland und das europäische Russland bis Sibirien erstrecken. Darüber hinaus findet man sie auch überall dort vermehrt, wo große Waldbestände vorhanden sind. So z.B. auf dem Gebiet der ehemaligen UdSSR sowie Tschechien, der Slowakei, Polen, Rumänien und des Balkans. In der Alpenregion sind sie vornehmlich in Oberbayern, Österreich mit Südtirol sowie der Schweiz zu finden. [1]

Er grenzt damit geographisch in einer östlich gelegenen Kette von Skandinavien bis in die Schweiz bzw. den Balkan an die westlich hiervon verbreitetere Bauweise des Fachwerk- und Ständerbaus [2].

Eine klare, allgemeine Unterteilung hinsichtlich der Art und Weise, wie die gewachsenen Holzstämme bearbeitet wurden, ist nicht möglich, da in allen besagten Ländern sowohl behauene bzw. besägte als auch naturbelassene Rundhölzer vorzufinden sind (Abbildung 2-1, Abbildung 2-2). Darüber hinaus gibt es Varianten mit Halblingen oder ovalen Querschnitten [1]. Besonders bei der Verwendung von Rundhölzern erfolgte häufig eine Abdichtung der Fugen mit Naturstoffen (z.B. Moos, Abbildung 2-3).

Wie eingangs bereits angeklungen ist, resultieren die verschiedenen Bezeichnungen vor allem aus der Art und Weise der Eckverbindungen, was die Wichtigkeit dieses Konstruktionsdetails für die damaligen Baumeister heraushebt. Gebräuchliche Begriffe der Eckverbandsherstellung bzw. des Eckverbandes an sich sind hierbei „Schroten“, „Wetten“, „Stricken“, „Gehrsatz“ oder auch „Loftwerk“, was sich in den Bezeichnungen der Blockwand als „Strickwand“, „Gwettwand“ oder „Schrotwand“ wiederfindet [2]. „Stricken“ und „Wetten“ sind dabei vor allem in der Schweiz gebräuchlich [1].

Die Eckausbildung ist dabei essentiell für Stabilität und Dauerhaftigkeit von Blockbauten. Eine fachgerechte Ausbildung verhindert das Abscheren der Balkenköpfe und Verdrehungen, z.B. infolge hygri-scher Beanspruchungen [3]. Gegebenenfalls sind hierzu, vor allem bei waagrechten Lagerflächen, Holzdübel einzubauen [2].



Abbildung 2-1: einfacher Blockbau mit Rundhölzern und Vorstoß;
<http://www.geschichtserlebnisraum.de/rekonstruktionsbauten.html>, 03.05.2012



Abbildung 2-2: Blockbau mit besägten Hölzern (einbindende Innenwand zu sehen);
<http://www.payer.de/tropenarchitektur/troparch046.htm>, 03.05.2012



Abbildung 2-3: Abdichtung mit Moos; <http://www.payer.de/tropenarchitektur/troparch046.htm>, 27.08.2012

Grob lassen sich Eckverbindungen in jene mit und solche ohne Vorstoß unterteilen. Als Vorstoß wird hierbei der Überstand an den Kreuzungspunkten der aufeinandertreffenden Balkenlagen bezeichnet (vgl. Abbildung 2-4). Auch für diesen gibt es als entsprechende Bezeichnungen den „Schrotkopf“, „Wettkopf“ oder „Gwettkopf“ und mehr. Die Länge des Vorstoßes variiert dabei recht stark zwischen 10 und 25cm [1]. Solche Vorstöße übernehmen neben der besseren Lastverteilung an den Eckverbin-

dungen auch die Aufgaben eines konstruktiven Holzschutzes wahr indem sie das feuchteempfindliche Hirnholz ein Stück von der eigentlichen Eckverbindung fernhalten [4].

Auch für die Ausbildung selbst gibt es zahlreiche Varianten. Sie reichen von normalen Verblattungen, Verblattungen mit schwalbenschwanzförmiger Nut (manche Kantone der Schweiz) bis zur Verdübelung [3]. Das Einbinden der Zwischenwände erfolgt in der Regel analog. [1], [2]

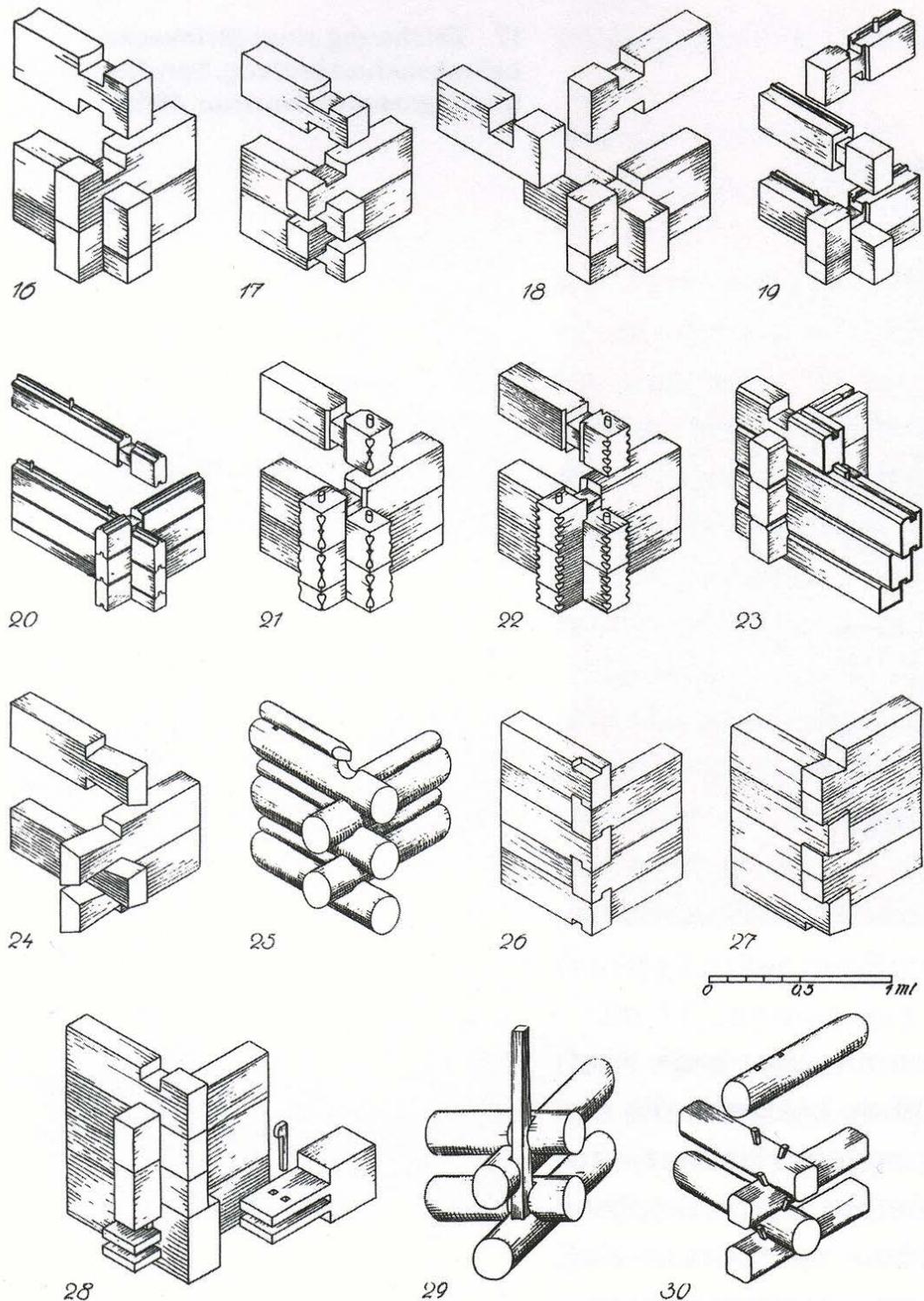


Abbildung 2-4: Auswahl regionaler Eckverbindungen mit und ohne Vorstoß; aus [2]

2.2. Appenzeller Strickbau

2.2.1. Historisches

Wie bereits dargelegt, gibt es aufgrund der großen Verbreitung von Blockbauten regionale Unterschiede. So gibt es selbst innerhalb der Gruppe der schweizerischen Strickbauten Besonderheiten, die von Kanton zu Kanton und selbst von Region zu Region differieren, was anhand des untersuchten Objektes, einem Appenzeller Strickbau, verdeutlicht werden kann.

Charakteristisch für das Appenzeller Land ist dabei die Verteilung vieler, mächtiger Einzelbauten, unabhängig von den Dorfzentren sowie der große Reichtum an historischen Strickbauten. [4]

Während bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts im Appenzeller Land fast sämtliche Wohnhäuser und Landwirtschaftsbauten in Strickbauweise hergestellt wurden, verschwand diese Bauweise ab Mitte des letzten Jahrhunderts in Appenzell sowie der übrigen Schweiz fast komplett. Nicht zuletzt, da zimmermannsmäßige Verbindungen generell immer mehr durch preiswerter und schneller herzustellende Holzprofile mit entsprechenden metallenen Nagel- und Schraubverbindungen verdrängt wurden, was auch dazu führte, dass immer weniger Zimmerleute solche Techniken beherrschten. Hinzu kam bereits ab dem 18. Jahrhundert eine zunehmende Holzknappheit aufgrund steigender Bevölkerungszahlen, der Industrialisierung und steigendem Wohlstand, welche zu einer vermehrten Errichtung von Neubauten führten. In dieser Zeit geriet der Strickbau aufgrund des großen Holzverbrauches in Verruf. [4]

Als zum Ende des 19. Jahrhunderts wieder mehr Holz zur Verfügung stand, nahm der Bau von Strickbauten jedoch weiter ab. Dies ist auf den Aufschwung der Textilindustrie zurückzuführen, der zusätzliche Arbeitskräfte band, welche für Zimmereibetriebe nicht mehr zur Verfügung standen. Zusätzlich kam es aufgrund der Aufhebung des Zunftwesens und der Einführung der Gewerbefreiheit zu einer Verdrängung einheimischer Handwerker durch Zimmerleute von außerhalb, welche den Bau neuer Häuser übernahmen und dabei Techniken aus ihrer Heimat anwandten. [4]

So war bereits Ende des 19. Jahrhunderts eine stetige Abnahme des Bestandes an Strickbauten zu verzeichnen. Als die Nachfrage nach Textilprodukten Anfang des 20. Jahrhunderts abnahm, kam es außerdem zu einem starken Bevölkerungsrückgang, der neben dem Ausbleiben neuer Bauten auch zum Rückbau bestehender führte. [4]

Da in manchen Gemeinden der Schweiz der Blockbau örtlich vorgeschrieben ist, imitieren neue Bauweisen den Baustil teilweise, haben mit diesem jedoch nur noch wenig gemein. So werden Ständerbauten oder Massivbauten erstellt und lediglich in ihrem Aussehen beispielsweise durch Bretterverkleidungen angepasst. Daher fristet der Strickbau schweizweit heute ein Nischendasein, da er wegen seines großen Holzverbrauchs als unökonomisch gilt, starke Verformungen durch hygrische Beanspruchungen begünstigt und die Gestaltungsfreiheit der Grundrisse von den natürlichen Abmessungen der Hölzer eingeschränkt ist. [4]

Umso größere Bedeutung ist daher dem Erhalt des Gebäudebestandes beizumessen.

2.2.2. Konstruktionsmerkmale

Dokumentationen in Form von Detail- und Konstruktionsplänen von Strickbauten existieren praktisch keine, da das Wissen vor allem mündlich und durch Anschauung weitergegeben wurde. So profitiert das Wissen um diese Bauweise vor allen Dingen aus Erzählungen und dem Rückbau.

Die Appenzeller Strickbautechnik zeichnet sich besonders durch die hoch entwickelten Eckverbindungen aus. Der sogenannte „Appenzeller Strick“ ist dabei eine schwalbenschwanzförmige Verkämmung ohne Vorholz. In der Regel wurde diese Technik erst ab dem 18. Jahrhundert sukzessive als Ersatz für die einfachen Strickverbindungen (Verkämmungen) mit Vorstoß verwendet. [4].

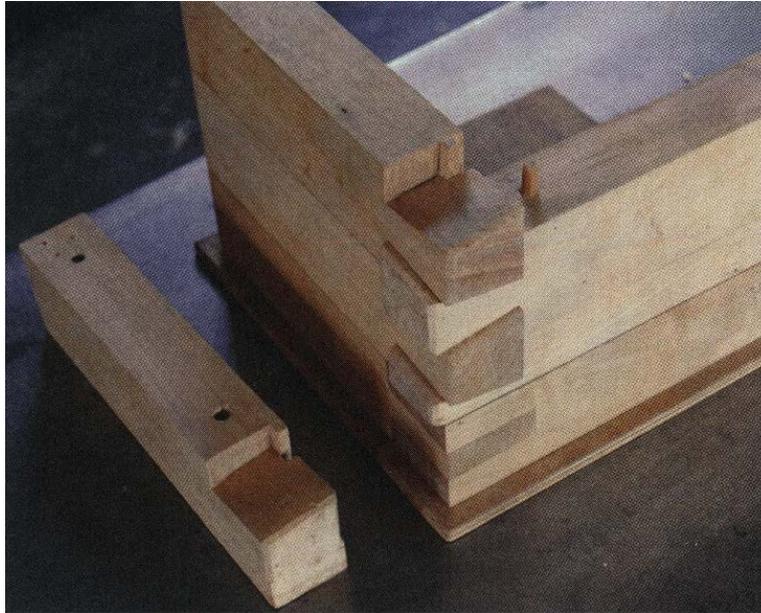


Abbildung 2-5: Modell eines Appenzeller Stricks mit Sicherung; aus [4]

Diese weiterentwickelte Verbindungstechnik war nötig, da ein neuer Typus der Fassadengestaltung zum Einsatz kam und hierbei die Vorstöße entsprechender Verbindungen im Wege gewesen wären.

Ursprünglich verfügten Appenzeller Strickbauten nämlich lediglich über eine einfache Massivholzfasade mit spärlicher Befensterung. Im 17. Jahrhundert erfolgte dann die allmähliche Entwicklung vorgehängter Rasterfassaden aus identischen Elementen mit Bandfenster-Öffnungen und in die Brüstungsebene integrierten Zugläden. Durch diese Fenster konnte ein höherer Lichteintrag in die Wohnungen erfolgen, was nötig war, da im Appenzeller Land wie bereits beschrieben eine seit dem Mittelalter gewachsene Textilproduktion sesshaft war, wobei die Produktion dezentral in Heimarbeit erfolgte und hierfür ausreichend Licht zur Verfügung stehen musste. Zunächst nur vor den Arbeitsräumen vorhanden, wurde die Bauweise bald nach und nach für das gesamte Gebäude übernommen. Solche Fassaden werden als „Täferverkleidung“ bezeichnet und sind eine Weiterentwicklung von im Inneren bereits lange gebräuchlichen Wandverkleidungen (s. Abbildung 2-6). [4]

Durch die Bekleidung der Fassaden wurde nun dazu übergegangen, das vormals ungeschützte Stirnholz der Wand- und Eckvorstöße zu verkleiden, was besonders hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von großem Vorteil ist. Allerdings wurde oftmals auch im Rahmen einer solchen Fassadenanbringung an älteren Gebäuden mit Vorstößen an den Eckverbindungen überstehendes Hirnholz einfach bis auf wenige Zentimeter abgesägt, so dass hier auf eine besondere Gewährleistung des konstruktiven Holzschutzes zu achten war, was in vielen Fällen leider unterblieb bzw. mit den Jahren vorhandene Verkleidungen zerfielen und das Hirnholz nun gänzlich ungeschützt war. [4]



Abbildung 2-6: Hauptfassade (Ost) des untersuchten Objektes mit Appenzeller Täfer

Die einzelnen Balkenlagen der Strickwände sind üblicherweise zur Verhinderung von Lageänderungen verdübelt und die horizontalen Lagerfugen, wie in 2.2.1 bereits bebildert, mit Naturstoffen (Moos, Lehm, Werg etc.) ausgefüllt.

2.2.3. Gebäudebestand

Der Kanton Appenzell Ausserrhoden, und damit laut [4] übertragbar auf Innerrhoden, weist hinsichtlich der Wohnbauten schweizweit den höchsten Anteil an historischen Bauten auf (ältestes Appenzellerhaus mittels dendrochronologischer Untersuchungen auf 1452 datiert). In [4] sind das alle Bauten, die bis 1918 erstellt wurden. Da bis Mitte des 19. Jahrhunderts, wie bereits erwähnt, fast sämtliche Bauten in Strickbauweise hergestellt wurden, erscheint diese Kategorisierung auch für die Beurteilung des Bestandes an Strickbauten brauchbar.

Wie auf Abbildung 2-7 zu sehen, macht der historische Gebäudebestand in weiten Teilen des Kantons einen erheblichen Anteil aus.

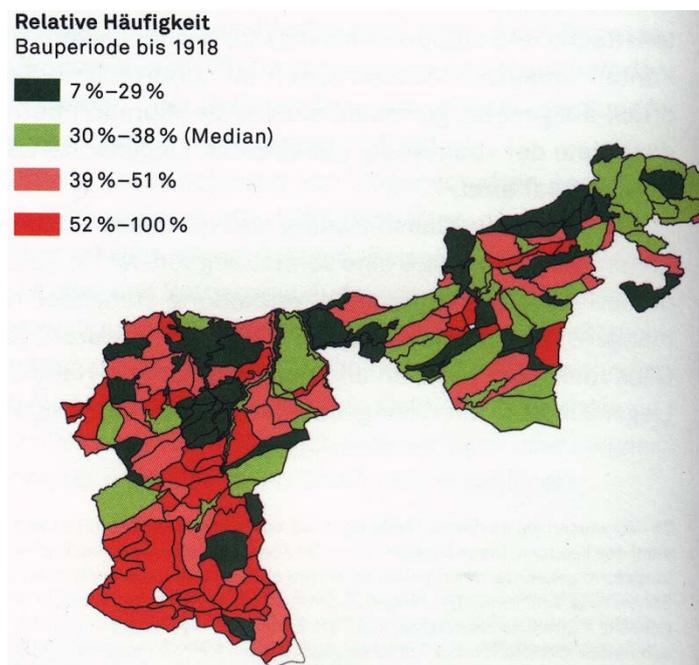


Abbildung 2-7: relativer Anteil historischer Gebäude im Appenzell Ausserrhoden; aus [4]

Alleine für Gebäude, die vor 1910 erbaut wurden, gibt [4] einen Bestand von 8500 Gebäuden an, was bei einer Gesamtheit von 26 000 Gebäuden kantonweit einem Anteil von 33% entspricht, von denen wiederum ein sehr hoher Teil als Strickbauten zu kategorisieren ist.

Betrachtet man nun die Gebäudeverluste dreier ausgewählter Gemeinden alleine zwischen 1956 und 1996 wird deutlich, wie viele historische Bauten in den letzten Jahrzehnten unwiederbringlich verloren gegangen sind. Hier verweist [4] auf Untersuchungen, wonach Wohngebäude im Durchschnitt in Mitteleuropa mindestens 100 Jahre alt werden und damit im betrachteten Zeitraum auch unzählige Strickbauten rückgebaut wurden.

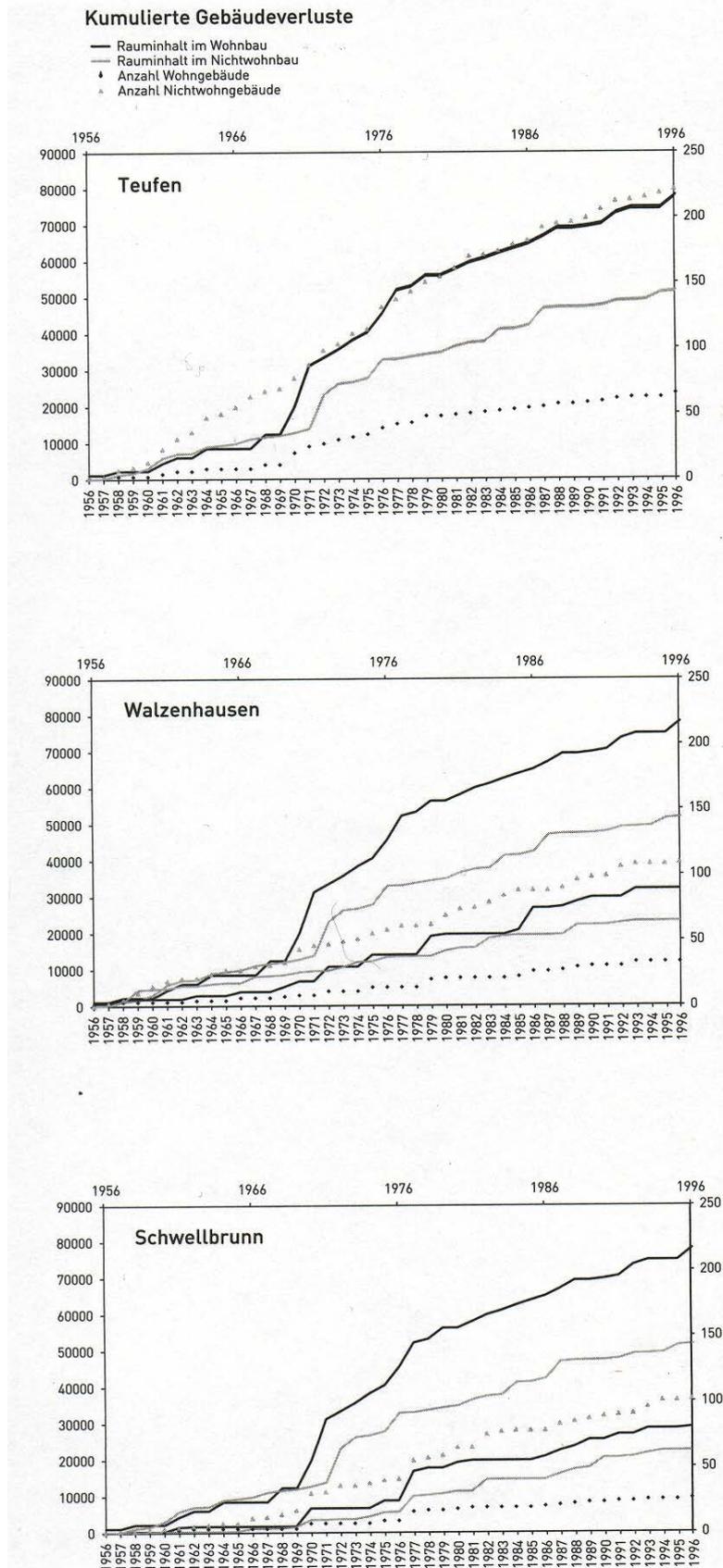


Abbildung 2-8: Gebäudeverluste zwischen 1956 und 1996 dreier ausgewählter Gemeinden des Kantons Appenzell Ausserrhoden; aus [4]

3. Physikalische Grundlagen

Zur Beurteilung der Simulationsergebnisse, der Berechnungsergebnisse, der Abschätzung kritischer Konstruktionen und vielem mehr sind eingehende Kenntnisse der physikalischen Vorgänge in den betrachteten Bauteilen notwendig, von denen die wichtigsten nachfolgend dargelegt werden sollen.

3.1. Wärme

3.1.1. Wärmespeicherung

Als Maß für das Wärmespeichervermögen eines Stoffes dient z.B. die spezifische Wärmespeicherkapazität c . Dabei erfolgt der Erwärmungs- bzw. Abkühlungsvorgang umso langsamer, je größer c ist.

Wärmespeicherung feuchter Baustoffe

Im bauphysikalisch relevanten Bereich besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Enthalpie (Wärmeinhalt unter isobaren Verhältnissen) und der Temperatur eines Stoffes.

Bei feuchten Stoffen addiert sich hierzu die Enthalpie des enthaltenen Wassers, welche ihrerseits von dessen Aggregatzustand abhängt. Da dieser auch von den Porenradien im Baustoff abhängt, kann eine genaue Enthalpiebestimmung nur bei Kenntnis der Porenradienverteilung bzw. Feuchtespeicherfunktion erfolgen. [6]

3.1.2. Wärmetransport

Der Wärmetransport ist an Materie gebunden und findet von Bereichen höherer Temperaturen zu Bereichen niedrigerer statt. Bei Gasen und Flüssigkeiten erfolgt die Wärmeweitergabe zusätzlich durch **Konvektion**, also dem Fortbewegen der Moleküle mit ihrem gespeicherten Energieinhalt, im zur Verfügung stehenden Raum.

Zusätzlich existiert noch der materieungebundene Wärmetransport infolge **Wärmestrahlung**, dem wichtigsten Transportmechanismus, da mehr thermische Energie durch Strahlung als durch Konvektion ausgetauscht wird [7]. Die von einem Körper emittierte Wärmestrahlung ist dabei abhängig von seinem Emissionsvermögen, ausgedrückt durch den Emissionsgrad ϵ . Hierbei wird die emittierte Strahlung des vorliegenden Körpers ins Verhältnis zum sogenannten schwarzen Strahler ($\epsilon=1,0$), einem Körper, der die höchstmögliche Energiemenge abstrahlt, gesetzt. Herkömmliche Baustoffe (Holz, Mörtel, Glas,...) besitzen Emissionsgrade um die 0,90, polierte Metalle nähern sich $\epsilon = 0$ an.

Wärmeleitfähigkeit

Das Vermögen eines Stoffes, Wärme zu leiten, wird hierbei mit der Wärmeleitfähigkeit λ , welche stark von der Rohdichte eines Stoffes abhängig ist, beschrieben, wobei die Wärmeleitfähigkeit grundsätzlich mit der Rohdichte zunimmt. In Bereichen sehr niedriger Rohdichte ist die Wärmeleitfähigkeit jedoch ebenfalls erhöht, da hier zwar eine geringe Wärmeleitung über den Feststoffanteil erfolgen kann, jedoch ein erhöhter Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung in den Porenräumen stattfindet (s. Abbildung 3-1).

Einige Materialien, wie z.B. Holz, besitzen eine Anisotropie was ihre Wärmeleitfähigkeit anbelangt. So beträgt für Kiefernholz die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung rund 0,35W/mK, senkrecht zur Faser lediglich 0,14W/mK [8].

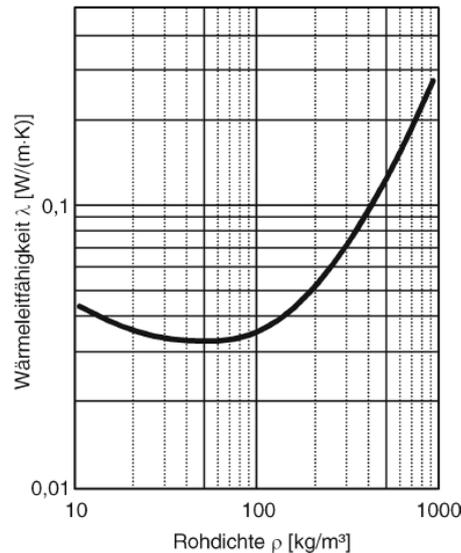


Abbildung 3-1: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Rohdichte; aus [9]

Wärmeleitung feuchter Baustoffe

Bei Standardmessungen der Wärmeleitfähigkeit λ wird der Einfluss der Wasserdampfdiffusion mit erfasst. [6]

Wärmestrom

Die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit transportiert wird, lässt sich durch den Wärmestrom Φ ausdrücken. Wird diese auf eine Bauteilfläche bezogen, so erhält man die Wärmestromdichte q .

Wärmetransport durch Enthalpieströme mit Phasenänderung

Im Gegensatz zu Wärmeströmen aufgrund Temperaturänderungen sind Enthalpieströme immer an strömendes Medium gebunden. Da Konvektionseffekte durch Gesamtdruckunterschiede in der Regel unberücksichtigt bleiben, dient als Medium hier lediglich diffundierender Wasserdampf und durch Kapillardrücke bewegtes flüssiges Wasser.

Der größte Einfluss von Feuchtebewegungen ist hierbei bei hohen Feuchtebelastungen und gleichzeitiger Anwesenheit von Temperaturgradienten vorhanden (z.B. Schlagregenbelastung bei geringer Außentemperatur).

Während die Enthalpieströme durch Flüssigtransport im Vergleich zu anderen Wärmeströmen jedoch praktisch vernachlässigbar sind, können Dampfdiffusionsströme verbunden mit Phasenänderungen (z.B. Trocknungsvorgänge) für die Wärmebilanz von großer Bedeutung sein und sind durch einen entsprechenden Ansatz zu berücksichtigen. Der feuchtebedingte Wärmetransport wird hierbei nicht durch die Feuchte einer Schicht, sondern durch den Wassergehalt der an sie angrenzenden Schichten sowie den Diffusionswiderstand der Schicht beeinflusst. [6]

stationäre Wärmebewegungen

Wenn keine inneren Wärmequellen oder -senken vorhanden sind sowie keine zeitliche Änderung der anliegenden Temperaturen stattfindet, liegt ein stationärer Zustand vor. Hierbei sind die Wärmeströme im Bauteil konstant und die Temperaturverläufe können mit geschlossenen Formeln oder graphisch ermittelt werden.

Für viele Anwendungsfälle, wie z.B. die Bilanzierung von Jahresheizwärmebedarfen, ist diese Betrachtung ausreichend.

instationäre Wärmebewegungen

Diese liegen vor, wenn zeitliche veränderliche Temperaturen und/oder interne Wärmequellen/-senken berücksichtigt werden sollen, und die Wärmeströme damit nicht mehr konstant sind. In diesen Fällen sind nicht mehr nur die Wärmeleitfähigkeiten eines Bauteils von Bedeutung, sondern es müssen die Einflüsse von Wärmespeicherkapazität und Rohdichte beachtet werden. Die Beschreibung solcher Zustände kann nur über Differentialgleichungen erfolgen.

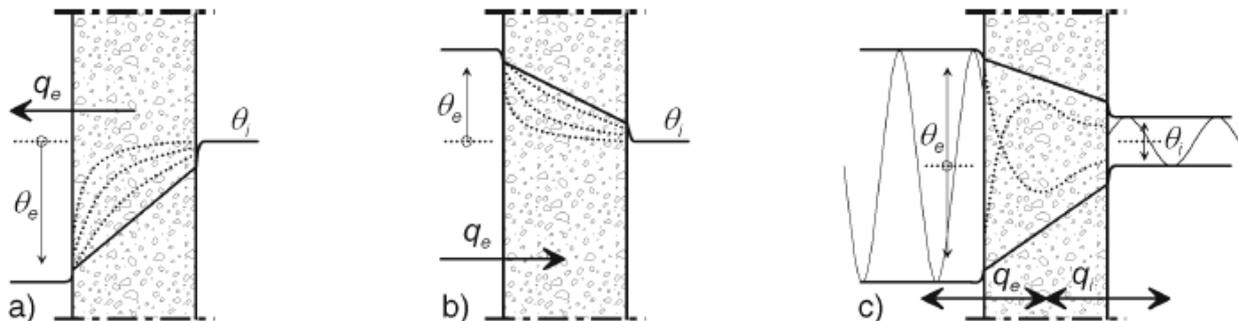


Abbildung 3-2: Beispiele instationärer Temperaturrandbedingungen, von links nach rechts: Abkühlung, Erwärmung, periodische Temperaturwechsel, aus [9]

3.1.3. Wärmeübergang

Kommt es zu einem Wärmeaustausch zwischen Gasen oder Flüssigkeiten und festen Stoffen an ihren Oberflächen, wird dies als Wärmeübergang bezeichnet, welcher durch den Wärmeübergangskoeffizienten α beschrieben wird, der sowohl einen Konvektions- als auch einen Strahlungsanteil enthält. [6]

Hierbei sind die Wärmeübergangskoeffizienten für stark exponierte Bauteile oder Gebäudeoberflächen in größerer Höhe aufgrund stärkerer Luftströmungen und Verwirbelungen erhöht.

Des Weiteren besteht eine große Abhängigkeit der Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung von der Temperaturdifferenz Bauteiloberfläche zur Luft. [10]

3.2. Feuchte

3.2.1. Feuchtespeicherung

Feuchtespeicherung in der Luft

Luft kann nur eine begrenzte Menge Wasser in seiner gasförmigen Phase in Form von nicht sichtbarem Wasserdampf aufnehmen. Diese Menge ist stark von der Temperatur abhängig und nimmt mit ihr zu. Die Konzentration des Wasserdampfes wird dabei mithilfe der sogenannten Luftfeuchte ausgedrückt, wobei zwischen relativer und absoluter unterschieden werden kann:

- absolute Luftfeuchte: Wasserdampfkonzentration v [$\frac{g}{cm^3}$]
- relative Luftfeuchte $\Phi = \frac{v}{v_{sat}}$ [-]

v_{sat} ist hierbei die maximal lösliche Konzentration (Sättigung) an Wasserdampf für die entsprechende Temperatur.

Bauphysikalisch gebräuchlich ist daneben noch die Beschreibung der Wasserdampfmenge als (Wasserdampf-)Partialdruck anstatt als Konzentration. Hiermit wird derjenige Druck beschrieben, den man dem Wasserdampf entsprechend seinem Anteil an der Luft zuteilen müsste, damit zusammen mit den übrigen Gasbestandteilen der Luft, die ebenfalls einem ihrer Menge entsprechenden Partialdruck zugeteilt bekommen, ein Gesamtdruck von ca. 1bar vorliegt, der für das Luftgemisch an der Erdoberfläche kennzeichnend ist. [8]

Daher kann die relative Luftfeuchte auch über das Verhältnis der Wasserdampfpartialdrücke dargestellt werden:

$$\Phi = \frac{p}{p_{sat}} [-]$$

Die Temperaturabhängigkeit des Wasserdampfgehaltes der Luft wird besonders gut im sogenannten Carrier-Diagramm deutlich (Abbildung 3-3).

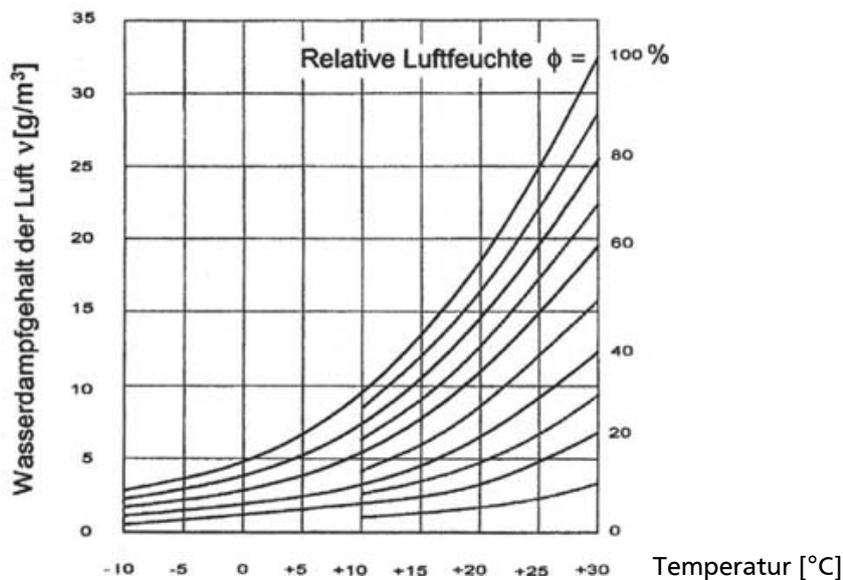


Abbildung 3-3: Carrier-Diagramm; aus [8]

Mit sinkender Temperatur reduziert sich hier bei gleichbleibender relativer Luftfeuchte der Wassergehalt der Luft. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass beispielsweise ein Wasserdampfgehalt von 10 g/cm^3 bei 20°C einer relativen Luftfeuchte von etwa 55% entspricht. Wird die Temperatur nun sehr schnell um 5K reduziert, kann die Luft keinen Wasserdampf abgeben und die relative Luftfeuchte steigt auf 75%. Bei weiterer Verringerung der Temperatur auf nur noch 10°C beträgt die relative Luftfeuchte im vorliegenden Fall 100%, d.h. die Luft ist wasserdampfgesättigt und hat ihren Taupunkt/ihre Taupunkttemperatur erreicht. Da die relative Luftfeuchte nicht mehr als 100% betragen kann, ist das übrige Wasser nicht mehr als Wasserdampf in der Luft gelöst, sondern fällt aus und wird als Nebel, Wolken oder Tau sichtbar. Die ausgefallte Wassermenge kann hierbei aus der Differenz zwischen Wasserdampfgehalt der Luft bei Tautemperatur und maximalem Wasserdampfgehalt bei der vorliegenden, niedrigeren Temperatur bestimmt werden.

Anhand der Raumlufttemperatur lässt sich die Tautemperatur berechnen oder mittels Tabellen (z.B. DIN 4108-3) über den für die vorliegende Raumlufttemperatur charakteristischen Wasserdampfpartialdruck in Verbindung mit der angesetzten relativen Luftfeuchte bestimmen.

Tauwasser- und Schimmelbildung an Bauteiloberflächen

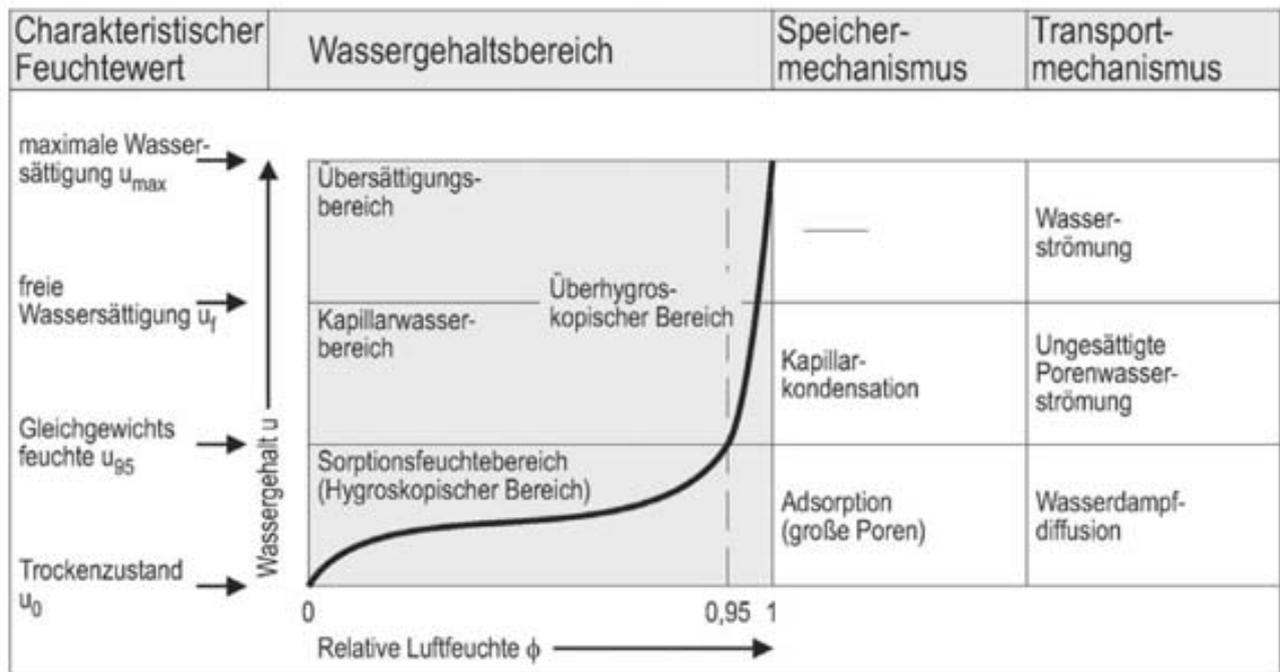
Zu beachten ist, dass die zuvor dargelegte Taupunkttemperatur nur angibt, bis auf welche Temperatur die Luft abgekühlt werden kann, bis sie eine nicht saugfähige und nicht hygroskopische Oberfläche (Glas- oder Metall) befeuchtet. Für feinporige, saugfähige Oberflächen wie sie bei Baustoffen häufig vorhanden sind, ist der Sachverhalt komplexer. Dort steigt mit absinkender Oberflächentemperatur allmählich der Wassergehalt in der oberflächennahen Zone (Grundlage für sogenanntes „Schimmelpilzkriterium“).

Feuchtespeicherung in Baustoffen

In Kontakt mit feuchter Luft bleiben nicht hygroskopische Baustoffe trocken, während hygroskopische so lange an den inneren Oberflächen ihres Porensystems Wassermoleküle binden, bis sie eine dem Feuchtezustand der umgebenden Luft entsprechenden Ausgleichsfeuchtegehalt erreichen.

Üblicherweise werden die Wassergehaltsbereiche in solchen Baustoffen in drei Bereiche unterteilt (s. Abbildung 3-4), wobei deren Übergänge durch charakteristische Wassergehalte gekennzeichnet sind.

Die Gleichgewichtsfeuchte (Ausgleichsfeuchte) u_{95} kennzeichnet hierbei den Übergang vom hygroskopischen in den überhygroskopischen Bereich, bei dem in der Porenluft eine relative Luftfeuchte von 95% herrscht. Dieser **Sorptionsfeuchtebereich** deckt damit alle Wassergehalte ab, die sich durch Wasserdampfdiffusion bis zum Gleichgewichtszustand ergeben. Er lässt sich durch für jeden Baustoff charakteristische Sorptionsisotherme abbilden, bei denen der Wassergehalt, welcher sich in einem Baustoff nach längerer Lagerung an Luft einstellt, in Abhängigkeit von der jeweiligen relativen Luftfeuchte dargestellt wird. Der Einfluss der Temperatur ist in diesem Bereich für bauphysikalische Betrachtungen vernachlässigbar [8].



31292 © 2006 MH

Abbildung 3-4: Wassergehaltsbereiche in feinporigen, hygroskopischen Baustoffen; aus [8]

An den Sorptionsfeuchtebereich schließt der **überhygroskopische Bereich** mit Wassergehalten größer der Gleichgewichtsfeuchte zu 95% relativer Luftfeuchte an, welcher in zwei Bereiche gegliedert werden kann. Zunächst folgt der **Kapillarwasserbereich**, der sich mittels Feuchtespeicherfunktionen über die Porenradienverteilung bzw. die Saugspannung darstellen lässt [6]. Die Feuchtespeicherfunktionen machen sich hierbei den Effekt zunutze, dass jedem Wassergehalt ein Gleichgewichtszustand zuordenbar ist, bei dem bis zu einem bestimmten Porendurchmesser alle Kapillarporen wassergefüllt und alle größeren leer sind (größter Porendurchmesser mit entsprechendem Kapillardruck). Dies bedeutet, dass ein kapillaraktiver Baustoff in Kontakt mit flüssigem Wasser oder einem anderen überhygroskopisch feuchten Stoff so lange Wasser aufsaugt, bis dieses Gleichgewicht erreicht wird, wobei kleinere Kapillare aufgrund höherer Saugkräfte aus den größeren Wasser absaugen. [8]

Aus der Kombination von Sorptionsisothermen (Mikroporen, bis $\Phi=95\%$) und Saugspannungskurven (Kapillarporen) lässt sich eine Speicherfunktion erstellen, die sowohl die hygroskopischen als auch überhygroskopischen Wassergehalte als Funktion der relativen Luftfeuchte darstellt.

Die obere Grenze des Kapillarwasserbereiches ist die freie Wassersättigung u_f (bei Holzwerkstoffen auch „Fasersättigungsfeuchte“), welche sich einstellt, wenn man einen Stoff einige Zeit drucklosem Wasser aussetzt. Hierbei gilt für grobporige, wasserbenetzbare Stoffe $u_f=u_{\max}$, da eine rasche und vollständige Durchfeuchtung erfolgt. [8]

Bei hydrophilen, feinporigen Stoffen (meiste Baustoffe) folgt dagegen auf den Kapillarwasserbereich der **Übersättigungsbereich** innerhalb dessen eine Porenfüllung nur durch Überdruck, Tauwasserniederschlag oder sehr lange Wassereinwirkung, während der die das Eindringen weiteren Wassers behindernde Porenluft langsam im Porenwasser aufgelöst wird und dadurch entweicht („Nachsauggefekt“), möglich ist. [8]

Hinsichtlich nicht hygroskopischer, nicht kapillaraktiver Baustoffe (z.B. Glas, Metall, manche Dämmstoffe z.B. Mineralwolle) lagert sich Wasser erst bei Unterschreitung der Tautemperatur an. Gleichzeitig erfolgt eine vollständige Trocknung bereits bei relativen Luftfeuchten $\Phi < 100\%$. Sie besitzen daher nur einen Übersättigungsbereich. Kunststoffe hingegen besitzen nur einen hygroskopischen Bereich, wobei sie zunächst keine wasseraufnahmefähigen Porenräume besitzen, sondern erst durch Quellung Wassermoleküle im Polymergefüge eingelagert werden können. [8]

Unabhängig von diesen beschriebenen Kategorisierungen gibt es noch den kritischen Wassergehalt u_{kr} , der jene Grenze beschreibt, bei der die Leistungsfähigkeit für den Flüssigwassertransport in einem austrocknenden Baustoff so weit abgesunken ist, dass die Wasserverdunstung an dessen Oberfläche nicht mehr befriedigt werden kann. Dann kommt es zu einem starken Rückgang der Verdunstung, da die Baustofffeuchte in der oberflächennahen Zone in kurzer Zeit stark absinkt.

In Abbildung 3-5 ist die fortschreitende Füllung von Poren mit Wasser unter Angabe der relevanten Mechanismen schematisch dargestellt.

Zunächst kommt es dabei zur Anlagerung eindringenden Wasserdampfes in den Porenwänden (I). Sobald die Porenwände dann mit einer oder mehreren Molekülschichten (Sorbatschicht) belegt sind, ist der Porenraum für Wasserdampf diffundierbar (II). Infolge von Kapillarkondensation füllen sich die Verbindungen zwischen Poren mit Wasser (III), wobei die Poren selbst mit Luft, Wasserdampf und an den Wänden der Sorbatschicht belegt sind. Der Flüssigwassertransport in den Porenverbindungen geht dabei deutlich schneller vonstatten als die Diffusion innerhalb der Poren.

Haben sich weitere Wassermoleküle an der Porenwand angelagert, kann Wasser auch innerhalb der Sorbatschicht zunächst durch Oberflächendiffusion (IV) und dann in flüssiger Form transportiert werden (V). Durch immer weitere Einlagerung von Wasser ist die Pore letztlich wassergesättigt (VI).

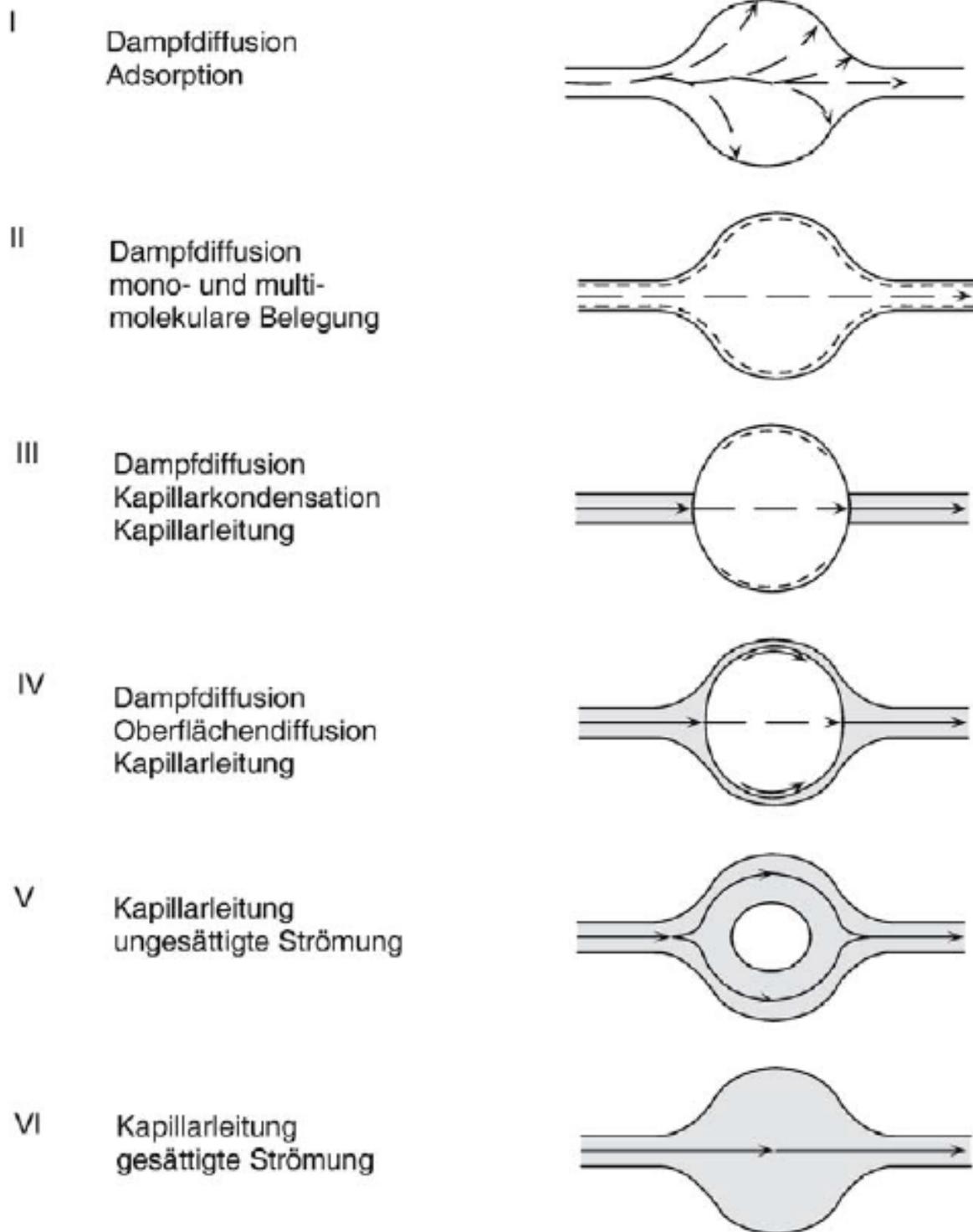


Abbildung 3-5: Phasen fortschreitender Durchfeuchtung poröser Baustoffe; aus [9]

3.2.2. Feuchtetransport

Diffusion von Wassermolekülen

Treibendes Potential der Diffusion ist stets das Vorhandensein von Potentialunterschieden (Wasserdampfpartialdruck), wonach sich mehr Teilchen von Bereichen höheren Potentials in Bereiche mit niedrigerem bewegen als umgekehrt („1. Ficksches Gesetz“).

Während in Luft lediglich Dampfdiffusion vorkommt, liegen in Feststoffen Effusion, Lösungs-, Dampfdiffusion und gegebenenfalls Flüssigwassertransport vor, welche sich gegenseitig beeinflussen und vom jeweiligen Porenradius abhängig sind (Abbildung 3-6).

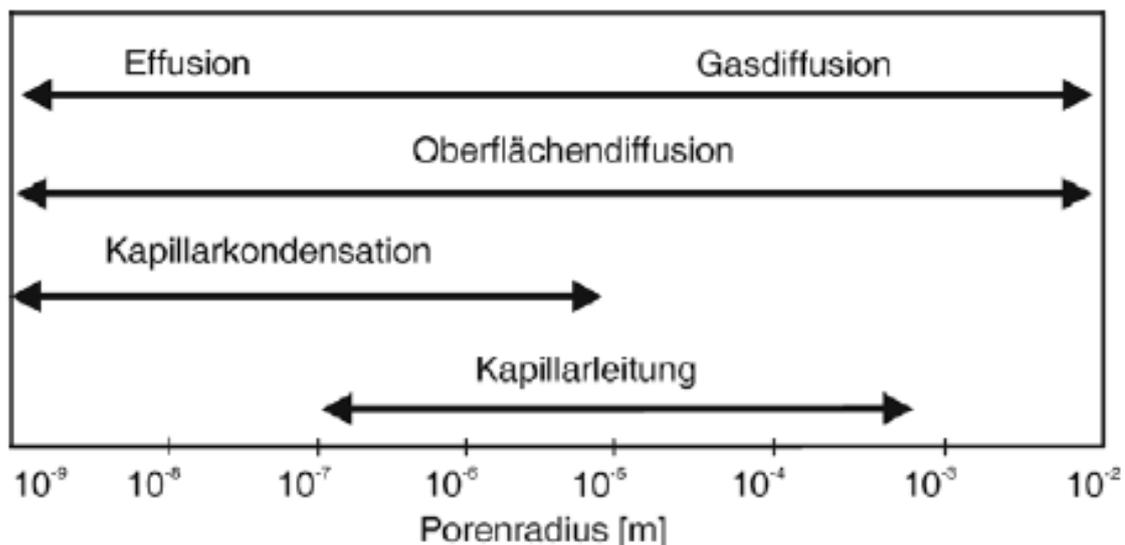


Abbildung 3-6: Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit vom Porenradius; aus [9]

Die **Wasserdampfdiffusion** findet sowohl in der Raumluft als auch in Porenluft von Baustoffen statt, wobei hinsichtlich letzterer ein Porendurchmesser $\geq 100\text{nm}$ (10^{-7}m) [8] erforderlich ist, damit es zu Zusammenstößen von Wassermolekülen untereinander (notwendig zum Transport) und nicht nur mit Porenwandungen kommt. Letzteres wird als **Effusion** bezeichnet, wobei die durch sie verursachte Massenstromdichte bei breit verteilten Porendurchmessern im Vergleich zu jener infolge Wasserdampfdiffusion relativ klein ist. Nach [6] herrscht in Poren mit Radien $< 5 \cdot 10^{-9}\text{m}$ reine Effusion und bei $> 10^{-6}\text{m}$ reine Ficksche Diffusion.

Ab etwa 50-60% relativer Luftfeuchte kommt es in diesem Zusammenhang in ungesättigten Poren zusätzlich zur sogenannten, effektiveren **Oberflächendiffusion**, mit welcher der Flüssigtransport von Bereichen mit höheren Sorbatschichtdicken zu solchen mit niedrigeren beschrieben wird. [9]

Besondere Bedeutung kommt diesem Vorgang im Winterfall zu, wenn Temperaturen und damit Wasserdampfpartialdruck innen größer sind als außen, es sich hinsichtlich der relativen Luftfeuchte jedoch umgekehrt verhält. Wie bereits eingangs erwähnt, tritt der Dampfdiffusionsstrom entlang des Partialdruckgefälles auf. Da sich die relativen Luftfeuchten beidseits des Bauteils unterscheiden, weisen die Sorbatschichten mit der Zeit unterschiedliche Dicken auf. Wird die Schichtdicke nun hinreichend groß, setzt der Flüssigtransport entgegen der Dampfdiffusion ein (Abbildung 3-7).

Rechnerisch betrachtet, werden Oberflächendiffusion und Kapillarleitung in der Regel gemeinsam erfasst, da es sich streng genommen bei ersterer bereits um Flüssigtransport handelt [6].

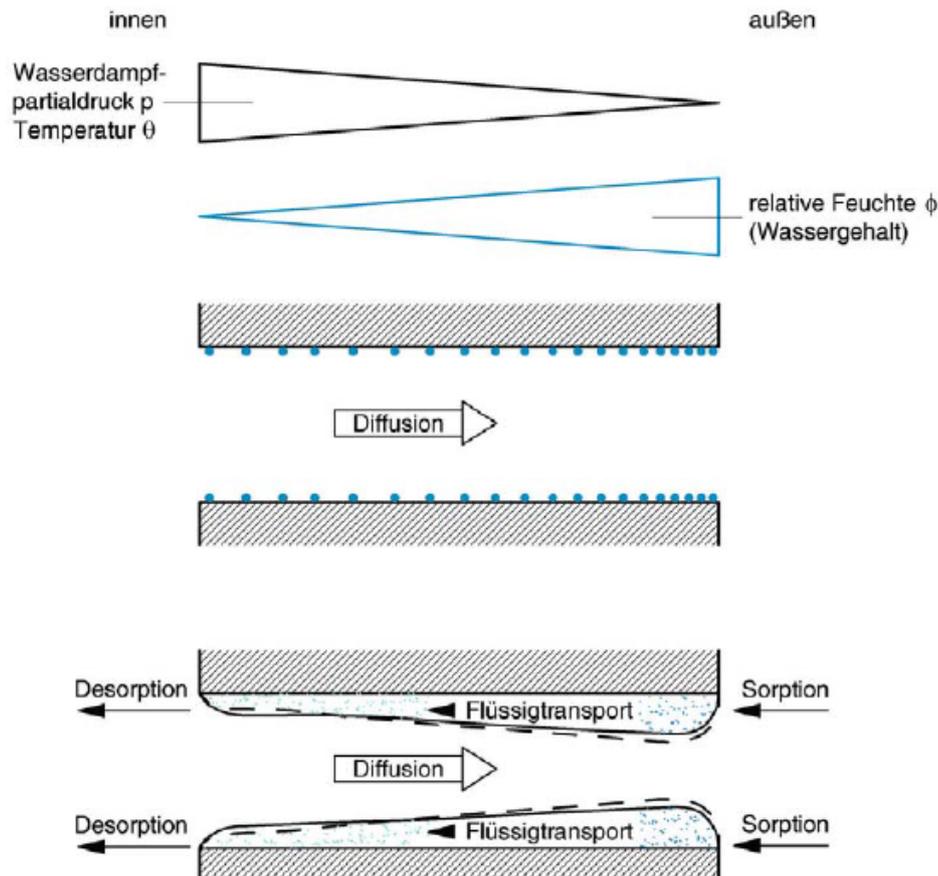


Abbildung 3-7: Oberflächendiffusion im Winterfall; aus [9]

Von **Lösungsdiffusion** spricht man, wenn sich Wasser in Flüssigkeiten oder organischen Polymeren (Holz, Zellulose, Kunststoffe,...) löst. Infolge Wassereinlagerungen kommt es zu Quellungen, wodurch die Diffusion der Wassermoleküle erleichtert wird.

Grundsätzlich ist die Massenstromdichte im Rahmen der Wasserdampfdiffusion von Luftdruck und Temperatur abhängig, da diese sich auf die Beweglichkeit der Wassermoleküle in der Luft auswirken. Bei der im Bauwesen üblichen Bandbreite klimatischer Randbedingungen ist die Änderung jedoch vernachlässigbar. [8]

Bauphysikalisch von großer Bedeutung ist der Wasserdampfdiffusionswiderstand von Baustoffen, welcher durch die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ bzw. bei Bauteilen die äquivalente Luftschichtdicke $s_d = \mu \cdot d$ (d = Bauteil- bzw. Schichtdicke) ausgedrückt wird. Diese Größen charakterisieren die Verringerung der Massenstromdichte durch den jeweiligen Baustoff im Vergleich zu ruhender Luft ($\mu = 1$). Auch hier gibt es Baustoffe, die eine Anisotropie hinsichtlich ihrer Wasserdampfdurchlässigkeit aufweisen. So ist beispielsweise bei Holz der Diffusionswiderstand in Faserrichtung geringer als senkrecht zu ihr [7].

Für die Kategorisierung von Baustoffen kann nach [7] folgende Einteilung vorgenommen werden:

- $s_d \leq 1,5m$: diffusionsoffen
- $0,5m < s_d < 1500m$: diffusionshemmend
- $s_d > 1500m$: diffusionsdicht

Zu beachten ist, dass dieser Wasserdampfdiffusionswiderstand feuchteabhängig ist und mit steigender Feuchte abnimmt.

Für bauphysikalische Berechnungen werden die jeweiligen Widerstände von Baustoffen entweder im Labor ermittelt oder nach Tabellenwerten (z.B. DIN V 4108-4) angesetzt. In letzteren werden häufig zwei μ -Werte für einen Baustoff angegeben, wobei sich der größere auf den trockenen und der kleinere auf den feuchten Baustoff bezieht. In den Werten wird sowohl die Ficksche Diffusion als auch die Effusion berücksichtigt [6].

Wassertransport in ungesättigten Poren

Hierbei spielen vor allen Dingen Kapillarwirkungen eine große Rolle. Hierunter fällt das physikalische Phänomen, dass Flüssigkeiten von Kraftwirkungen an ihren Oberflächen maßgeblich beeinflusst werden, wodurch Wasser selbst entgegen der Schwerkraft transportiert werden kann. Je nach Oberflächenbeschaffenheit kann es hier zu Depressionen oder Aszensionen (s. Abbildung 3-8) kommen, wobei die hierbei auftretende Kraftwirkung an der Grenzfläche der beiden Stoffe Grenzflächen- bzw. Oberflächenspannung genannt wird.

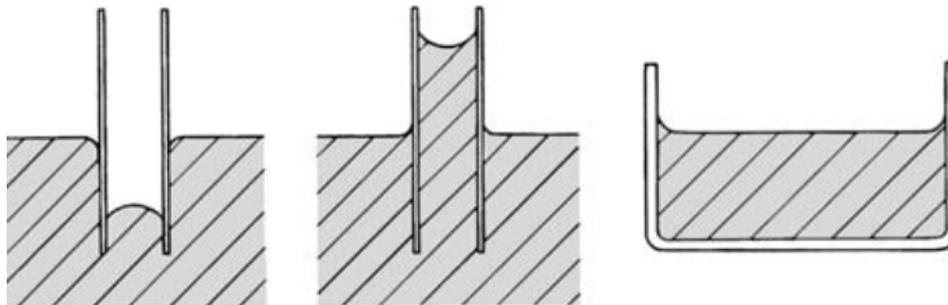


Abbildung 3-8: Wirkungen der Oberflächenspannung (von links nach rechts: Depression, Aszension, Menisken im Brandungsbereich von Wasserflächen); aus [8]

Der auf diese Grenzfläche wirkende Druck wird **Kapillardruck** genannt. Dieser nimmt mit steigenden Oberflächenkrümmungen (kleinere Krümmungsradien) zu und wird bei ebenen Flüssigkeitsoberflächen (unendlich großer Krümmungsradius) Null, was erklärt, dass zur Kapillarleitung bestimmte Porenradien erforderlich sind. Hierbei herrschen in größeren Kapillaren aufgrund des niedrigeren Strömungswiderstandes höhere Sauggeschwindigkeiten als in kleineren, in diesen ist jedoch die Steighöhe größer [6].

Der an den Menisken herrschende Kapillardruck ist hierbei dafür verantwortlich, dass porige, wasserbenetzbare Baustoffen sobald sie mit Wasser in Kontakt kommen, dieses in Poren einsaugen. Beschreiben lässt sich dieses Verhalten über den sogenannten **Wasseraufnahmekoeffizienten** W_w , welcher die aufgesaugte, flächenbezogene Wassermasse für ein bestimmtes Zeitintervall beschreibt. Grundsätzlich nimmt diese Wasserzunahme mit fortschreitender Zeit (und damit größerer Eindringtiefe) aufgrund des größer werdenden Fließwiderstandes immer langsamer zu. Anhand des W_w -Wertes kann somit eine Kategorisierung von Baustoffen von wasserdicht ($W_w \leq 0,001 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) bis stark saugend ($W_w > 2,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$) erfolgen.

Zur Beschreibung der Feuchtestromdichte in einem Baustoff wurde der sogenannten **Flüssigkeitsleitkoeffizient** χ eingeführt, welcher bei homogenen Baustoffen vom Wassergehalt

abhängig ist (beschleunigter Flüssigwassertransport mit zunehmendem Wassergehalt), da zur Kapillarleitung die Kapillarwege einen bestimmten Feuchtegehalt (kritischer Feuchtegehalt) aufweisen müssen. Kommt es, z.B. durch Trocknung, zur Wasserfreiheit größerer Hohlräume, wird der kapillare Transport unterbrochen. Bei feinporigen, mineralischen Baustoffen besitzt χ für den Befeuchtungsvorgang andere Werte als für den Austrocknungsvorgang.

Feuchtetransport im übersättigten Bereich

Da in diesem Bereich, in dem die Wassergehalte oberhalb der freien Wassersättigung liegen, die relative Feuchte überall 100% beträgt, ist der kapillare Unterdruck praktisch null, weshalb es Flüssigtransport infolge Kapillarleitung prinzipiell nicht geben kann.

Dennoch kommt es zu Feuchtwanderungen. Vor allen Dingen in grobporigen Baustoffen ist hierfür die Schwerkraft verantwortlich. Auch unter dem Einfluss von Temperaturgradienten können Dampfdiffusion ebenso wie Dampfdruckunterschiede, die bei Behinderung des Luftaustausches zu Gesamtdruckunterschieden werden, eine wesentliche Rolle bei der Bewegung des Porenwassers spielen.

Da der Feuchtetransport im übersättigten Bereich jedoch modellmäßig schwierig zu erfassen ist und es sich bei solchen Zuständen in der Regel um vorübergehende handelt, ist es im Allgemeinen ausreichend, mit vorhandenen Modellen zum Kapillartransport zu arbeiten. [6]

Feuchtetransport durch strömende Luft

Luftströmungen spielen bauphysikalisch vor allen Dingen bei Fassaden, Kanälen und Luftschichten sowie Fugen eine Rolle und sind etwa bei Winddruckbelastungen ursächlich für Luftwechsel in Räumen oder mitbestimmend für die Durchlüftung hinterlüfteter Konstruktionen.

Generell werden sie durch Druckunterschiede ausgelöst und können durch Mitführen von Wasserdampf oder -tropfen Feuchtestromdichten erzeugen, die um Zehnerpotenzen über denen durch Dampfdiffusion liegen. [8]

Im **Fassadenbereich** ist Luftströmung vor allen Dingen für die Schlagregenbelastung ursächlich, da sie den senkrechten Niederschlag aus ihrer Bahn ablenkt und, trotz etwaiger vorhandener Überstände, an die Fassade führen kann. Bei feuchteempfindlichen Konstruktionen im Bestand ist dies beispielsweise durch eine Verschindelung einzelner, am stärksten feuchtebeanspruchter erkennbar. Die Schlagregenbelastung erreicht ihre Spitzenwerte hierbei an Gebäudekanten und nimmt mit zunehmender Gebäudehöhe zu, da es in diesen Bereichen verstärkt zu Verwirbelungen kommt und die Windgeschwindigkeiten größer sein können.

Bei hinterlüfteten Konstruktionen macht man sich vor allen Dingen die wasserdampfableitende Wirkung der strömenden **Luftschicht** zunutze, wobei sich diese jedoch ungünstig auf den Wärmeschutz auswirkt. Ist der Strömungsweg in solchen Schichten jedoch zu lang, kann eine Sättigung der Luft mit Wasser auftreten und es kommt zu Tauwasserausfall. Ähnlich verhält es sich bei Undichtigkeiten der Gebäudehülle, wo ausströmende Luft auf ihrem Strömungsweg abkühlt und es dadurch zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte mit, im schlimmsten Fall, Tauwasserausfall kommt (z.B. an Balkenköpfen bei Holzbalkendecken).

Feuchtetransport unterhalb des Gefrierpunktes

In den meisten Fällen kann der Einfluss einer Eisbildung auf die Dampfdiffusion unberücksichtigt bleiben, da erst bei hohen Wassergehalten durch Eisbildung der Dampfdiffusionsstrom gesperrt wird. Grund hierfür ist, dass der Diffusionsstrom in großen, wenig verzweigten Poren dominiert und diese erst bei sehr hohen Wassergehalten gefüllt sind. [6]

Hinsichtlich des Flüssigwassertransportes gefriert Wasser in Mikroporen und an Porenwänden erst bei Temperaturen unterhalb von 0°C, da die Gefrieretemperatur abhängig vom Porenradius ist. So tritt Eisbildung zuerst in großen Poren auf, wohingegen in den kleineren der Flüssigwassertransport relativ ungehindert stattfinden kann. [6]

Mithilfe der Feuchtespeicherfunktion ergibt sich aus einem Gefriergrenzpotential (relative Feuchte des gerade noch nicht gefrorenen Porenwassers über den Menisken) nach [6] der maximale Gehalt noch flüssigen und damit beweglichen Wassers bei entsprechender Bauteiltemperatur.

3.2.3. Feuchteübergang

Stoffübergang

Allen Bauteilen haftet als Übergang zur Atmosphäre eine mehr oder weniger ruhende Luftschicht als Grenzschicht an, durch welche der Feuchtetransport mittels Wasserdampfdiffusion erfolgt. Der Widerstand dieser Luftschicht gegen Wasserdampf lässt sich durch den Wasserdampfübergangskoeffizienten β beschreiben und ist abhängig von der Luftströmungsgeschwindigkeit. [8]

Welche Auswirkungen die klimatischen Randbedingungen auf den Feuchteübergang besitzen, lässt sich gut am Beispiel von Fassadenoberflächen darlegen. Während hier im Sommer die Verdunstung von Wasser durch Luftbewegung (Wind) und durch hohe Außenlufttemperaturen gefördert wird, findet im Winter praktisch keine Beeinflussung statt, da der Stoffübergangskoeffizient zwar aufgrund von Winden erhöht ist, zeitgleich jedoch die Fassadentemperatur niedriger ist. Von großem Einfluss ist hingegen die Sonneneinstrahlung.

In geschlossenen Räumen ist der Einfluss von Luftkonvektion und Strahlung vernachlässigbar gering. Hier spielen bei der Ermittlung von Feuchtebelastungssituationen Temperatur und relative Feuchte eine wesentlich größere Rolle. [8]

3.2.4. Instationärer Feuchtetransport in Bauteilen

Während bei der stationären Betrachtung (z.B. GLASER-Verfahren nach DIN 4108-3) aufgrund der konstanten Randbedingungen die Massenstromdichten in allen Einzelschichten gleich groß sind, kommt es bei der instationären Betrachtung zu zeitabhängigen Speicherungs-, Verteilungs- und Abgabevorgängen, welche nicht in geschlossenen Formeln sondern nur noch numerisch beschreibbar sind.

Bei Feuchtebewegungen im Bauteil wirken dabei Wasserdampfdiffusion und kapillarer Wassertransport gleichzeitig, so dass die Feuchtespeicherung adsorptiv und durch Kapillarkondensation erfolgt. Die Wassergehaltsänderungen innerhalb einer Bauteilschicht beruhen dabei auf der Differenz der Flüssigkeitsströme infolge Flüssigwassertransport und Wasserdampfdiffusion in sie hinein und aus ihr heraus. [8]

Die Feuchtespeicherung infolge der sorptiven und kapillaren Wasseraufnahme kann dabei wie bereits beschrieben in einer **Feuchtespeicherfunktion** in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte dargestellt werden, so dass aus der an einer bestimmten Stelle zu einer bestimmten Zeit bekannten relativen Luftfeuchte direkt der Wassergehalt aus der Feuchtespeicherfunktion folgt.

Da mit Feuchtebewegungen in der Regel auch Temperaturveränderungen verbunden sind (s. 3.1.2), die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes von seinem Wassergehalt abhängig ist und auch weitere Kenngrößen sowie Randbedingungen (z.B. Stoffübergang) eine Verknüpfung von Feuchte und Temperatur aufweisen, ergeben sich gekoppelte Gleichungssysteme, die gemeinsam gelöst werden müssen. [8]

Bei der numerischen Lösung sollten die klimatischen Randbedingungen dabei in stündlichen Intervallen vorliegen [8]. Die Wahl der Anfangsbedingungen ist hingegen je nach Betrachtungszeitraum von untergeordneter Bedeutung, da sie nach einiger Zeit keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben.

Wasserdampfspeicherung in Bauteiloberflächen

Da aus Gründen der Energieeinsparung immer luftdichtere Gebäudehüllen realisiert werden, kommt der Klimaregulierung von Räumen durch die Umgebungsflächen eine größere Bedeutung zu als bisher. So kann die vorübergehende Anreicherung von Feuchte in oberflächennahen Bauteilschichten durch Wasserdampfdiffusion den Anstieg der relativen Luftfeuchte in Räumen auf ein unerwünschtes Niveau bremsen. [9]

Austrocknungs- und Befeuchtungsvorgänge

Die Austrocknung eines kapillarporösen Baustoffes kann anhand der Ausführungen von Krischer [8] und der nach ihm benannten Knickpunktskurve dargestellt werden.

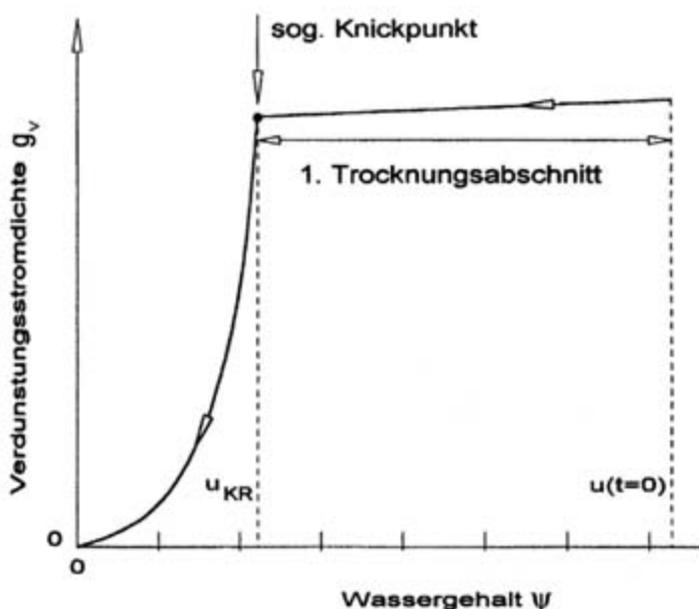


Abbildung 3-9: Knickpunktskurve für Porenbeton nach Krischer; aus [8]

Demnach bleibt die Stromdichte des Massenverlustes so lange weitgehend konstant als der Körper bis zu seiner Oberfläche relativ feucht ist und der Nachschub an Feuchte aus dem Körperinneren leistungsfähiger ist als die Verdunstung (bis dahin herrscht an der Körperoberfläche eine relative Feuchte von 100%).

Kann durch das Absinken des Wassergehaltes die Verdunstungsstromdichte nun nicht mehr voll durch kapillaren Nachschub befriedigt werden, gehen Wassergehalt und relative Luftfeuchte an der Oberfläche zurück und die Verdunstungsstromdichte sackt stark ab (Knickpunkt in Knickpunktskurve). Bei weiterer Verringerung des Wassergehaltes kommt es zu einem weiteren, weniger ausgeprägten Knickpunkt, da dann nur noch eine reine Dampfdiffusion ohne beschleunigenden Flüssigwassertransport möglich ist.

Charakteristisch für kapillarporöse Werkstoffe ist, dass der Endzustand der Befeuchtung wesentlich schneller erreicht wird als jener der Austrocknung.

3.3. weitere Randbedingungen

Die Berücksichtigung der **Strahlungsleistung** senkrecht zur Bauteiloberfläche kann über die Parameter Oberflächenneigung und –orientierung erfolgen, da die entsprechenden Klimadaten meist als diffuse und direkte Sonnenstrahlung auf eine horizontale Fläche vorliegen. Gegebenenfalls ist hier eine Verschattung zu berücksichtigen. Die Absorptionszahl für kurzwellige Strahlung kann zweckmäßigerweise aus Tabellen für die entsprechend vorliegende Oberfläche erfolgen. [6]

Für die **Schlagregenbelastung** ist in der Regel eine Abschätzung auf Grundlage der Windgeschwindigkeit und –richtung sowie des Regens auf eine horizontale Fläche ausreichend. Je nach Berechnungsmodell ist hierbei auch eine Niederschlagsabsorptionszahl anzusetzen und abzuschätzen, welche berücksichtigt, dass ein Teil des auf eine Bauteiloberfläche treffenden Regenwassers wieder wegspritzt. [6]

3.4. Bautechnischer Feuchteschutz

Der beste Feuchteschutz ist grundsätzlich das Fernhalten und schnelle Abführen von Feuchte. So kann beispielsweise die Flüssigwasseraufnahme infolge Kapillarwirkung durch eine kapillar nicht aktive Schicht innerhalb eines Bauteils verhindert werden.

Durch eine zweckmäßige Schichtenfolge, Schichtendicke und Materialwahl sowie gegebenenfalls numerische Simulationen der instationären Feuchte- und Wärmetransportvorgänge stehen umfassende Möglichkeiten zum bauphysikalischen Feuchtemanagement zur Verfügung, welche z.B. die Anwendung von Dampfbremsen (schwieriger zuverlässiger Einbau, evtl. Hindernis für Austrocknung eingedrungener Feuchte) oder Hinterlüftungen (verminderter Wärmeschutz, Bauteildicke, Einfallspforte für Schädlinge/schädigende Stoffe) reduzieren.

Um Tauwasser an Bauteiloberflächen zu verhindern, steht eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung:

- Raumdurchlüftung verbessern: Verringerung relative Luftfeuchte, aber niedrige Infiltrationsraten zur Energieeinsparung erforderlich
- ausreichender Wärmeschutz: reduziert die Gefahr von Tauwasserbildung an Oberflächen durch genügend hohe Oberflächentemperaturen (Bauteilaufbau, Reduktion Wärmeübergangswiderstand an Oberfläche durch Vermeidung von Einbauten, Vorhängen oder Möbeln an entsprechenden Stellen)

- durch entsprechende Nutzung Reduktion der Wasserdampfproduktion
- Raumlufttemperatur zeitlich konstant halten
- Kondensatpuffer in Form von feuchtespeicherfähigen Baustoffen im Oberflächenbereich
- Raumanordnung beachten, da je nach örtlichen Begebenheiten Außenluft vermehrt auf einer Fassadenseite ein- und an anderer austritt

Zur Vermeidung von Tauwasserausfall in Bauteilen, ist vor allem auf eine geeignete Schichtenfolge zu achten (in der Regel von innen nach außen abnehmender Wasserdampfdiffusionswiderstand und zunehmender Wärmedurchlasswiderstand, damit Satttdampfdruck möglichst hoch und der Dampfdruck möglichst niedrig verläuft). Gegebenenfalls kann der Einbau von Dampfbremsen erforderlich werden, welche den Dampfdruck auf der vorm Diffusionsstrom geschützten Bauteilseite erniedrigt und im Übrigen erhöht. Zweckmäßigerweise werden sie daher möglichst nahe an derjenigen Bauteiloberfläche angebracht, welche an das tauwasserliefernde Klima angrenzt. Um Tauwasserbildung an der Dampfbremsenoberfläche zu vermeiden, sollte ein Kondensatpuffer im Bereich des erhöhten Dampfdruckes angebracht werden. [8]

Eine weitere Möglichkeit bietet wie bereits geschildert die Hinterlüftung, da damit eine feuchtetechnische Abkopplung bestimmter Bereiche erreicht wird. Hier sind ausreichend große Belüftungsöffnungen zur Abfuhr aufgefuchteter Luft vorzusehen.

Außerdem muss eine zweckmäßige Luftdichtheit der Gebäudehülle gegeben sein, da im Winter sonst feuchtebeaufschlagte Innenluft in relativ kurzer Zeit durch Bauteilfugen nach außen in Querschnittsbereiche niedriger Temperaturen transportiert werden kann, wo sich dann Tauwasser bilden kann.

3.4.1. Feuchtetechnische Eigenschaften ausgewählter Baustoffe

Bitumen und thermoplastische Kunststoffe (z.B. Dampfbremsen) enthalten selbst keine Poren (nicht kapillaraktiv), können aber durch Lösungsdiffusion Wassermoleküle aufnehmen und weiterleiten. Aufgrund dieser Eigenschaften ist die Wasserweitergabe jedoch sehr begrenzt und die Wassergehalte sind im Allgemeinen sehr klein. [8]

Metalle und Gläser sind vollständig wasserundurchlässig. [8]

Zement-, kalk- und gipsgebundene Baustoffe besitzen hingegen ein ausgeprägtes, hydrophiles Porengefüge, weshalb sie durch die bereits geschilderten Mechanismen Feuchte aufnehmen, speichern und weiterverteilen. Durch geeignete Rezepturen ist jedoch eine Beeinflussung der Porenstruktur und damit die Herstellung nahezu wasserundurchlässige Baustoffe möglich. [8]

Holz

Da dem Holz aufgrund der vorliegenden Konstruktionsweise eine erhöhte Bedeutung zukommt, soll auf die Wirkung von Feuchte auf Holz besonders eingegangen werden.

Holz besitzt wegen seiner heterokapillaren Hohlraumstruktur eine große innere Oberfläche. Aufgrund seiner vielen polaren Gruppen an den polymeren Molekülen der Zellwandbestandteile können erhebliche Mengen Wasser aufgenommen und unterschiedlich fest gebunden werden. Wird Holz hinreichend lange einem bestimmten Klima ausgesetzt, stellt sich zwischen Holz und Klima ein hygroskopisches Gleichgewicht ein, dessen zugehörige Holzfeuchtigkeit als Gleichgewichtsfeuchte bezeichnet wird. [11]

Die Sorption kann in Abhängigkeit vom Wassergehalt nach [11] in drei Bereiche unterteilt werden:

- Chemisorption
 - o Wassergehalte 0...5%
 - o durch molekulare Anziehungskräfte werden Wassermoleküle in einer monomolekularen Schicht an innere Oberfläche des Holzes gebunden
- Adsorption
 - o Wassergehalte 6...20%
 - o durch Kohäsion lagern sich weitere Wassermoleküle an
- Kapillarkondensation
 - o Wassergehalte 21...30%
 - o durch Kapillarkräfte lagern sich so lange weitere Wassermoleküle an bis Hohlraumsystem der Zellwände mit Wasserdampf gefüllt ist

Sobald das gesamte Hohlraumsystem mit Wasserdampf gefüllt ist, spricht man als obere Grenze der Wasserdampfdiffusion von der Fasersättigung mit zugehörigem Fasersättigungsgehalt u_{FS} , welcher bei einheimischen Holzarten zwischen 22 und 35% beträgt. [11]

Für die im vorliegenden Objekt verbaute Fichte wird der Fasersättigungsbereich in der Regel mit rund 30M-% Holzfeuchte angesetzt [http://www.holzfragen.de/seiten/schwinden_quellen.html, 03.05.2012].

Folgt hierüber hinaus eine weitere Wasseraufnahme, die Ablagerung in Zellhohlräumen als frei tropfbares Wasser statt. [11]

Durch die Einlagerung von Wasser in den Zellwandhohlräumen kommt es aufgrund der Holzstruktur zum Quellen (Volumenzunahme), da Holzfasern (Fibrillen) und Micellen (nebeneinander liegende Kettenmoleküle als Bestandteil der Fibrillen) auseinandergedrückt werden. [11]

Die Quellung ist mit Erreichen des Fasersättigungsgehaltes weitgehend abgeschlossen und darüber hinausgehende Wasseranteile werden in Kapillaren eingelagert, wobei es jedoch zu keiner weiteren Volumen- sondern nur noch zu einer Gewichtszunahme kommt. Analog zum Quellen kommt es bei einer Wasserabgabe unterhalb des u_{FS} zu einer Volumenabnahme, dem Schwinden [11].

Hinsichtlich des Dampfdiffusionswiderstandes μ besteht eine starke Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte. Vollholz und auch Holzwerkstoffe verhalten sich hierbei feuchtevariabel, da sie in trockener Umgebung (niedrige relative Luftfeuchten) relativ dicht und in feuchter Umgebung offener sind. Hier werden in der Literatur Werte angegeben, die bis zum Faktor 5 betragen [12].

Aufgrund der Anisotropie des Holzes verläuft der Kapillartransport flüssigen Wassers in Faserrichtung in größerem Umfang als quer zur Faser (Faktor 10 bis 20 [12]). Dies ist insofern anschaulich als dass der in der Natur gewachsene Baum das Wasser über viele Meter von den Wurzeln bis in den Wipfel transportieren muss. In Bauwerken erfolgt die Beaufschlagung mit Feuchte im Regelfall, so auch beim vorliegenden Objekt, aufgrund der Konstruktionsweise hauptsächlich quer zur Faser.

Im Gegensatz zu vielen Massivbaustoffen ist die Weiterverteilung von Feuchte in Hölzern nur eingeschränkt, was auf die Veränderung der Porenstruktur bei Feuchtebeaufschlagung (Quellen und Schwinden) zurückzuführen ist und zu Schwankungen des Flüssigtransportkoeffizienten führt [6]. So sind die im trockenen Baustoff vorhandenen, engen Kapillaren nicht in der Lage, die großen Kapillaren der feuchten, gequollenen Bereiche leer zu saugen und damit das Wasser weiterzuverteilen. Beim Trocknungsvorgang verengen sich hingegen die Poren und es kommt zu einem schnellen Austreiben

der Feuchte. Diese für Vollholz betrachteten Wirkungsweisen können in ähnlicher Weise auch bei Holzwerkstoffen beobachtet werden [12].

4. Objektbeschreibung

Die hier ausgeführten Erläuterungen dienen nur dem groben Überblick. Detaillierte Informationen und umfangreiches Bildmaterial sind den im Anhang befindlichen Raumbüchern und dem Fassadenbuch zu entnehmen.

4.1. Einführung

Das untersuchte Objekt befindet sich etwa 5km südöstlich von Appenzell in der Leugangenstraße 2 im schweizerischen Schwende, Kanton Appenzell Innerrhoden.



Abbildung 4-1: Lage des Objekts, <http://maps.google.de>, 06.09.2012

Bei dem Wohngebäude handelt es sich um einen viergeschossigen Appenzeller Strickbau von etwa 1630 mit zusätzlichem, südlichem Anbau ohne Datierung. Um 1873 erfolgten wohl größere Renovierungsarbeiten (s. Abbildung 4-2).

Zum Ende des 20. Jahrhunderts erfolgte in einigen Räumen die Anbringung von Holzverkleidungen an den Wänden sowie der Einbau eines Bades mit WC im Erdgeschoss.

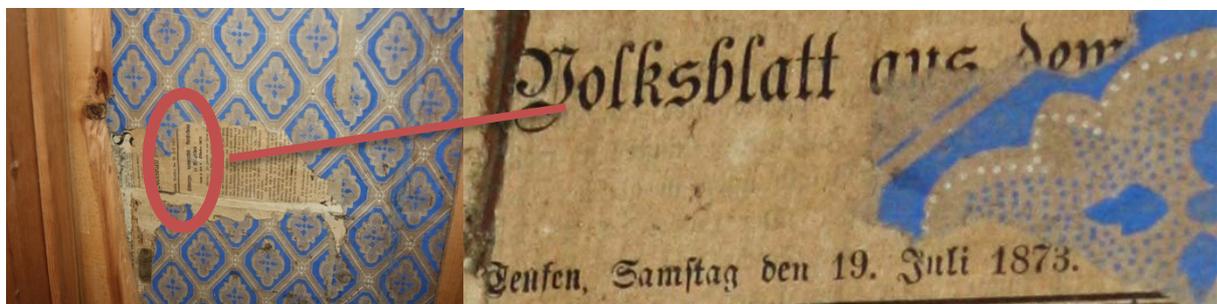
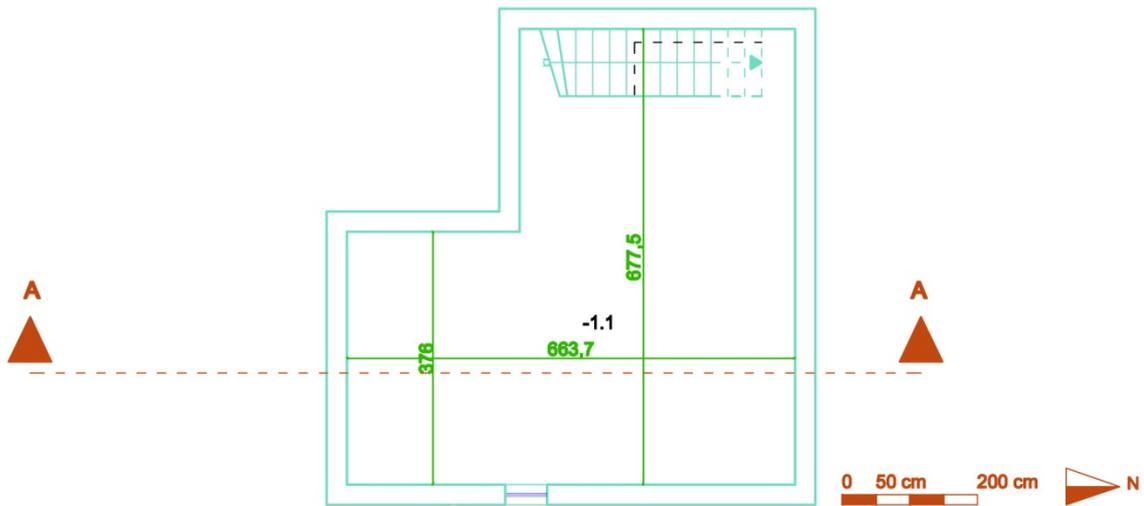


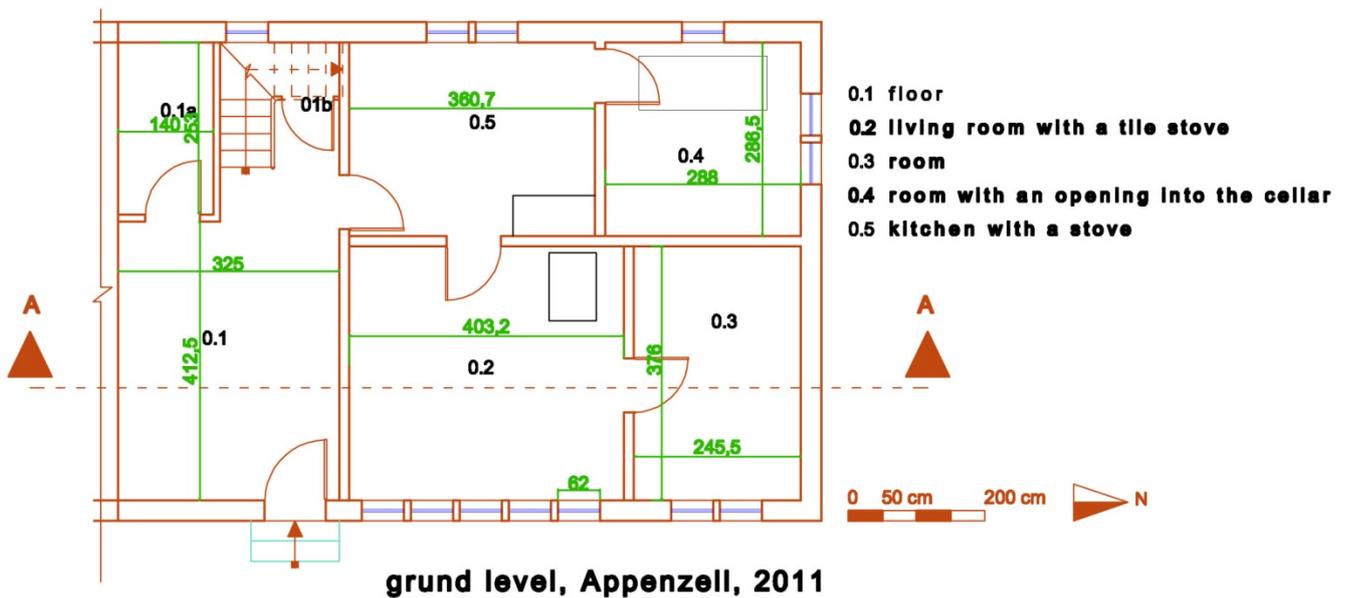
Abbildung 4-2: Zeitung von 1873 unter Tapete

Das Gebäude ist teilunterkellert, besitzt zwei Vollgeschosse sowie ein Dachgeschoss. Erdgeschoss und Obergeschoss haben jeweils etwa 45m² Wohnfläche (s. Abbildung 4-3 bis Abbildung 4-7).



Lower Level, Appenzell, 2011

Abbildung 4-3: Kellergeschoss



grund level, Appenzell, 2011

Abbildung 4-4: Erdgeschoss

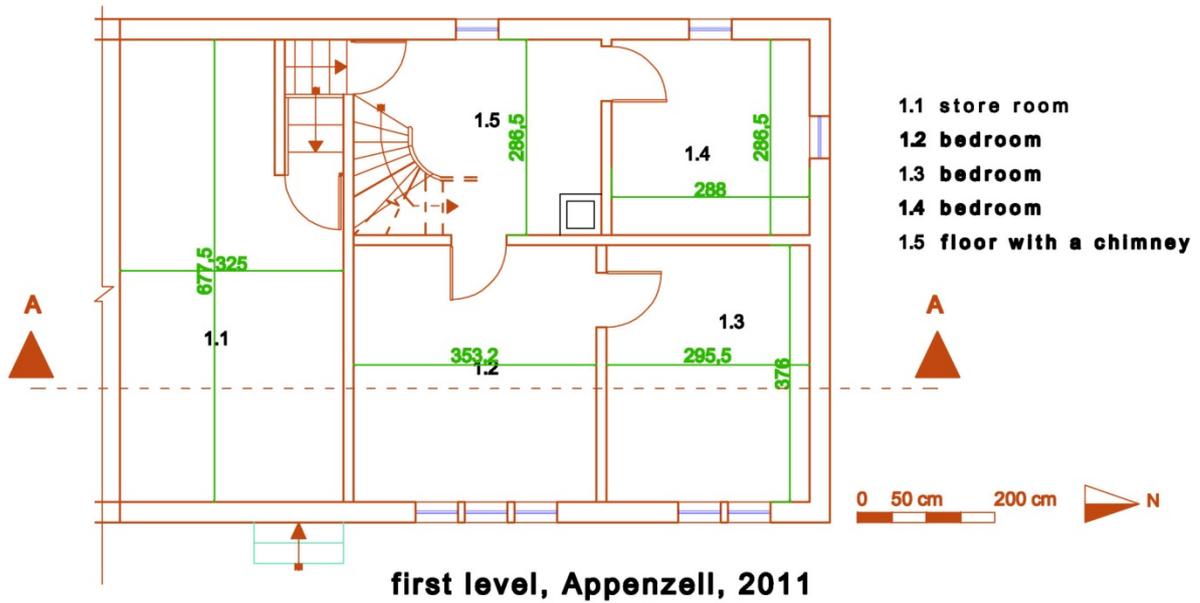


Abbildung 4-5: Obergeschoss

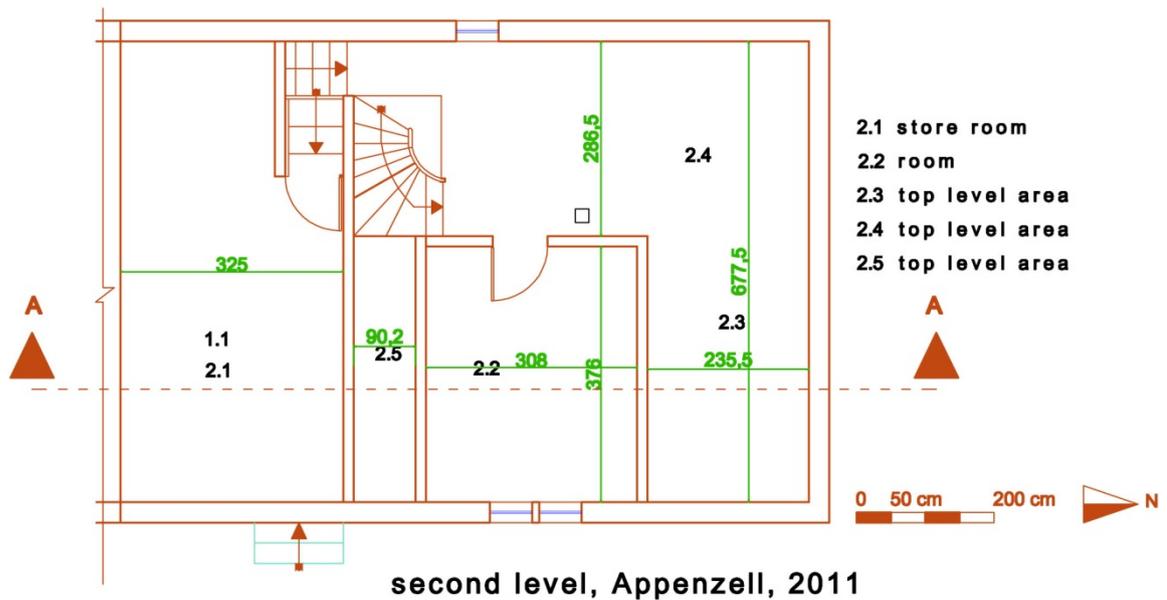
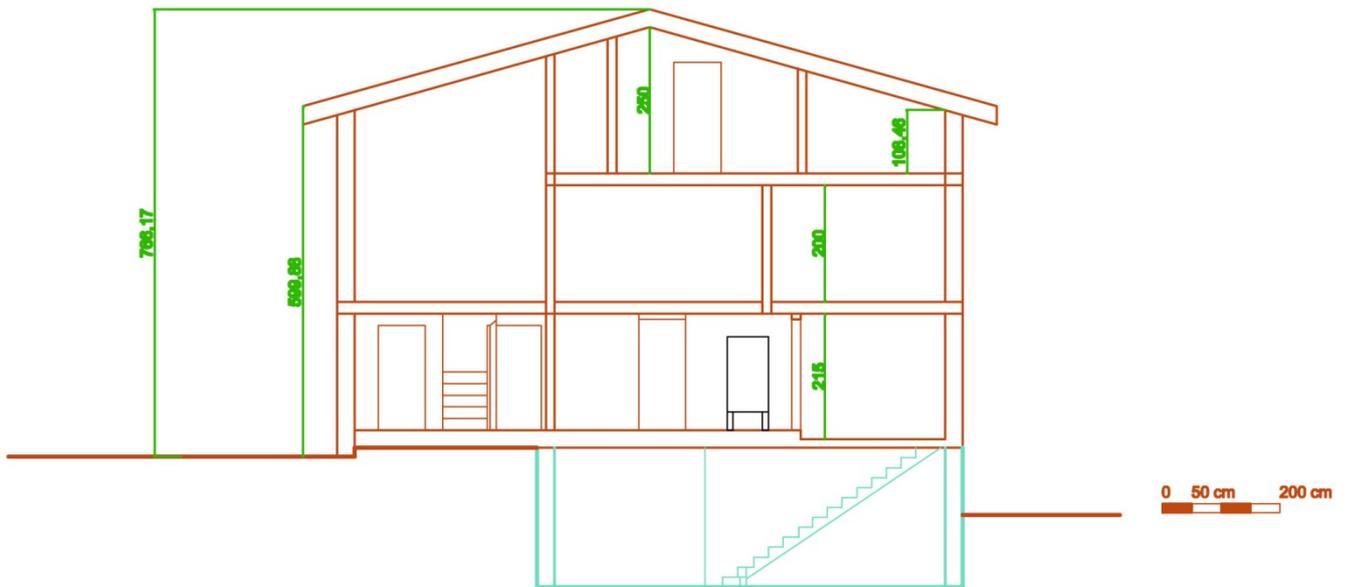


Abbildung 4-6: Dachgeschoss



Section A-A, Appenzell, 2011

Abbildung 4-7: Schnitt von Osten

Die Fassadenverkleidung erfolgte im Norden und Westen mit Holzschindeln, während die östliche Fassade mit für das Appenzeller Land typischen gestemmtten Täfern aus Holz verkleidet ist. Als Anstrich ist zur Vermeidung biologischer Schäden „Appenzeller Bleiweiß“ vorzufinden.



Abbildung 4-8: Ostfassade



Abbildung 4-9: Westfassade

4.2. Fundamente

Bis auf einen Teil des ehemals als Küche genutzten Raumes und des südlichen Anbaus ist das Gebäude unterkellert. Die Wände des Oberbaus ruhen hierbei auf Bruchsteinmauerwerk.

In den nicht unterkellerten Bereichen folgt unterhalb des Fußbodens lediglich Erdreich.

4.3. Wandaufbauten

Die Außenwände bestehen aus 15cm dicken Holzbalken zuzüglich der jeweils vorhandenen Außen- und Innenbekleidung, welche nach Gebäudeseite bzw. Raum variiert.

Für die Innenwände wurden 13cm starke Holzbalken verwendet.

4.4. Decken

Bei sämtlichen Decken handelt es sich um Bohllendecken, welche lediglich aus Holzbohlen der Stärke 65mm bestehen, wobei die Decken des Obergeschosses 40mm stark sind. Die Holzbohlen untereinander sind durch eine Nut-Feder-Konstruktion verbunden. Die Verbindung der Bohlen mit den Außenwänden erfolgte ebenfalls über eine Nut in letzteren (s. Abbildung 4-10).

In einzelnen Räumen sind Holzdielen als Bodenbelag auf den Decken verlegt.

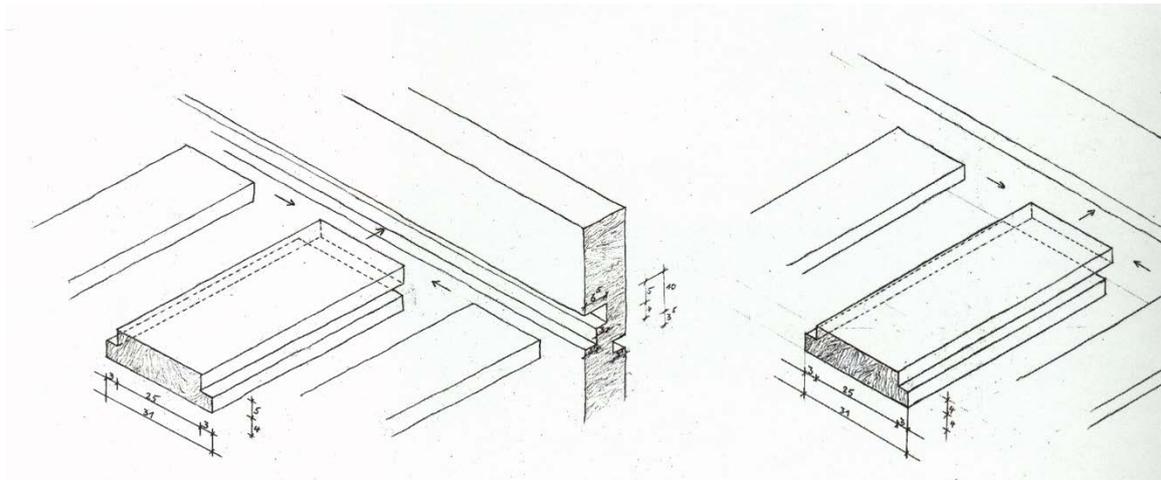


Abbildung 4-10: Decken-Boden-Bohlen mit doppelter (links) und einfacher (rechts) Nut; aus [4]

4.5. Fenster und Eingangstüren

Als Fenster sind lediglich einfach verglaste Holzrahmenfenster vorhanden. In den als Aufenthaltsräume genutzten Zimmern sind sogenannten Winterfenster vorhanden oder ist zumindest deren Anbringung vorgesehen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um einfach verglaste Holzrahmenfenster, welche mittels je zwei einfacher Drehriegel pro Seite außenseitig befestigt werden können, so dass die Konstruktion, abgesehen von mangelhafter Luftdichtheit, in etwa einem Kastenfenster entspricht.

Als Fensterläden dienen hölzerne Zugläden, welche mit an ihnen befestigten Lederriemen im oberen Brüstungsbereich eingehängt werden können. Unterhalb des Fensterraumes befinden sich in den Außenwänden Schlitze, die eine Versenkung der Fensterläden ermöglichen. Sonnenschutzeinrichtungen sind nicht vorhanden.

Die Hauseingangstür sowie alle weiteren Türen bestehen aus Holz und sind unverglast. Zwischen den im Rahmen des Versuchsvorhabens beheizten und unbeheizten Räumen beträgt die Stärke der Türen 35mm.

4.6. Dachgeschoss

Als Dachkonstruktion ist ein Pfettendach vorzufinden, welches mit Holzschindeln eingedeckt wurde. Der Dachraum ist nicht ausgebaut, es befindet sich dort jedoch eine nachträglich hinzugefügte Firstkammer, deren Wände aus Holzbohlen bestehen.

4.7. Keller

Der über eine Holzluke zugängliche Kellerraum wird durch das bereits erwähnte Bruchsteinmauerwerk begrenzt. Der Fußboden besteht aus anstehendem Erdreich.

5. Sanierungsmaßnahmen

Die in den einzelnen Räumen durchgeführten Maßnahmen finden sich im Raumbuch (Anhang). Hier wird nur auf die generellen Maßnahmen eingegangen.

5.1. Wände

An sämtlichen Außenwänden sowie Wänden zu unbeheizten Räumen wurden raumseitig hölzerne Vorsatzschalen im Abstand von 40mm von der Wand angebracht. Hinter diese Vorsatzschalen und in die Gefachkonstruktion wurden elastische Holzfaserdämmplatten der Marke STEICOflex geklemmt. Die Gesamtstärke der Dämmung beträgt im Endzustand im Gefachebereich 100mm. Auf die Vorsatzschalen sowie überlappend in den Anschlussbereichen wurde eine Dampfbremse der Marke isover VARIO KM montiert (s. Abbildung 5-1). Foliendrühte wurden hierbei überlappend luftdicht verklebt

Zum Ausgleich von Unebenheiten und der Vermeidung von Fehlstellen in der luftdichten Ebene wurde dort, wo die Rahmenkonstruktion der Vorsatzschale planmäßig am Bestand anliegt, Kompriband eingebaut (s. Abbildung 5-2).

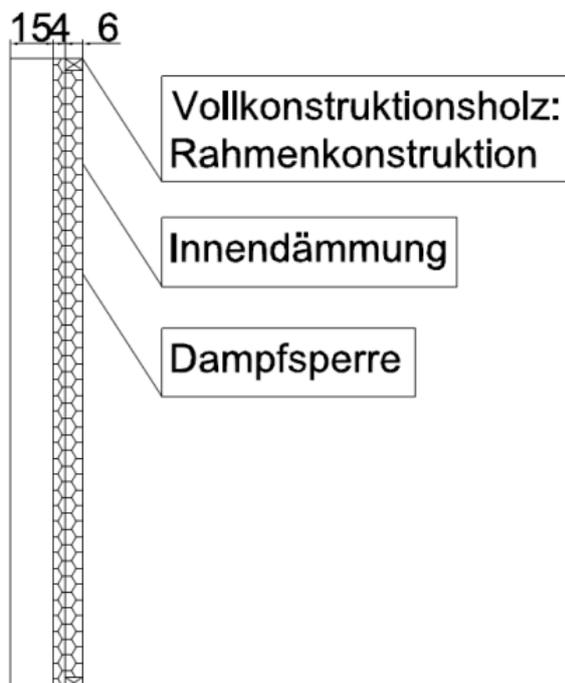


Abbildung 5-1: Skizze Vorsatzschale (links) und Einbau der Vorsatzschale, Holzfaserdämmung und überlappender Dampfbremse (rechts)



Abbildung 5-2: Kompriband unterhalb Dampfbremse und Rahmenkonstruktion



Abbildung 5-3: Endzustand Innendämmung

Lediglich an der Südwand zu Raum 0.2 wurde aus Denkmalschutzgründen anstatt der Innendämmung eine Außendämmung mit analogem Aufbau realisiert (s. Abbildung 5-4). Die Dampfbremse ist zweckmäßigerweise auf der „warmen“ Seite der Dämmung angeordnet und daher auf der Abbildung nicht sichtbar.



Abbildung 5-4: von außen gedämmte Südwand des Raumes 0.2

5.2. Dachboden

Der Fußboden des Dachgeschosses wurde oberhalb der sanierten Räume mit einer Dampfbremse ausgelegt. Auf dieser wurden die 100mm starken Holzfaserdämmplatten verlegt (s. Abbildung 5-5).



Abbildung 5-5: Dämmkonstruktion Dachgeschoss im Bauzustand



Abbildung 5-6: Endzustand Dämmung Dachboden

5.3. Kellerdecke

An der Kellerdecke wurde eine hölzerne Rahmenkonstruktion angebracht an welcher eine Traglattung befestigt wurde, die zur Aufnahme der Holzfaserdämmplatten dient. Auch hier wurde die Dampfbremse direkt an der Decke auf der „warmen“ Seite der Dämmung angebracht (s. Abbildung 5-7).



Abbildung 5-7: Endzustand Kellerdecke

5.4. Fenster

Während im Obergeschoss die Vorsatzschale wie an den übrigen Wänden montiert wurde und die Fenster damit lediglich durch die Dampfbremsfolie verdeckt sind, wurde im Erdgeschoss raumseitig vor den Fenstern eine Rahmenkonstruktion verbaut, in welche Plexiglas-Scheiben eingelassen wurden. Auch hier wurde Kompriband zum Ausgleich von Unebenheiten sowie für die Fugen zwischen Plexiglasscheiben und Rahmen verwendet (s. Abbildung 5-8).



Abbildung 5-8: Details Fensterkonstruktion (oben: Vorbereitung Bestand, unten: Endzustand)

6. Thermographie

Zur Schwachstellenanalyse direkt am Objekt wurde unter anderem eine Infrarot-Thermographie (IR-Thermographie) durchgeführt. Mit ihrer Hilfe können Wärmebrücken, Luftundichtigkeiten, Durchfeuchtungen, verdeckte Konstruktionselemente und mehr aufgedeckt werden.

6.1. Grundlagen

Die Infrarot-Thermographie zur Untersuchung von Gebäudehüllen auf Wärmebrücken ist in DIN EN 13187 geregelt. Hinsichtlich der Randbedingungen wird dort nur eine „ausreichend große“ Temperaturdifferenz zwischen Außen und Innen gefordert. Verschiedenen Literaturangaben (z.B. [13]) geben die notwendige Temperaturdifferenz jedoch mit mindestens 15K an. Des Weiteren ist der Einfluss von Sonnenstrahlung vor oder während der Messung durch geeignete Wahl des Messzeitpunktes auszuschließen. Sollen Außenaufnahmen durchgeführt werden, ist darauf zu achten, dass diese bei Regen, Schnee und dichtem Nebel nicht möglich sind. Bei Windgeschwindigkeiten ab etwa 2 m/s wird der Wärmeübergangswiderstand stark beeinflusst, so dass Thermogramme nicht zielführend sind.

Um verfälschende Effekte durch Aufheiz- oder Abkühlungsvorgänge zu minimieren, sollte die Raumtemperatur möglichst gleichmäßig sein und durch entsprechende Klimatisierung ein quasistationärer Wärmestrom herrschen, was je nach Bauart (leicht, schwer) mehrere Tage des Aufheizens erfordern kann. [13]

Aussagen über die thermische Qualität von Fenstern und deren Anschlüssen sind anhand der IR-Thermographie nur begrenzt möglich, da glatte Glasoberflächen für Infrarotstrahlung undurchlässig sind. [13], [14]

6.2. Durchführung

Aufgrund eines Brandes während der Infrarotthermographie von außen am 04.02.2011, existiert nur eine Aufnahme der Gebäudehülle von Osten zum Zustand vor der Sanierung. Innenaufnahmen dieses Zustandes wurden nicht durchgeführt.



Abbildung 6-1: Fotografie und Thermographie Ostfassade

Nach der Sanierung im November 2011 wurden am 13. und 14.2.2012 Innenaufnahmen durchgeführt. Da zu dieser Zeit starker Schneefall und Wind vorherrschten, waren Außenaufnahmen nicht zuverlässig möglich. Zum Einsatz kam die Thermographie-Kamera des Institutes für Massivbau der TU

Darmstadt, bei der es sich um eine NEC TH5104 handelt. Die Bearbeitung der Thermographie-Aufnahmen erfolgte mit dem mitgelieferten Programm „Viewer Program Ver. 1.0B“ des Herstellers.

Nachteilig bei dieser Konstellation ist, dass im Nachgang keine Temperaturbestimmung bestimmter Punkte erfolgen kann, d.h. die Oberflächentemperaturen können nur anhand der Temperaturfarbskala grob ermittelt werden. Bei der Software erwies sich außerdem als nachteilig, dass die gewählte Skalierung beim Speichern als Bild-Datei (*.bmp) teilweise nicht übernommen sondern selbständig nachskaliert wurde.

Das Hauptaugenmerk der Thermographie lag in erster Linie auf punkt- und linienförmigen Wärmebrücken und üblichen Leckagen. Darüber hinaus wurden sämtliche weiteren Auffälligkeiten festgehalten. Die Mehrzahl der Aufnahmen behandelt die beheizten Räume, jedoch wurden auch Konstruktionen außerhalb dieser betrachtet, wenn sie in diesen in der Form nicht anzutreffen waren. Einen Überblick der dokumentierten Stellen unter Angabe der jeweiligen Bildnummer bieten die nachfolgenden Pläne.

Außerdem sind die wichtigsten Ergebnisse im Folgenden dargestellt. Eine Übersicht aller durchgeführten Aufnahmen einschließlich der Aufnahmen selbst befindet sich auf beigefügter CD-ROM. Zu beachten ist, dass alle dargestellten Thermogramme prinzipiell nur für den in der Thermographie-Kamera eingestellten schwarzen Strahler ($\epsilon=1,0$ unabhängig von der Wellenlänge) gelten. Für den vorliegenden Zweck der Schwachstellenanalyse wird dies jedoch als ausreichend angesehen, wenngleich beachtet werden sollte, dass die Wandoberflächen andere Emissionsgrade als etwa die Plexiglas-Vorsatzscheiben der Fenster besitzen und somit ein direkter Vergleich anhand der dargestellten Oberflächentemperaturen im selben Thermogramm unzweckmäßig ist.

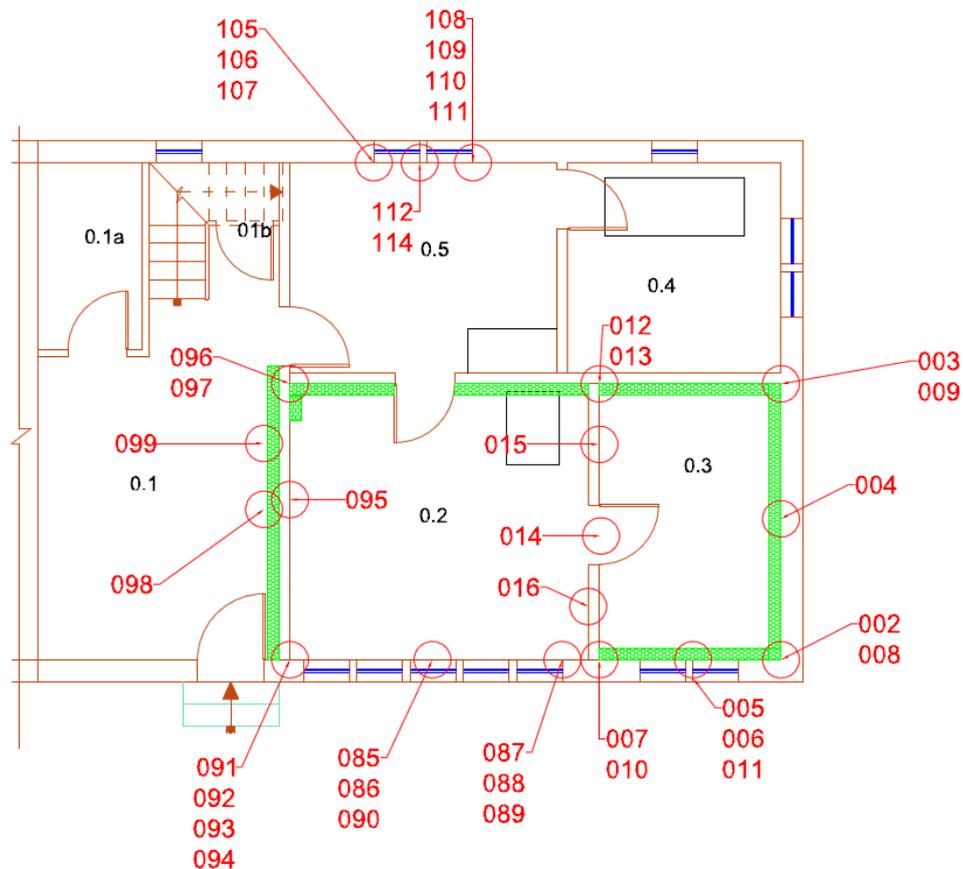


Abbildung 6-2: Übersicht IR-Aufnahmen im EG

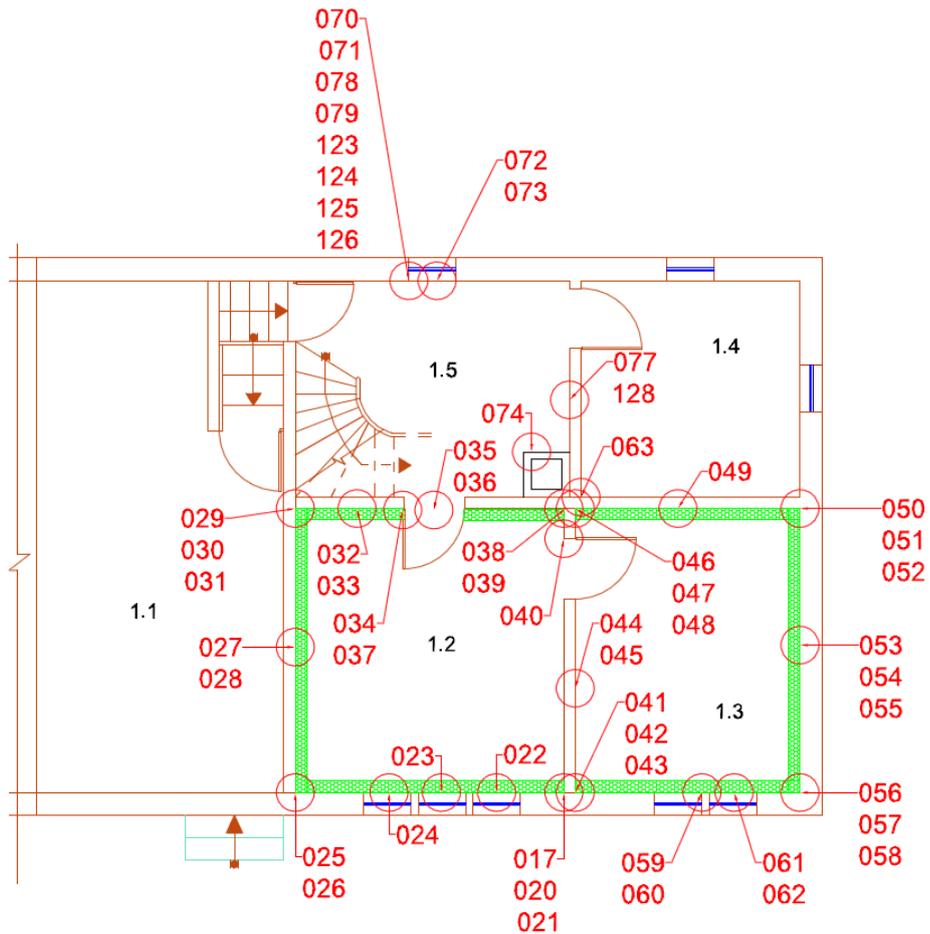


Abbildung 6-3: Übersicht IR-Aufnahmen im 1. OG

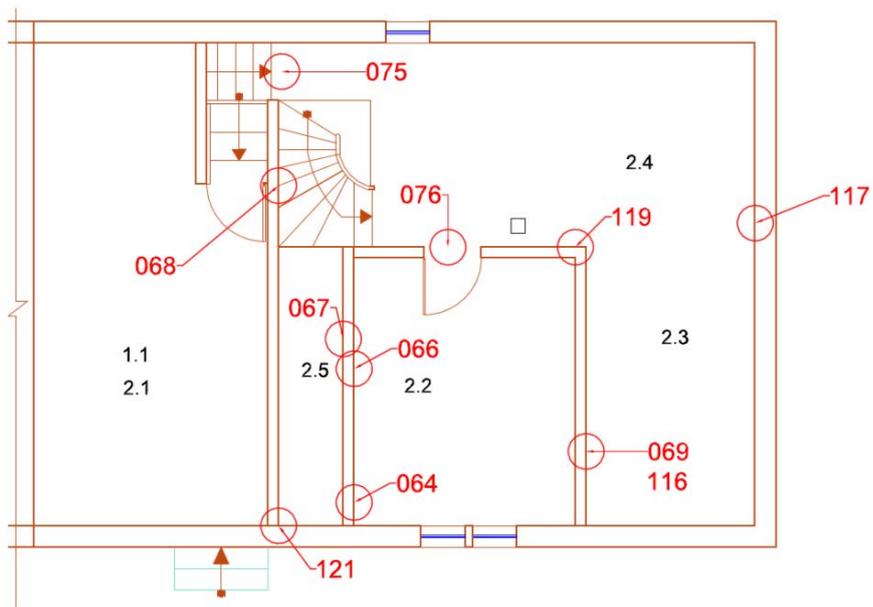


Abbildung 6-4: Übersicht IR-Aufnahmen im DG

6.3. Ergebnisse

Exemplarisch werden hier die bedeutendsten Auffälligkeiten dargestellt.

6.3.1. Keller

Bei der Thermographie der Kellerdecke sind deutlich die Temperaturunterschiede zwischen der Wärmedämmung und ihrer hölzernen Tragkonstruktion, welche direkt an der Kellerdecke befestigt wurden, erkennbar.

6.3.2. Erdgeschoss

Die niedrigsten Oberflächentemperaturen herrschen in den punktförmigen Wärmebrücken in den Anschlusspunkten Wand-Fußboden. Die niedrigste Oberflächentemperatur wurde hierbei bei IR-Aufnahme Nr. 002 in der nordöstlichen, unteren Außenecke des Raums 0.3 gemessen (etwa 9,0°C), wo zwei Außenwände auf den Fußboden treffen (Abbildung 6-5). Im angrenzenden Gebiet steigen die Temperaturen jedoch schnell an, so dass in der nordwestlichen, unteren Zimmerecke die am stärksten ausgeprägte Wärmebrücke zu finden ist (Abbildung 6-6). Dies ist darauf zurückzuführen, dass im westlich angrenzenden, unklimateisierten Raum 0.4 nahezu Außentemperaturen herrschen, die Innenwände 2cm dünner sind als die Außenwände und die Verlängerung der Außenwand in Ost-West-Richtung wärmeabführend wirkt.

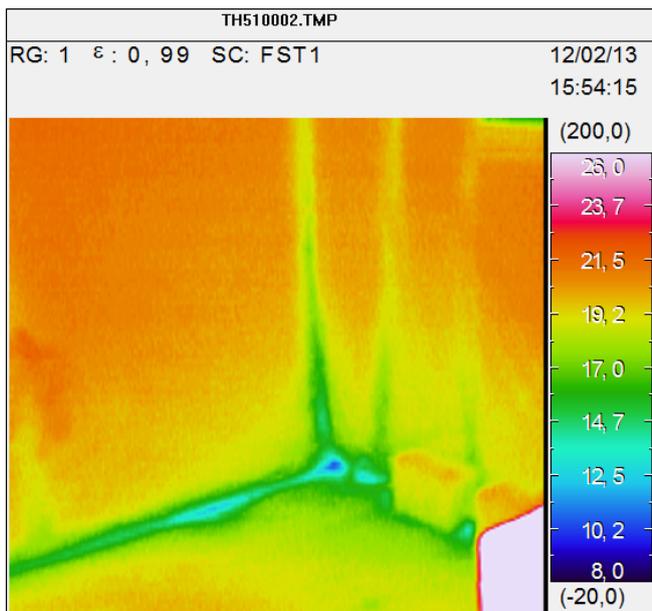


Abbildung 6-5: Außenecke Nordost, IR-Aufnahme 002

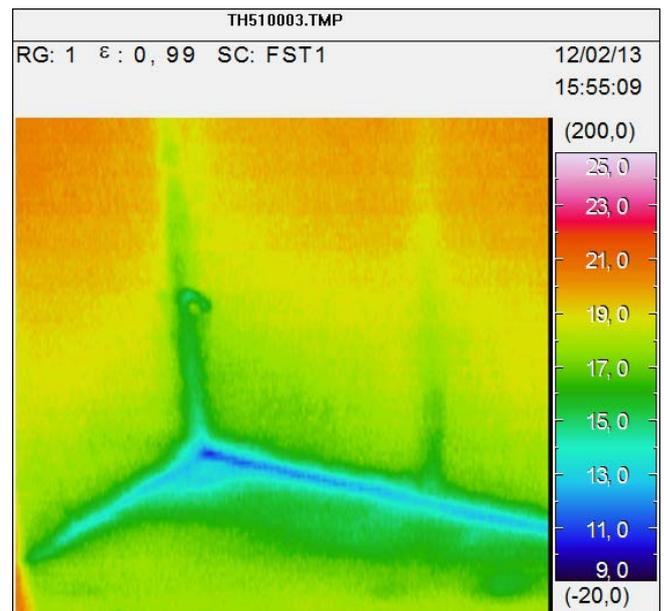


Abbildung 6-6: Zimmerecke Nordwest, IR-Aufnahme 003

Oberflächentemperaturen in ähnlicher Größenordnung herrschen auch am Wandfuß der südlichen Zimmerwand desselben Raumes östlich der Zimmertüre (Abbildung 6-7). Vermutlich befindet sich hier eine Leckage im Anschluss Wand-Fußboden oder ein ungedämmter Bereich an der Kellerdecke.

Weiterhin auffällig ist der Bereich der Türschwelle. Hier herrschen Oberflächentemperaturen von etwa 12,5°C. Auch dies ist auf Leckagen im Anschlussbereich zurückzuführen.

Der Einfluss vorhandener Möblierung bzw. fester Einbauten wird auf Abbildung 6-9 erkennbar. Im Bereich der Stützkonstruktion der Eckbank ist der Wärmeübergang deutlich erschwert, weshalb hier

niedrigere Oberflächentemperaturen herrschen als im ungestörten Bereich. Durch das in der Abbildung rechts befindliche Sofa wird eine Erhöhung der Oberflächentemperaturen zusätzlich behindert.

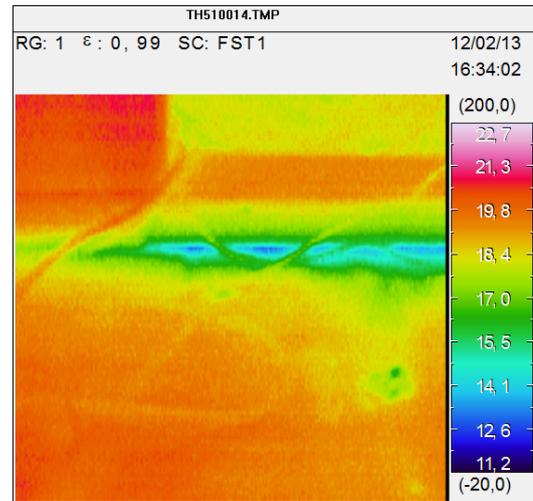
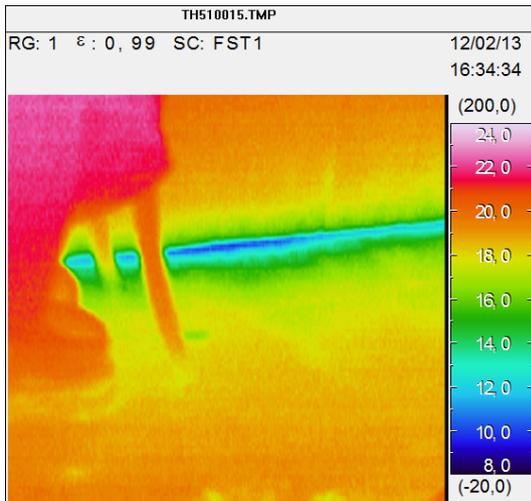


Abbildung 6-7: Wandfuß Südwand, IR-Aufnahme 015 Abbildung 6-8: Türschwelle, IR-Aufnahme 014

In der ehemaligen Küche (unbeheizter Raum 0.5) wurden vor allen Dingen die einbindenden Holzbalcken untersucht. Erwartungsgemäß befinden sich auch hier die niedrigsten Oberflächentemperaturen dort, wo drei Ebenen (Außenwand-Decke-Balken) aufeinandertreffen und eine punktförmige Wärmebrücke bilden (Abbildung 6-9). Etwas verfälscht wird das Ergebnis allerdings dadurch, dass am Tag der Aufnahmen kurzfristig Heizkörper in Raummitte unterhalb der Balken aufgebaut und angeschaltet wurden. Die Balkenunterseiten weisen hierdurch vergleichsweise hohe Temperaturen auf, während sich andere Bereiche noch nicht erwärmen konnten (beispielsweise Bereich Anschluss Decke-Außenwand).

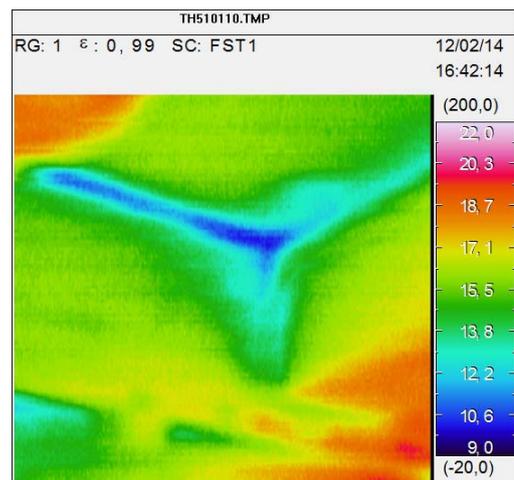
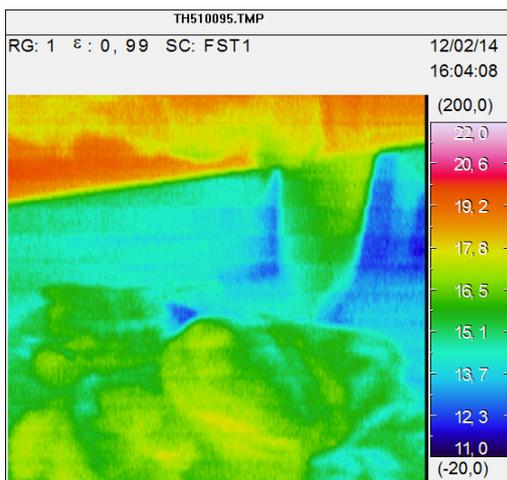


Abbildung 6-9: niedrigere Oberflächentemperaturen rechts, IR-Aufnahme 095 Abbildung 6-10: einbindender Balken (rechts im Bild), IR-Aufnahme 110

6.3.3. Obergeschoss

Auch hier sind die niedrigsten Oberflächentemperaturen in den punktförmigen Wärmebrücken anzutreffen.

Die niedrigste Oberflächentemperatur wurde hierbei in der unteren, nordwestlichen Zimmerecke des Raumes 1.3 gemessen (ca. 9,0°C) (Abbildung 6-11). Ein ähnliches Temperaturniveau wird im Bereich der Wärmebrücke im oberen, südwestlichen Eckbereich des gleichen Raumes erreicht (Abbildung 6-12). Grund hierfür ist vermutlich die Geometrie der Firstkammer im Geschoss oberhalb, welche die Verlegung der Wärmedämmung eingeschränkt hat (s.a. Ausführungen zum Dachgeschoss).

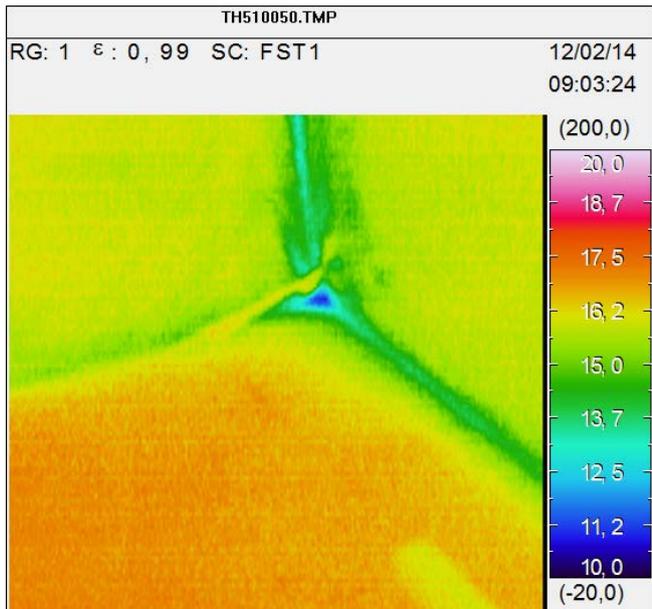


Abbildung 6-11: Zimmerecke Nordwesten, IR-Aufnahme 050

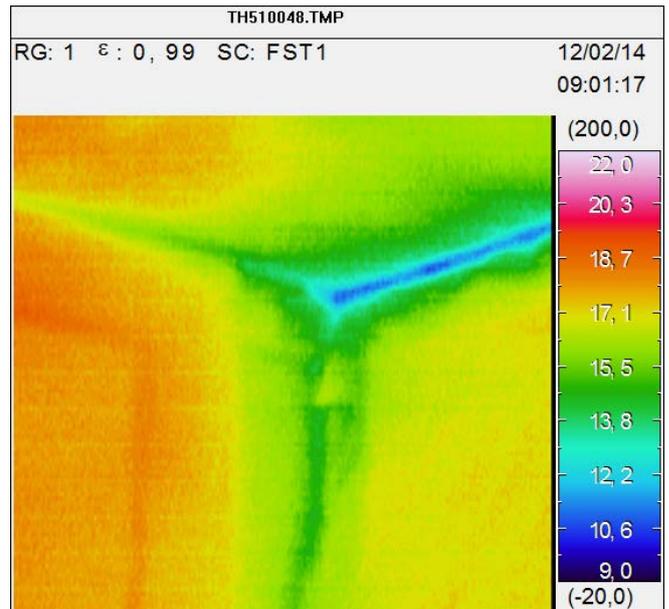


Abbildung 6-12: Zimmerecke Südwesten, IR-Aufnahme 048

Wie schon im Erdgeschoss sind auch hier Luftundichtigkeiten im Anschlussbereich der Schwelle zwischen den Räumen 1.2 und 1.3 erkennbar. Aufgrund der aufsteigenden Wärme aus dem Erdgeschoss sind die Temperaturen jedoch in diesem Fall im Vergleich zur Umgebung erhöht (Abbildung 6-13).

Die Wärmebrückenwirkung der hölzernen Rahmenkonstruktion in der Dämmebene kann Abbildung 6-14 entnommen werden. Die Oberflächentemperatur der verwendeten Kanthölzer ist durchweg niedriger als im Bereich der Holzfaserdämmung. Treffen wie in der Abbildung sichtbar mehrere Kanthölzer aufeinander, verstärkt sich die Wirkung dementsprechend.

Erwähnenswert sind des Weiteren die sehr niedrigen Temperaturen im Bereich der Tür zwischen den Räumen 1.2 und 1.4. Während die Temperaturdifferenz zwischen unterem Bereich der Tür und umgebender Innenwand etwa 5K beträgt, sind es alleine zwischen Türblatt und Übergangsbereich zur Türzarge knapp 10K. Hier befinden sich deutliche Leckagen, durch die Wärme an den (unbeheizten) Raum 1.4 übergeht (Abbildung 6-15).

Darüber hinaus wirkt auch die Türzarge selbst als Wärmebrücke, wie Abbildung 6-16 entnommen werden kann.

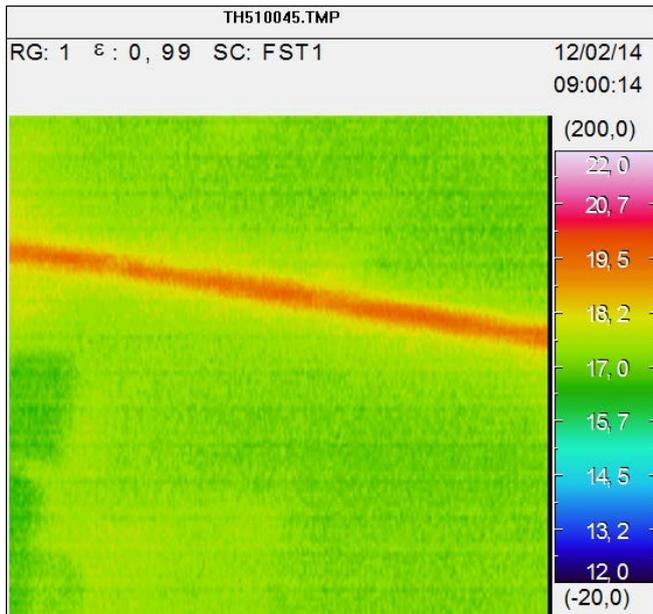


Abbildung 6-13: erhöhte Temperaturen an der Türschwelle zwischen Raum 1.2 und 1.3, IR-Aufnahme 045

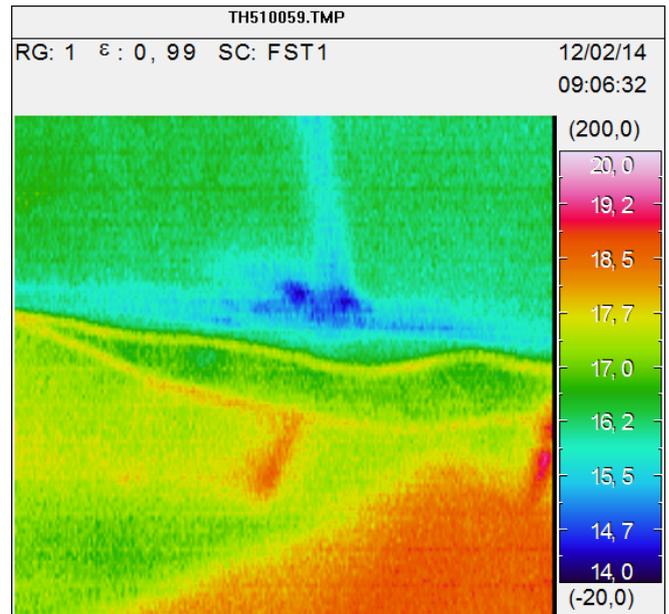


Abbildung 6-14: konstruktive Wärmebrücke durch Vorsatzschale, IR-Aufnahme 059



Abbildung 6-15: Türanschlussbereich unten, IR-Aufnahme 034

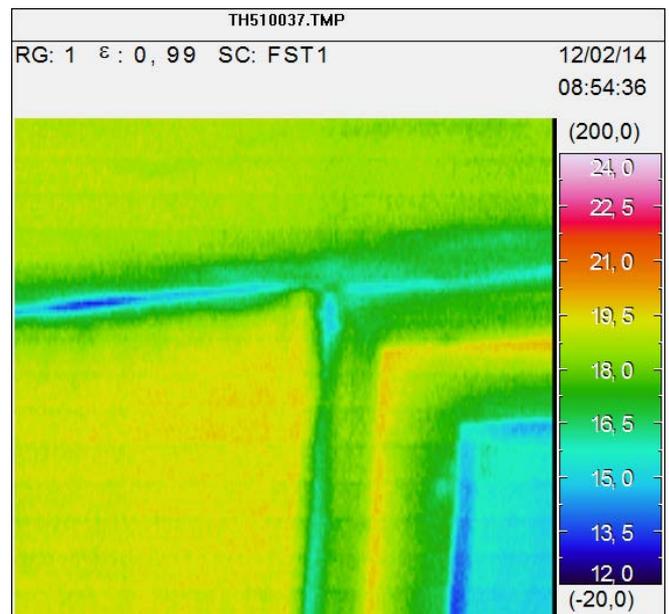


Abbildung 6-16: Türanschlussbereich oben, IR-Aufnahme 037

Aufgrund des Brandes vom Februar 2011 musste ein Teil der Strickkonstruktion sowie der Decke über dem Erdgeschoss entfernt werden. Um diese Bereiche zu verschließen, wurden Gipskartonplatten eingeschraubt oder mit Klebeband eingefügt (s. z.B. Abbildung 6-17). Diese Bereiche sind in der Thermographie deutlich sichtbar (beispielsweise Abbildung 6-18). Zum einen sind die Gipskartonplatten deutlich dünner als die Holzkonstruktionen, zum anderen ist ihre Wärmeleitfähigkeit λ höher.



Abbildung 6-17: Ausbesserung Brandschaden in Raum 0.5

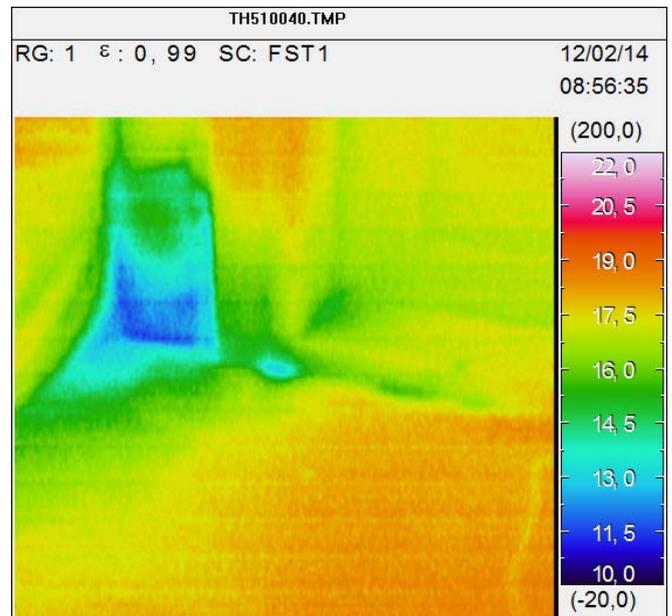


Abbildung 6-18: Ausbesserung in Nordwand Raum 1.2 neben Türzarge, IR-Aufnahme 040

6.3.4. Dachgeschoss

Im unbeheizten Dachgeschoss ist besonders der Bereich unmittelbar vor Raum 2.2 auffällig, da dort im ungedämmten Bereich besonders in den Fugen erhöhte Oberflächentemperaturen auftreten (Abbildung 6-19). Vermutlich ist Raum 2.2 hinsichtlich seiner Ost-West-Ausmaße etwas kleiner als der darunterliegende Raum 1.2, so dass dessen Decke ein kleines Stück ungedämmt ist und damit in diesem Bereich auch keine Dampfbremse vorhanden ist, welche die Luftdichtheit verbessern könnte. Weitere erhöhte Wärmeüberträge sind überall dort vorhanden, wo die aufgehenden Wände des Raumes 2.2 die Dämmebene der auf dem Boden verlegten Dämmung durchstoßen (Abbildung 6-20).

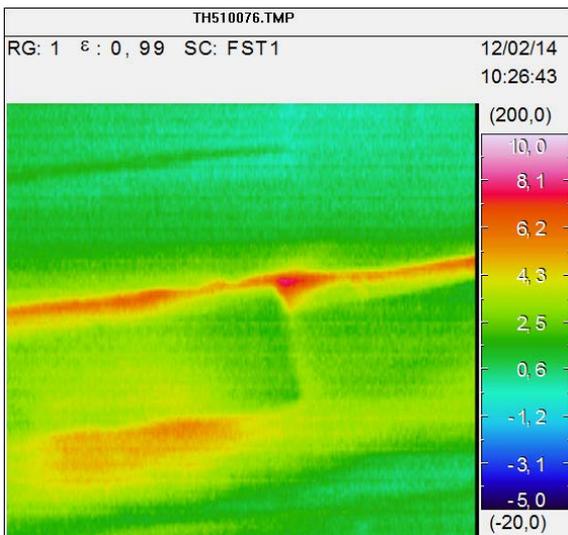


Abbildung 6-19: Bereich vor Tür zu Raum 2.2, IR-Aufnahme 076

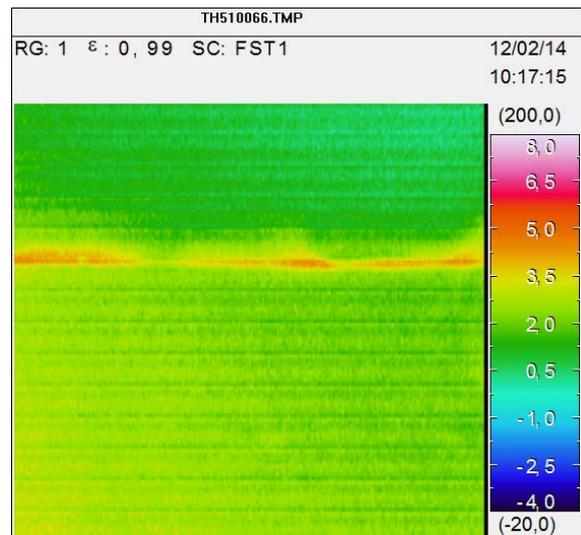


Abbildung 6-20: Durchstoßene Dämmebene Raum 2.2, IR-Aufnahme 066

Verstärkt wird dieser Effekt, wenn die Dämmung nicht ganz an die Wand geführt wurde, wie in Abbildung 6-21. Da an der Seite der Holzfaserdämmplatte an einer Stelle etwas Material fehlt, wurden dort deutlich höhere Oberflächentemperaturen als im umliegenden Bereich gemessen ($\Delta T \approx 4K$).



Abbildung 6-21: am Rand ausgefranste Dämmung

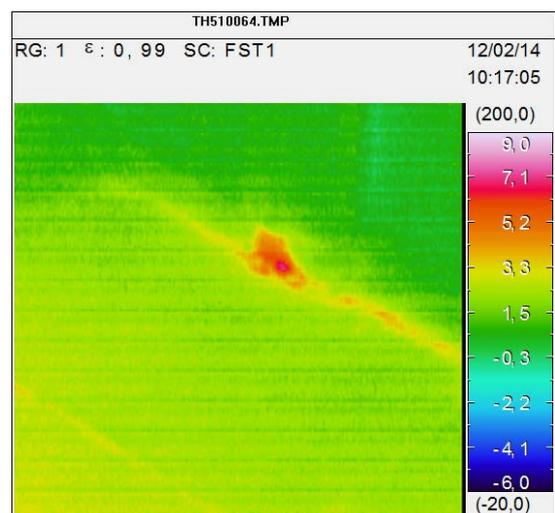


Abbildung 6-22: IR-Aufnahme 064 zu Abbildung 3-17

6.4. Beurteilung

Aufgrund der durchweg geringen Temperaturdifferenzen von Raumtemperatur zu den Bauteilen kann von einer erfolgreichen energetischen Sanierung gesprochen werden. Schließlich befinden sich die geringsten Oberflächentemperaturen nahezu ausschließlich in geometrischen Wärmebrücken wie Zimmerecken oder Übergängen Wände-Decken. Durch die ausgeführte Bauweise der Vorsatzschalen mit einer Holzrahmenkonstruktion überlagern sich geometrische Wärmebrücken teilweise mit konstruktiven, da die hölzernen Riegel durchweg und die Pfosten zumindest häufig in den Ecken bzw. Kanten platziert sind. Hier könnte theoretisch eine weitere Minimierung der Wärmebrückeneffekte beispielsweise durch keilförmig eingebaute Dämmkonstruktionen in diesen Bereichen erfolgen, was die lichten Raummaße jedoch an den Rändern zusätzlich verringern würde.

Deutliches Verbesserungspotential ist dagegen bei den Türkonstruktionen vorhanden. Hier wurden hohe Luftdurchlässigkeiten aufgezeigt. Neben komplett neuen Türkonstruktionen sind hier als erste Maßnahmen beispielsweise das Ankleben von Dichtbändern in den Fugenbereichen oder auch das Befestigen von Holzleisten an der Innenseite der Türzargen denkbar (Abbildung 6-23).

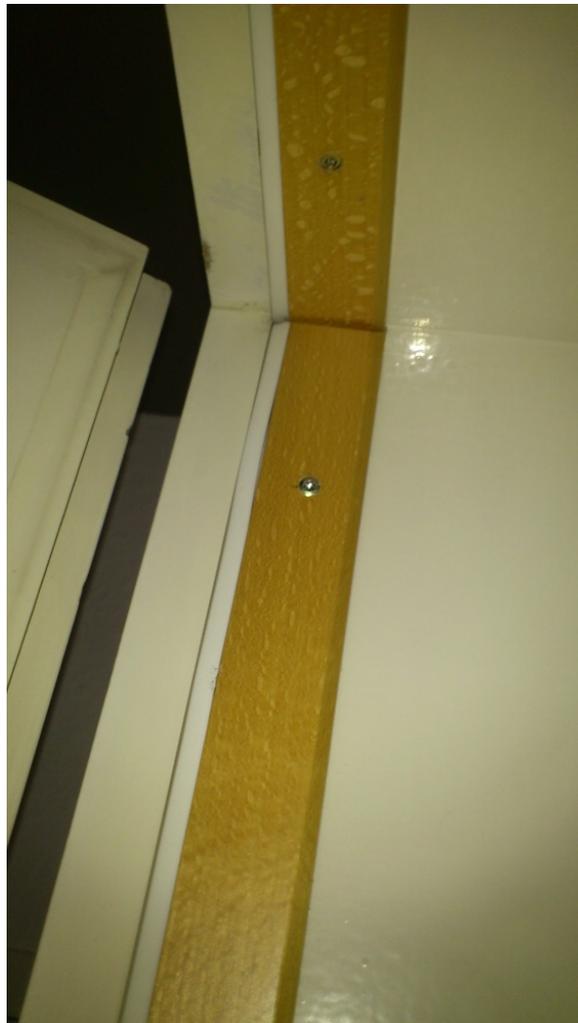


Abbildung 6-23: Holzleiste mit eingebautem Dichtungsprofil aus Gummi (sogenannte "Zargoleiste")

7. Luftdichtheit

7.1. Grundlagen

Neben ihren Auswirkungen auf die Behaglichkeit (Zugerscheinungen) spielt die luftdichte Ausführung von Gebäudehüllen eine besondere Rolle im Wärmeschutz, da Leckagen ungewünschte Energieverluste verursachen. Darüber hinaus können sie Feuchteschäden in Bauteilen durch konvektiven Wasserdampftransport verursachen.

Daher fordert die gängige Normung für neu zu errichtende Gebäude entsprechende Maßnahmen zur Herstellung einer leakagefreien Gebäudehülle. In der aktuell noch gültigen EnEV 2009 ist dies in §6 festgehalten, wonach „die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend den anerkannten Regeln der Technik abgedichtet“ sein muss, wobei u.a. aus hygienischen Gründen Mindestluftwechsel einzuhalten sind.

Maßgaben und Planungsempfehlungen zur Herstellung der Luftdichtheitsebene finden sich beispielsweise in DIN 4108-7. Hinsichtlich der Luftdichtheitsmessungen sowie einzuhaltender Grenzwerte wird hierbei auf die jeweils aktuelle EnEV verwiesen.

Die EnEV 2009 sieht in Anlage 4 hierbei eine Luftdichtheitsmessung im Differenzdruckverfahren nach DIN EN 13829 vor. Die gemessene Luftwechselrate darf bei einer Druckdifferenz von 50Pa (n_{50}) folgende Grenzwerte nicht überschreiten:

- $3,0h^{-1}$ bei Gebäuden ohne raumluftechnische Anlagen (Fensterlüftung)
- $1,5h^{-1}$ bei Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen

Bei Passivhäusern ist eine Luftwechselrate von $n_{50} \leq 0,6h^{-1}$ zur Zertifizierung erforderlich.

Zu beachten ist, dass solche Grenzwerte nur Aussagen über die Luftdichtheit der Gebäudehülle im Ganzen treffen und trotz ihrer Einhaltung lokale Fehlstellen, welche ihrerseits beispielsweise zu Feuchteschäden infolge Konvektion führen, nicht ausgeschlossen werden können.

Für Bestandsgebäude macht die aktuelle EnEV sowie die vorhandene Normung keine Angaben zur Luftdichtheit. Eine Verbesserung der Luftdichtheit ist in Kombination mit weiteren Maßnahmen jedoch auch in solchen Fällen sinnvoll, da die Reduktion der Luftwechselrate wesentlich zur Reduzierung des Energiebedarfes beiträgt.

7.2. Luftdichtheitsmessungen

Die Messung der Luftdichtheit erfolgte im Differenzdruckverfahren nach DIN EN 13829 mittels sogenannten Blower-Door-Tests. Die Druckdifferenz zwischen innen und außen wurde hierbei innerhalb einer Messreihe in 5er-Schritten auf Werte von 25 bis 60Pa kalibriert. In der Regel wurde nur eine Messreihe (Über- oder Unterdruck) durchgeführt, teilweise jedoch auch beides.

Untersucht wurden die später sanierten Räume 0.2, 0.3, 1.2 sowie 1.3. Die Räume wurden sowohl einzeln als auch geschossweise zusammengefasst betrachtet, wobei die Luftfördereinrichtung in den Türöffnungen zwischen den Räumen 0.2 und 0.5 bzw. 1.2 und 1.5 sowie zwischen 0.2 und 0.3 bzw. 1.2 und 1.3 eingebaut wurde.

Etwaige Öffnungen wie Kaminanschlüsse und Wandschränke wurden mit Folie abgeklebt und Fenster bzw. Türen geschlossen gehalten. Nennenswerter Windeinfluss lag während der Messungen nicht vor.

7.3. Ergebnisse

Zur Ermittlung der Luftwechselrate n bei 50Pa Druckdifferenz (n_{50}) wird der Quotient aus Leckagestrom in dieser Druckstufe und dem Innenvolumen gemäß DIN EN 13829, Gleichung (10) gebildet. Alle weiteren Werte können den Drucktestprotokollen und Diagrammen im Anhang entnommen werden.

Tabelle 7.1: n_{50} -Werte Blower-Door-Test

Raum	vor Sanierung [h^{-1}]	nach Sanierung [h^{-1}]	Verbesserung [%]
0.2	25,4	21,2	17
0.3	57,5	15,2	74
0.2&0.3	30,1	14,5	52
1.2	38,7	15,4	60
1.3	36,3	16,7	54
1.2&1.3	28,3	9,1	68

7.4. Beurteilung

Während der Messungen wurden Luftundichtigkeiten im Bereich der Fensterfugen, den Bauteilfugen an den Anschlussbereichen Decke-Wand sowie ganzflächig an den Wänden durch Astlöcher und Fugen lokalisiert. Weitergehende Untersuchungen in Kombination mit dem Blower-Door-Test wie IR-Thermographie, Vernebelung oder Luftgeschwindigkeitsmessung wurden nicht durchgeführt.

Wie aus Tabelle 7.1 ersichtlich ist, konnten die Luftwechselraten durch die Sanierungsmaßnahmen deutlich reduziert werden. Lediglich in Raum 0.2 weicht die Verbesserung erheblich von den übrigen Räumen ab, wenngleich dieser Raum vor der Sanierung die niedrigste Luftwechselrate besaß. Diese geringe Verbesserung ist offensichtlich darauf zurückzuführen, dass aufgrund der innenseitigen, historischen Holzvertäfelung an der Ostwand und weiten Teilen der Südwand keine verbesserte Luftdichteherstellung hergestellt werden konnte. Zusätzlich befindet sich in diesem Raum der Kachelofen, dessen Öffnungen zwar verklebt wurden, der einerseits selbst andererseits aber besonders im Anschlussbereich der Wand erhöhte Luftdurchgänge zu verzeichnen haben dürfte.

Insgesamt liegen sämtliche Luftwechselraten trotz umfangreicher Abdichtungsmaßnahmen deutlich über den nach EnEV festgelegten Grenzwerten für Neubauten.

8. Material- und Bauteilkennwerte

Im Rahmen dieses Kapitels beschränken sich die Ausführungen auf die für weitere Berechnungen notwendigen Kenngrößen der betrachteten Bauteile.

8.1. Wände und Decken

Da die Wärmeleitung planmäßig nur quer zur Holzfaser stattfindet, wurde für alle Holzbauteile mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,13\frac{W}{mK}$ für das vorliegende Fichtenholz gerechnet (vgl. Materialdatenbank der Simulationssoftware DELPHIN). Dies spiegelt zwar in Bereichen des zweidimensionalen Wärmetransportes nicht die Anisotropie des Holzes wider, entspricht aber der gängigen Normung (DIN 4108-4 i.V. mit DIN EN ISO 10456) und spielt nur in geringen Bereichen eine Rolle.

Der exakte Wandaufbau mit Außen- und Innenverkleidungen wurde nur im Rahmen der hygrisch-thermischen Simulation verwendet, da der Einfluss etwa für die energetische Betrachtung bei dem vorliegenden Objekt mit seinen hohen Energiebedarfen gering ist und die energetischen Bilanzierungen minimal positiv beeinflussen würde.

Die wärmedämmtechnische Qualität wird hierbei durch den Wärmedurchlasswiderstand R bzw. den Wärmedurchgangskoeffizienten U ausgedrückt, welche sich allgemein für homogene Bauteile wie folgt ergeben:

$$R = R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{si}$$

bzw.

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{si}}$$

Für inhomogene Bauteile ist die Berechnung des Wärmedurchlasswiderstandes etwas komplexer und wird im Rahmen der Wärmebrückenberechnung für den Zustand nach der Sanierung beispielhaft dargestellt.

8.2. Fenster und Türen

Die Werte für den Gesamtenergiedurchlass der Verglasung g_{\perp} wurden E DIN 4108-4 entnommen:

- Einfachverglasung $g_{\perp}=0,87$
- Einfachverglasung mit vorgesetztem Winterfenster $g_{\perp}=0,78$
- wie zuvor, aber mit vorgesetzter Plexiglas-Scheibe $g_{\perp}=0,70$

Die Wärmedurchgangskoeffizienten U_g für die Einfachverglasung wurden gemäß DIN EN ISO 10077-1 wie folgt berechnet.

Für Einfachverglasung gilt

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{si}}$$

mit

- außenseitiger Wärmeübergangswiderstand R_{se}
- Glasdicke d
- Wärmeleitfähigkeit der Verglasung λ
- raumseitiger Wärmeübergangswiderstand R_{si} .

Nach DIN EN ISO 10077-1, Anhang A sind $R_{se}=0,04 \frac{m^2K}{W}$ und $R_{si}=0,13 \frac{m^2K}{W}$ sowie nach Anhang B die Wärmeleitfähigkeit $\lambda=1,0 \frac{W}{mK}$, da keine genauen Angaben vorliegen. Die Glasstärke beträgt rund 2mm. Somit folgt

$$U_g = 5,814 \frac{W}{m^2K}.$$

Für Mehrfachverglasung (Einfachfenster mit Winterfenstern) gilt entsprechend

$$U_g = \frac{1}{R_{se} + \sum_j \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_j R_{s,j} + R_{si}}$$

mit

- Wärmedurchlasswiderstand der Luftschicht $R_{s,j}$.

Für den vorliegenden Scheibenzwischenraum von 250mm ergibt sich für beidseitig unbeschichtete Gläser ein Wärmedurchlasswiderstand von $0,163 \frac{m^2K}{W}$ nach Tab. 5.4 in [15]. Mit ansonsten unveränderten Kennwerten im Vergleich zur Einfachverglasung folgt

$$U_g = 2,970 \frac{W}{m^2K}.$$

Für den Teil der Fenster, welche im Rahmen der Sanierung mit vorgesetzten Plexiglas-Scheiben versehen wurden, war eine weitere Berechnung erforderlich. Diese erfolgt dabei analog zur Berechnung der Mehrfachverglasung mit der Ergänzung um den zusätzlichen Scheibenzwischenraum und das Plexiglas:

- Stärke Plexiglas $d_{PMMA}=5\text{mm}$, Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{PMMA}=0,19 \frac{W}{mK}$ [16]
- 50mm Scheibenzwischenraum $R_{s,50}=0,179 \frac{m^2K}{W}$

Es ergibt sich

$$U_g = \frac{1}{0,04 \frac{m^2K}{W} + \frac{0,002m}{1,0 \frac{W}{mK}} \cdot 2 + \frac{0,005m}{0,19 \frac{W}{mK}} + 0,163 \frac{m^2K}{W} + 0,179 \frac{m^2K}{W} + 0,13 \frac{m^2K}{W}} = 1,844 \frac{W}{m^2K}$$

Sämtliche ermittelten U_g -Werte besitzen eine gute Annäherung hinsichtlich der Angaben gemäß E DIN 4108-4 unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten.

Der Wärmedurchlasswiderstand der Fensterrahmen wurde gemäß DIN EN ISO 10077-2, Anhang C berechnet. Dabei wird die Verglasung durch ein Dämmpaneel p der sichtbaren Länge $b_p=190\text{mm}$ in Verglasungsstärke mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda_p=0,035 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ entsprechend Abbildung 8-1 ersetzt. Die übrigen Abmessungen können Abbildung 8-2 entnommen werden. Hiervon ausgehend erfolgte die Berechnung des zweidimensionalen Wärmestroms $L_{2D}=0,972 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ mithilfe der Software THERM, auf welche im Rahmen der Wärmebrückenberechnung genauer eingegangen wird.

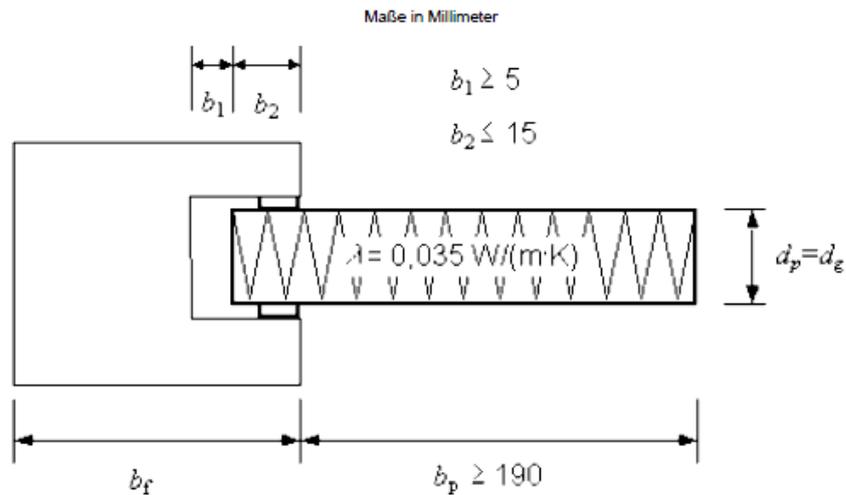


Abbildung 8-1: Modell zur Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterrahmen [DIN EN ISO 10077-2, Anhang C]

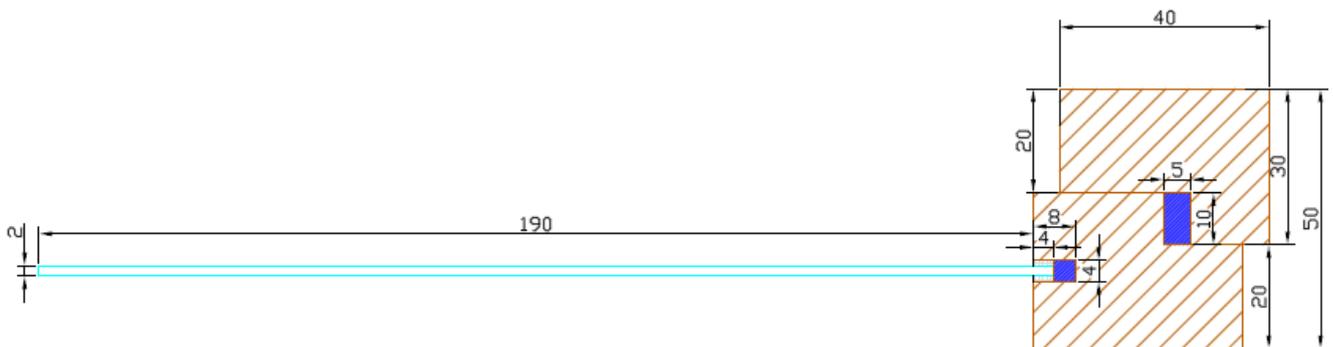


Abbildung 8-2: Modell für vorliegende Einfachfenster

Die im Rahmen befindlichen Hohlräume wurden in THERM als solche deklariert, wodurch das Programm selbständig eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{eq} analog zu DIN EN ISO 10077-2 in Abhängigkeit von den automatisch berechneten Oberflächentemperaturen der Seiten des Hohlraums ermittelt (s. Abbildung 8-3).

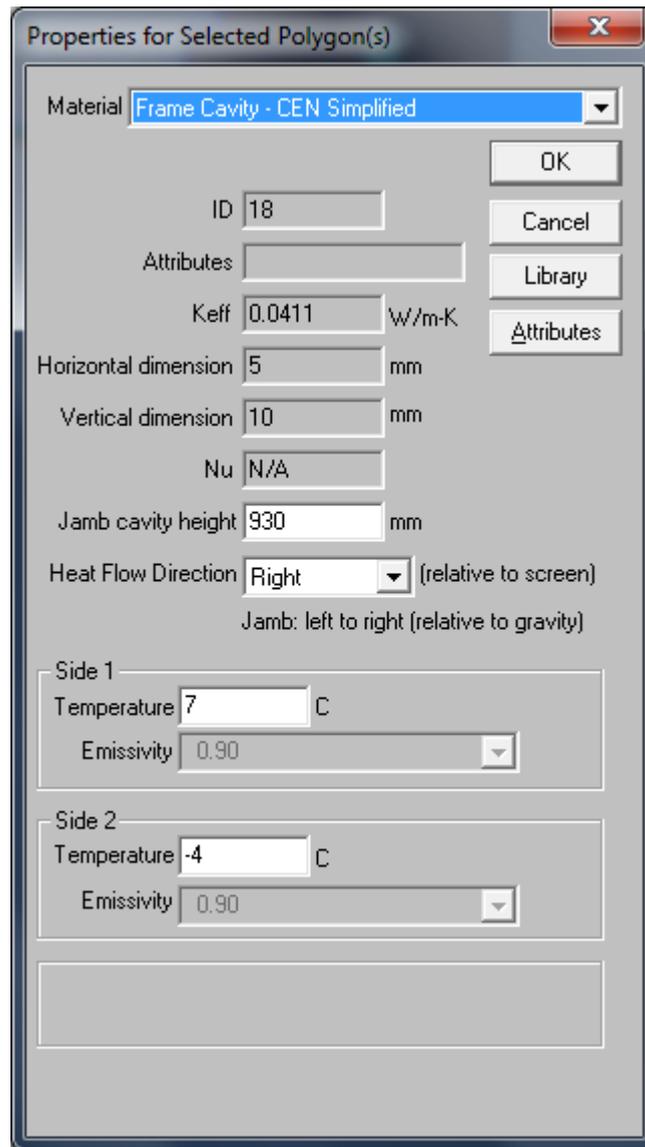


Abbildung 8-3: Kennwerte für Hohlraum zwischen Flügel und Rahmen

Eine manuelle Vergleichsrechnung bestätigt die Berechnungsergebnisse für die äquivalente Wärmeleitfähigkeit wie im Folgenden dargelegt wird.

Es wird dabei von einem unbelüfteten, rechteckigen Hohlraum ausgegangen, der durch einen Schlitz von maximal 2mm Breite mit seiner Umgebung verbunden ist.

Somit folgt λ_{eq} aus:

$$\lambda_{eq} = \frac{d}{R_s}$$

Der Wärmedurchlasswiderstand ergibt sich aus

$$R_s = \frac{1}{h_a + h_r}$$

wobei mit h_a der konvektive Anteil und mit h_r der Strahlungsanteil beschrieben werden.

Da keine anderen Angaben vorliegen, wird gemäß Norm mit einer maximalen Temperaturdifferenz der Oberflächen im Hohlraum von $\Delta T = 10\text{K}$ gerechnet.

Demnach gilt:

$$h_a = \max \left\{ \frac{0,025 \frac{W}{mK}}{d} \left| 1,57 \frac{W}{m^2K} \right. \right\}$$

Mit der Abmessung in Wärmestromrichtung von $d = 10\text{mm}$ ergibt sich $h_a = 1,57 \frac{W}{m^2K}$.

Es wird für eine Emissivität ϵ von 0,90 ausgegangen und die Breite des Hohlraums beträgt 5mm. Damit folgt aus

$$h_r = 2,11 \frac{W}{m^2K} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b}\right)^2} - \frac{d}{b} \right)$$

für den Strahlungsanteil $h_r = 2,608 \frac{W}{m^2K}$.

Somit ist $R_s = 0,239 \frac{m^2K}{W}$ und $\lambda_{eq} = 0,042 \frac{W}{mK}$. Dies stellt eine gute Näherung zur Lösung von $\lambda_{eq} = 0,0411 \frac{W}{mK}$ nach THERM da, obwohl die angenommene Temperaturdifferenz von $\Delta T = 10\text{K}$ etwas von der berechneten Temperaturdifferenz von 11K abweicht.

Der U-Wert des Rahmens berechnet sich dann wie folgt:

$$U_f = \frac{L_{2D} - U_p \cdot b_p}{b_f}$$

Für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Paneels gilt

$$U_p = \frac{1}{R_{se} + \frac{d_p}{\lambda_p} + R_{si}}$$

womit sich U_p zu $4,403 \frac{W}{m^2K}$ ergibt.

Mit der projizierten Breite des Rahmenprofils $b_f = 45\text{mm}$ ergibt sich $U_f = 3,006 \frac{W}{m^2K}$.

Diese grundsätzlich nur für die Einfachverglasung gültigen Werte wurden auch für die Winterfenster und die Winterfenster mit zusätzlicher Plexiglasscheibe angenommen, was auf der ungünstigen Seite liegt, da mit zunehmender Rahmenstärke der Wärmedurchgangskoeffizient abnehmen würde. Dies wird als zulässig betrachtet, da im vorliegenden Fall eine Änderung dieses Wertes im Gegensatz etwa zum Wärmedurchgangskoeffizienten der Verglasung nur sehr geringe Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf des Gebäude (bei der Bilanzierung in PHPP ergibt sich für eine Änderung des U_f -Wertes um 100% eine Änderung des Heizwärmebedarfs unter 1%). Hinzu kommt, dass die vorgetzten Winterfenster ohnehin nur per Riegelkonstruktion angebracht werden und hier keine geschlossene Rahmenkonstruktion entsteht.

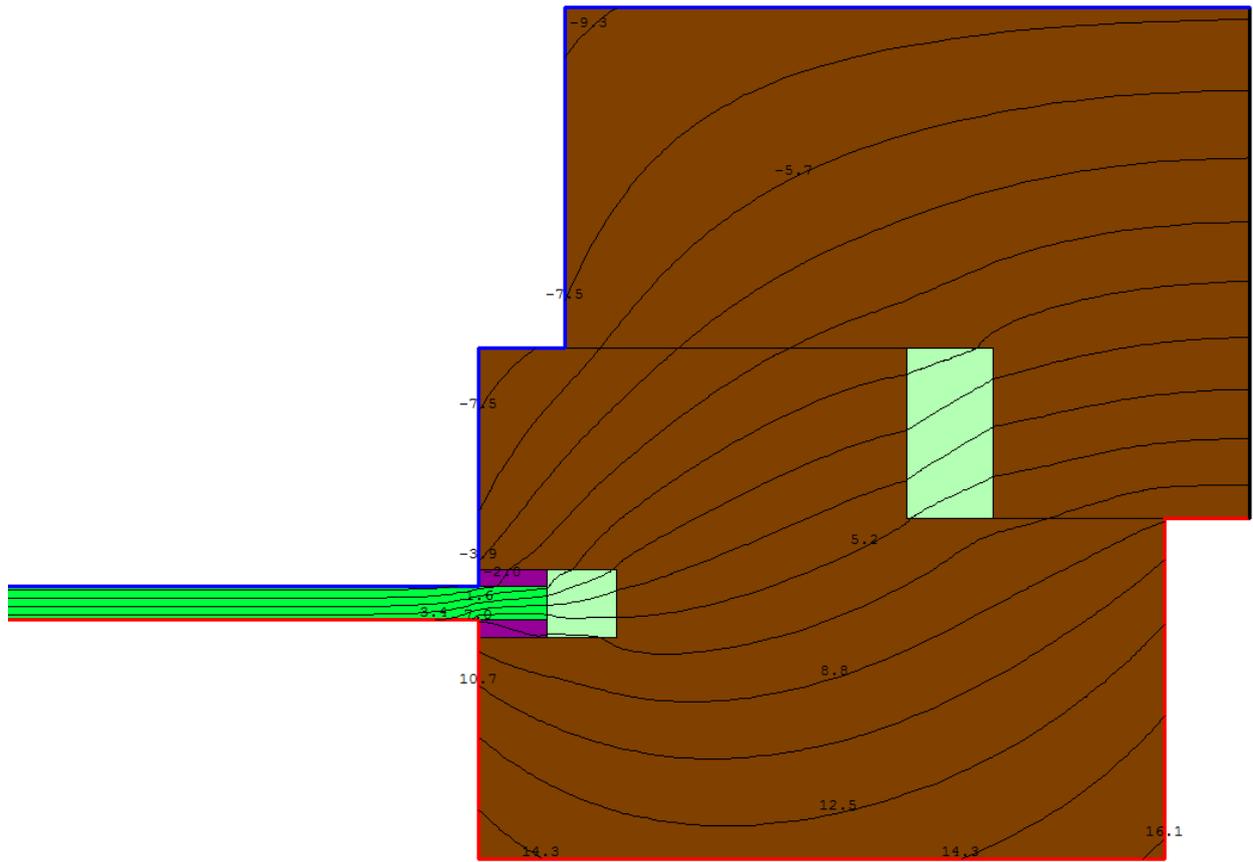


Abbildung 8-4: Temperatur-Isothermenverlauf im Fensterrahmen mit THERM berechnet

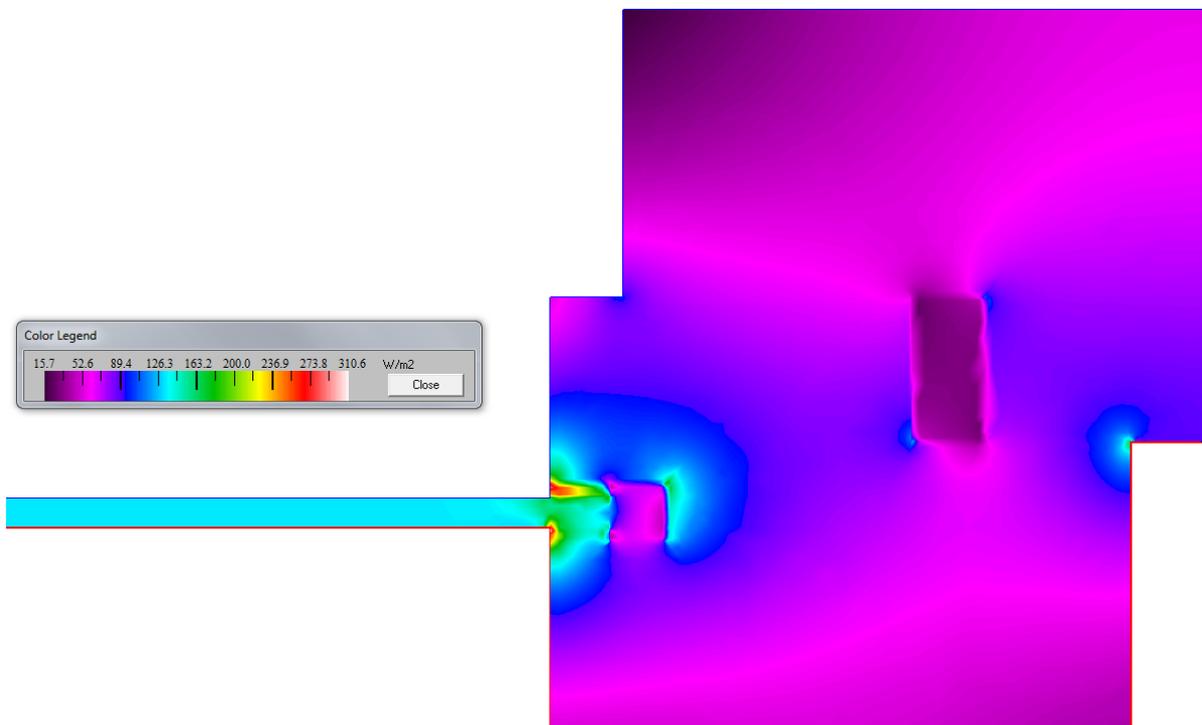


Abbildung 8-5: Wärmestromdichten im Fensterrahmen mit THERM berechnet

Die Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster U_W ergeben sich gemäß DIN EN ISO 10077-1, wobei aufgrund der Konstruktionsart der Einfluss des Abstandshalters ψ_g gleich Null ist. Die U_W -Werte wurden anhand der wie zuvor dargelegt ermittelten Werte mittels PHPP berechnet und betragen:

- Einfachfenster $U_{w,E} = 5,62 \frac{W}{m^2K}$
- Einfachfenster mit Winterfenster $U_{w,W} = 3,35 \frac{W}{m^2K}$
- wie zuvor, aber mit Plexiglasvorsatzscheibe $U_{w,P} = 2,46 \frac{W}{m^2K}$

Das Vorgehen für die Türrahmen erfolgte analog. THERM liefert hierfür einen Isothermen-Verlauf nach Abbildung 8-6. Mit einem THERMfaktor von $0,651 \frac{W}{m^2K}$ bei einer Länge von 0,41m ergibt sich $L_{2D} = 0,267 \frac{W}{mK}$. Bei einer gemessenen Türstärke von 3,5cm folgt für den Wärmedurchgangskoeffizienten des Panels $U_p = 0,855 \frac{W}{mK}$. Mit der projizierten Türrahmenbreite $b_f = 10,5cm$ ist $U_f = 0,994 \frac{W}{m^2K}$.

Der U-Wert der Tür selbst beträgt $2,277 \frac{W}{m^2K}$.

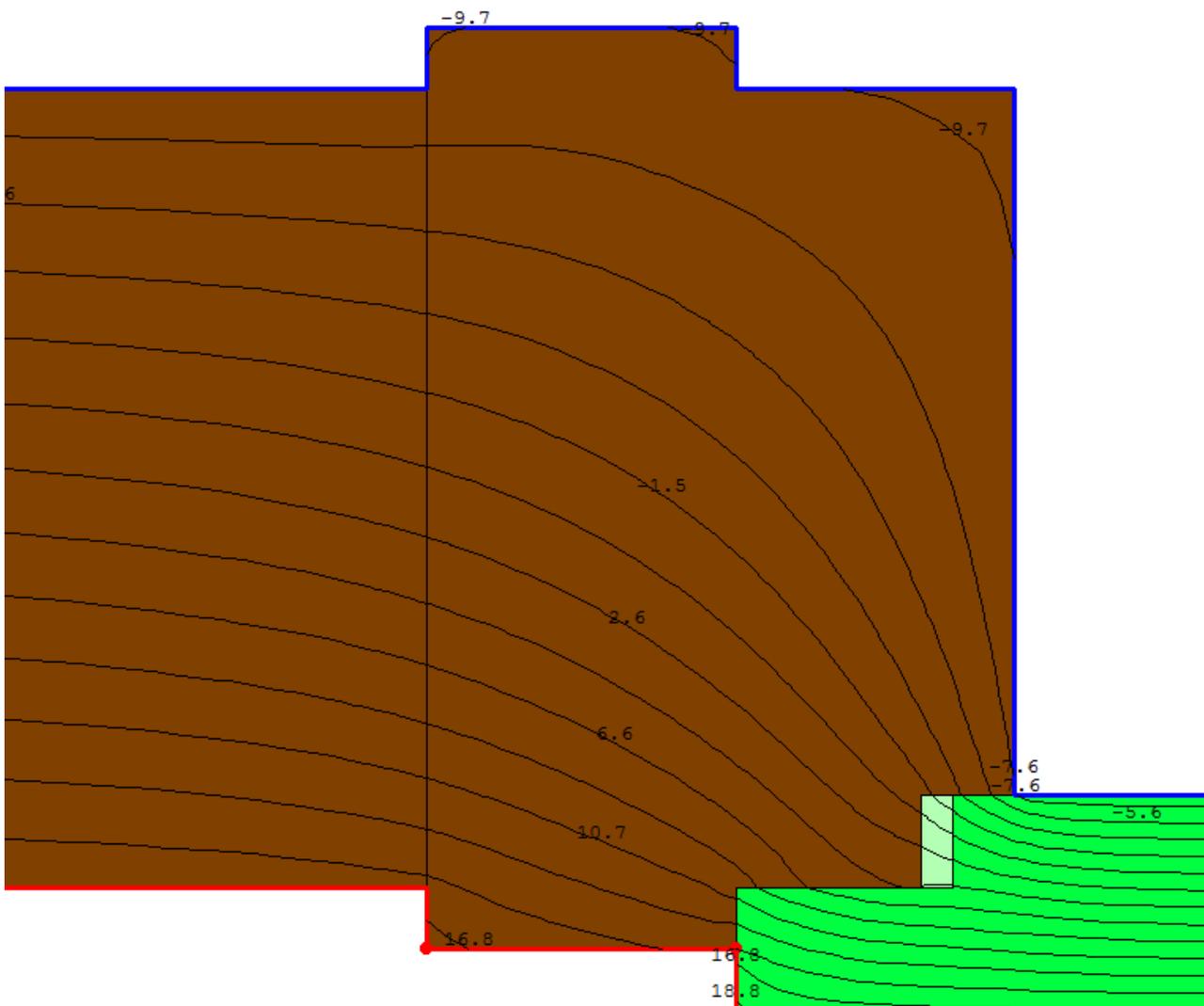


Abbildung 8-6: Temperatur-Isothermenverlauf Türrahmen mit THERM berechnet

8.3. Vorsatzschalen mit Holzfaserdämmplatten und Dampfbremse

Für die Rahmenkonstruktion wurde Fichtenholz verwendet, so dass sich hier ebenfalls eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,13\frac{W}{mK}$ ergibt.

Bei den Holzfaserdämmplatten handelt es sich um rechteckige Platten mit dem Markennamen STEICOflex. Die folgenden Kennwerte wurden dabei dem Produktdatenblatt [18] entnommen:

- Rohdichte $\rho=50\frac{kg}{m^3}$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda=0,038\frac{W}{mK}$
- Wasserdampfdiffusionswiderstand $\mu=1/2$

Die feuchteadaptive Dampfbremse ist ein Produkt der Firma isover und wird unter dem Handelsnamen vario KM vertrieben. Auf der Internetseite (<http://www.isover.de/Home/Produktwelt/Produkte/Vario/Vario-KM/Vario-KM.aspx>) sind folgende Materialkenndaten einsehbar:

- Dicke $d=0,06mm$
- s_d -Wert: $0,2\leq s_d\leq 5,0$ (entspricht einem Wasserdampfdiffusionswiderstand von $3333\leq\mu\leq 83333$)

8.4. Übersicht Bauteilkennwerte

Tabelle 8.1: Übersicht der wichtigsten Bauteilkennwerte

Bezeichnung	Stärke [mm]	U [W/(m²K)]
unsaniertes Zustand		
Außenwand	150	0,755
Innenwand	130	0,855
Fußboden EG/OG	65/65	1,408/1,190
Decke EG/OG	65/40	1,429/2,234
Türen	35	2,277
einfach verglaste Fenster	-	5,620
wie zuvor, mit Winterfenster	-	3,350
saniertes Zustand		
Außenwand	250	0,268
Innenwand	230	0,280
Fußboden EG/OG	165/65	0,299/1,190
Decke EG/OG	65/140	1,429/0,325
Türen	35	2,277
einfach verglaste Fenster	-	5,620
wie zuvor, mit Winterfenster und PMMA-Scheibe	-	2,460

9. Wärmebrückenberechnung

In bauphysikalischer Hinsicht wurden im Rahmen dieser Arbeit lediglich die klimatisierten und durch die TU Darmstadt sanierten Bereiche betrachtet (Räume 0.2, 0.3, 1.2 und 1.3). Für alle übrigen Bereiche des Hauses wurde die ungünstigste Annahme von Außenklima getroffen, was anhand der örtlichen Gegebenheiten (keine Dämmung, defekte Fenster) und aus Mangel an anderen Werte als zulässig betrachtet werden kann.

Es wurden alle relevanten geometrischen Wärmebrücken des beheizten Bereiches untersucht. Wie den Plänen im weiteren Verlauf dieses Kapitels (Abbildung 9-8 bis Abbildung 9-10) entnommen werden kann, wurden Wärmebrücken teilweise zusammengefasst, da in mehreren Bauwerksbereichen gleiche Konstruktionsformen und –abmessungen vorliegen.

Die Berücksichtigung der Wärmebrückenverluste erfolgt über den genauen Nachweis anhand der Berechnung des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ (im Folgenden: „ Ψ -Wert“). Dieser beschreibt die Differenz zwischen dem Wärmeverlust im Wärmebrückenbereich, der durch den thermischen Leitwert L_{2D} ausgedrückt wird, und dem Wärmeverlust L_0 einer gleich großen, ungestörten Fläche.

9.1. Grundlagen

9.2. Definition

Als Wärmebrücken werden grundsätzlich jene Bereiche bezeichnet, die eine erhöhte Wärmestromdichte aufweisen. Die Wärmeströme laufen hierbei nicht mehr senkrecht zur Bauteiloberfläche und parallel zueinander (eindimensional), sondern gekrümmt (zweidimensional). Dies ist die Ursache, dass im Bereich von Wärmebrücken die Wärmeverluste erhöht sowie die Oberflächentemperaturen verringert sind.

Definitionsgemäß kann es also zu zwei Arten von Wärmebrücken kommen:

- konstruktive Wärmebrücken
- geometrische Wärmebrücken

Konstruktive Wärmebrücken treten überall dort auf, wo in benachbarten Bauteilbereichen Baustoffe mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten zum Einsatz kommen. Dort treten an den Grenzen Übergangseffekte auf, wobei es unerheblich ist, ob die Konstruktion an sich identische oder unterschiedliche U-Werte besitzt (s. Abbildung 9-1). [19]

Geometrische Wärmebrücken sind überall dort vorzufinden, wo ein Bauteil von seiner Platten- bzw. Scheibenform abweicht, also etwa in Bauwerkskanten und –ecken. Dort stehen in der Regel den kleineren, wärmeaufnehmenden Innenoberflächen größere, wärmeabgebende Außenoberflächen gegenüber (Abbildung 9-2).

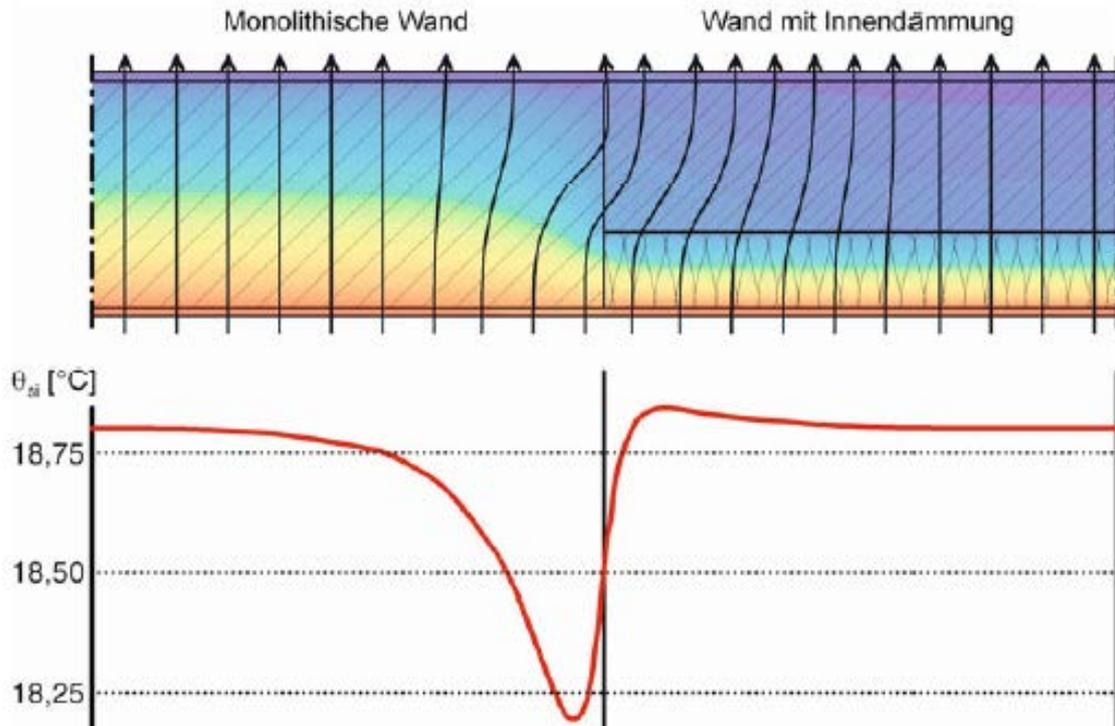


Abbildung 9-1: Konstruktive Wärmebrücke mit Verlauf der Wärmeströme (oben) und Oberflächentemperaturen (unten) bei gleichem U-Wert in beiden Konstruktionsarten; aus [19]

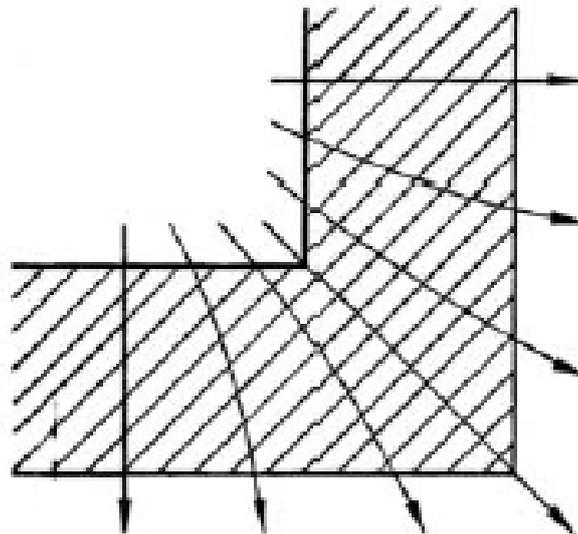


Abbildung 9-2: geometrische Wärmebrücke mit Verlauf der Wärmeströme; aus [8]

Neben den dargestellten zweidimensionalen, linienförmigen Wärmebrücken (Gebäudekanten usw.) sind in Gebäuden dreidimensionale, punktförmige Wärmebrücken vorhanden, in welchen die Wärmeströme nochmals erhöht und die Temperaturen verringert sind.

9.3. Auswirkungen

Erhöhte Wärmeverluste sind vor allen Dingen aus ökologischer und ökonomischer Sicht zu vermeiden, weshalb eine wärmebrückenarme Bauweise anzustreben ist. Außerdem wirken sich geringe Oberflächentemperaturen, wie sie im Bereich von Wärmebrücken auftreten, negativ auf die Behaglichkeit aus, da den Bewohnern Strahlungswärme entzogen wird, woraufhin es häufig zur Komfortsteigerung zur Erhöhung der Raumtemperatur kommt, was seinerseits Kosten und Umweltbelastungen nach sich zieht.

In bauphysikalischer Hinsicht kommt jedoch in erster Linie den verminderten Oberflächentemperaturen im Wärmebrückenbereich Bedeutung zu. Unterschreitet nämlich die Oberflächentemperatur die Taupunkttemperatur des vorliegenden Wasserdampfdruckes, kommt es zur Tauwasserbildung. Neben Schäden an den Baumaterialien selbst (Korrosion, Salzausblühungen,...) ist diese auch aus gesundheitlichen Gründen bedenklich, da es dort zur Schimmelpilzbildung kommen kann.

Mittlerweile wird jedoch wie bereits kurz im Kapitel zu den physikalischen Grundlagen angeklungen ist, davon ausgegangen, dass Schimmelpilzwachstum nicht an Tauwasserbildung an den Oberflächen gebunden ist, sondern aufgrund von Sorptionsvorgängen bereits einsetzt, wenn an der Bauteiloberfläche über vier bis fünf Tage an 12 Stunden pro Tag eine relative Feuchte von mindestens 80% herrscht. [19]

Diese Überlegung ging auch in die Normung u.a. in Form der DIN 4108-2 ein, welche über einen Temperaturfaktor die einzuhaltende Mindestoberflächentemperatur hinsichtlich der maximal herrschenden relativen Luftfeuchte zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung definiert (s. Kapitel 9.6).

Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass einzelne Quellen Schimmelpilzwachstum auf Baustoffen bereits ab 70% relative Luftfeuchte beschreiben (beispielsweise [20], [21]). Da hier also noch weiterer Forschungs- und Klärungsbedarf existieren zu scheint was die untere Grenze mikrobiellen Wachstums anbelangt, wird im Rahmen dieser Arbeit auf das Schimmelpilz-Kriterium (80% relative Feuchte) der gängigen Normungen (DIN 4108-2, DIN EN ISO 13788) zurückgegriffen.

9.4. Rechnerische Untersuchungen

9.4.1. Randbedingungen

Die Ermittlung der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen erfolgte gemäß DIN EN ISO 10211 i.V. mit DIN 4108-2 und DIN EN ISO 6946. Da die betreffenden Bauteile gleichförmig sind und punktförmige Wärmebrücken sich im vorliegenden Fall lediglich aus der Überschneidung mehrerer linienförmiger Wärmebrücken ergeben, wird es als ausreichend betrachtet, zweidimensionale numerische Berechnungen durchzuführen (vgl. DIN EN ISO 10211 sowie DIN EN ISO 14683).

Hinsichtlich der modellhaften Abbildung der Konstruktion wurden, wie in DIN EN ISO 10211 gefordert, adiabate Schnittebenen (kein Wärmeaustausch über diese Ränder hinaus) im Abstand von 100cm vom zentralen Element gesetzt, weil in diesem Abstand wieder von ungestörten Wärmeströmen senkrecht zum Bauteil ausgegangen werden kann.

Da sich im betrachteten Bauwerk Wärmebrücken aufgrund ihrer räumlichen Nähe häufig gegenseitig beeinflussen und weniger als die geforderten 100cm voneinander entfernt liegen, wurden alle Wärmebrücken isoliert betrachtet, was die Beurteilung jeder Wärmebrücke, besonders hinsichtlich der Verbesserung durch die Sanierungsmaßnahmen, wesentlich erleichtert. Des Weiteren wird das nach Norm geforderte Kriterium beispielsweise auf der östlichen Gebäudeseite von keiner Wärmebrücke eingehalten (Abstand zu benachbarter Wärmebrücke immer kleiner als 100cm), so dass die ganze Wand hätte modelliert und in einem Durchgang berechnet werden müssen, was zur Schwachstellenanalyse einzelner Konstruktionsweisen nicht zielführend ist. Die im Rahmen dieser Arbeit verwandte Vorgehensweise deckt sich auch mit der in der Praxis üblichen.¹

Für die Berechnung der thermischen Leitwerte wurden die Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN EN ISO 6946 angesetzt. Die Temperaturrandbedingungen sind grundsätzlich beliebig (solange diese konstant sind), da die Temperaturdifferenz, die für einen Wärmestrom q erforderlich ist, nur die Größe dessen, nicht aber die des thermischen Leitwertes $L_{2D} = \frac{q}{\Delta T}$, beeinflusst.

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen erfolgte mit den Randbedingungen nach DIN 4108-2. Als Außentemperatur wurde aufgrund der vorherrschenden klimatischen Bedingungen ein verschärfter Wert von -10°C angesetzt. Für die Innenoberflächen sind im Vergleich zur Berechnung des Ψ -Wertes erhöhte Wärmeübergangswiderstände anzusetzen. Dies trägt dem häufig anzutreffenden Umstand Rechnung, dass in Wohnräumen wärmeübertragende Bauteile durch Gardinen oder Möblierung verdeckt sind und somit der Wärmeübertrag von der Raumluft auf die Bauteiloberfläche behindert ist, was in niedrigeren Oberflächentemperaturen resultiert. Da dies im bewohnten Fall auch für das untersuchte Objekt anzunehmen ist, wurden diese erhöhten Wärmeübergangswiderstände verwendet.

Tabelle 9.1: Verwendete Wärmeübergangswiderstände für Wärmebrückenberechnungen

Richtung des Wärmestroms	R_{si} [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]	R_{se} [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]
Berechnung Ψ-Wert		
aufwärts	0,10	0,04
horizontal	0,13	
abwärts	0,17	
Berechnung Oberflächentemperaturen		
alle Richtungen	0,25	0,04

9.4.2. Berechnung

Im vorliegenden Fall wird, wie bereits begründet, die Annahme getroffen, dass aufgrund der Bauweise und des Zustandes des Objektes in unbeheizten Bereichen des Gebäudes einschließlich Keller und Dachboden nahezu Außenklima herrscht. Somit werden hinsichtlich der Wärmebrückenbetrachtung nur Details vorliegen, die zwei verschiedene Temperaturen (innen/außen) besitzen. Dementsprechend

¹ Information Dipl.-Ing. Mirko Klein (FG WiB)

erfolgt die Berechnung nach den Bestimmungen der DIN EN ISO 10211 für 2D-Berechnungen mit zwei Temperatur-Randbedingungen.

Demgemäß ergibt sich für den längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ :

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j$$

Hierbei ist:

- L_{2D} der thermische Leitwert aus einer 2D-Berechnung
- U_j der Wärmedurchgangskoeffizient des 1D-Bauteils
- l_j die Systemlänge für die U_j gilt
- N_j die Anzahl der 1D-Bauteile

Anhand eines Index i oder e wird kenntlich gemacht, ob der Ψ -Wert innen- oder außenmaßbezogen angegeben wird. In dem auf CD-ROM befindlichen Wärmebrückenkatalog wurden beide Ψ -Werte berechnet, wenngleich für die Bilanzierung, etwa mittels PHPP, in der Regel die Systemgrenzen nach EnEV, also mit Außenmaßbezug, genutzt werden.

Hinsichtlich des Wärmedurchgangskoeffizienten U_j wurden mittlere U-Werte verwendet. Dies wirkt sich z.B. im Bereich der Wärmedämmung mit Rahmenkonstruktion dergestalt aus, dass die Konstruktion an sich als wärmebrückenfrei betrachtet wird, was die Anzahl der zu berechnenden Wärmebrücken erheblich reduziert und die separate Betrachtung von Gefache und Holzständern in der weiteren Verwendung entbehrlich macht.

Die Berechnung der Oberflächentemperaturen kann wie folgt geschehen [8]:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \cdot \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R_T} = \theta_i - R_{si} \cdot q$$

Hierbei ist:

- θ_i die Lufttemperatur innen, θ_e die Lufttemperatur außen
- R_{si} der innere Wärmeübergangswiderstand
- R_T der Wärmedurchgangswiderstand des Bauteils
- q die Wärmestromdichte

Die thermischen Leitwerte und Oberflächentemperaturen wurden mittels der Software THERM berechnet, auf welche im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

9.4.3. THERM

Im Rahmen dieser Arbeit wurde THERM in der Programmversion 6.3.44.0 vom April 2012 benutzt, welches als Freeware auf den Internetseiten des Lawrence Berkeley National Laboratory (<http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html>) zum Download ausschließlich in englischer Sprache verfügbar ist.

Ursprünglich wurde es dazu entwickelt, Wärmedurchgänge bei Fenstern zu ermitteln. Zur numerischen Lösung verwendet es die FEM, wobei die generierten Netze aus Drei- und Vierecken bestehen. Es erfolgt keine direkte Ermittlung von Ψ -Werten und Oberflächentemperaturen.

Die mitgelieferte Material-Datenbank sowie die Auswahl an Randbedingungen entsprechen amerikanischen Bedürfnissen und Richtlinien, so dass sämtliche Randbedingungen und Materialien manuell eingegeben werden mussten.

Als Berechnungsergebnis liefert THERM einen auf die Länge bezogenen „U-Factor“ (im Folgenden auch „THERMfaktor“), der über Multiplikation mit der entsprechenden Länge den thermischen Leitwert L_{2D} liefert (s. Abbildung 9-3). Zieht man von diesem den U-Wert sowie die Länge des ungestörten Bauteils ab, erhält man den Ψ -Wert. Der größte zulässige Fehler wurde auf 2,0% begrenzt, was sich u.a. auf die Feinheit des generierten Gitters auswirkt.

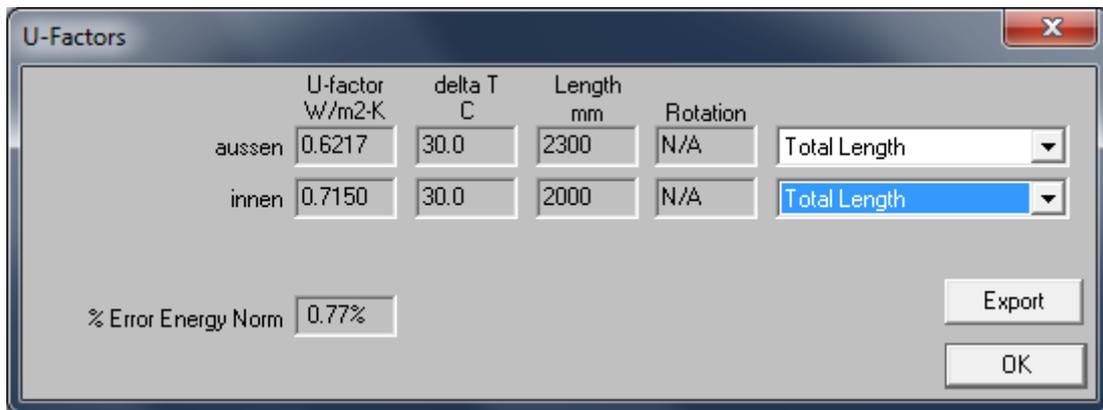


Abbildung 9-3: Berechnungsergebnisse THERM

Eine Funktion zur Ausgabe der niedrigsten Oberflächentemperatur existiert in THERM wie bereits geschildert nicht. Es besteht jedoch die Möglichkeit, sich nach der Berechnung die Temperatur am Mauszeiger anzeigen zu lassen. In Kombination mit den angezeigten Temperatur-Isothermen und dem Sachverstand des Nutzers lassen sich so auch auf diese Weise die niedrigsten Oberflächentemperaturen ermitteln (s. Abbildung 9-4).

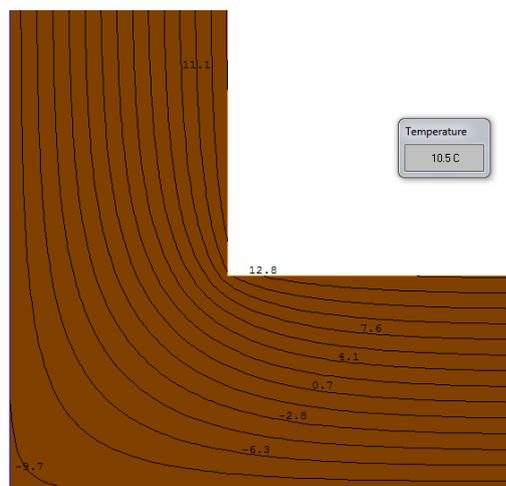


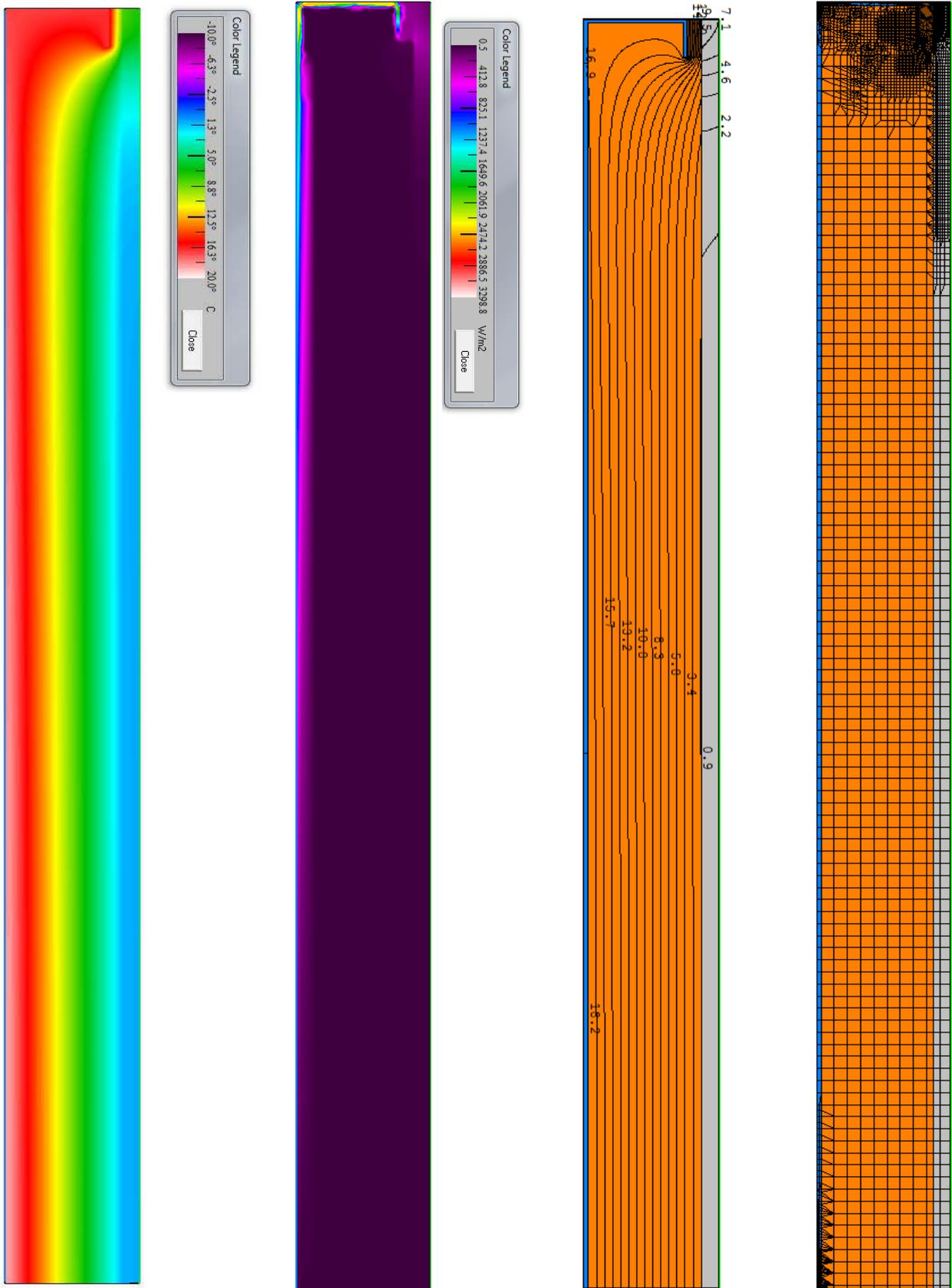
Abbildung 9-4: Temperaturverlauf in Isothermendarstellung und niedrigste Oberflächentemperatur

Als weitere Darstellungsmöglichkeiten sind Temperaturverläufe, Wärmestromdichten und Wärmestromvektoren verfügbar. Eine direkte Ausgabe ist nicht möglich sondern muss über Screenshots erfolgen.

Zur Prüfung der Verlässlichkeit von THERM wurde eine Validierung für den zweidimensionalen Wärmedurchgang gemäß DIN EN ISO 10211 , Anhang A, Fall 2 durchgeführt (Tabelle 9.2)**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Die ermittelten Temperaturen stimmen exakt überein und auch der Gesamtwärmestrom weicht mit 9,493 W/m um nur 0,007 vom vorgegebenen Gesamtwärmestrom von 9,500 W/m ab. Somit sind die Ergebnisse nach THERM innerhalb der vorgegebenen Toleranz von 0,1K bzw. 0,1 W/m (s. Tabelle 9.2).

Tabelle 9.2: Ergebnisse Referenzprüffall mit Temperaturverlauf, Wärmestromdichtenverlauf, Temperaturisothermen und generiertem FE-Netz (von links nach rechts)



Wie bereits erwähnt, wurde die Konstruktion nach der Sanierung aufgrund der Holzrahmenbauweise mit Gefachebereichen durch mittlere Wärmedurchgangskoeffizienten U_m beschrieben. Die Berechnung erfolgte dabei nach DIN EN ISO 6946 für inhomogene Bauteile.

Beispielhaft wird hier die Vorgehensweise für eine der gedämmten 150er-Außenwände im Erdgeschoss dargestellt. Der geringste gemessene Abstand der Holzpfosten beträgt 50cm, so dass dies auf der ungünstigen Seite liegend für alle Pfosten angesetzt wurde.

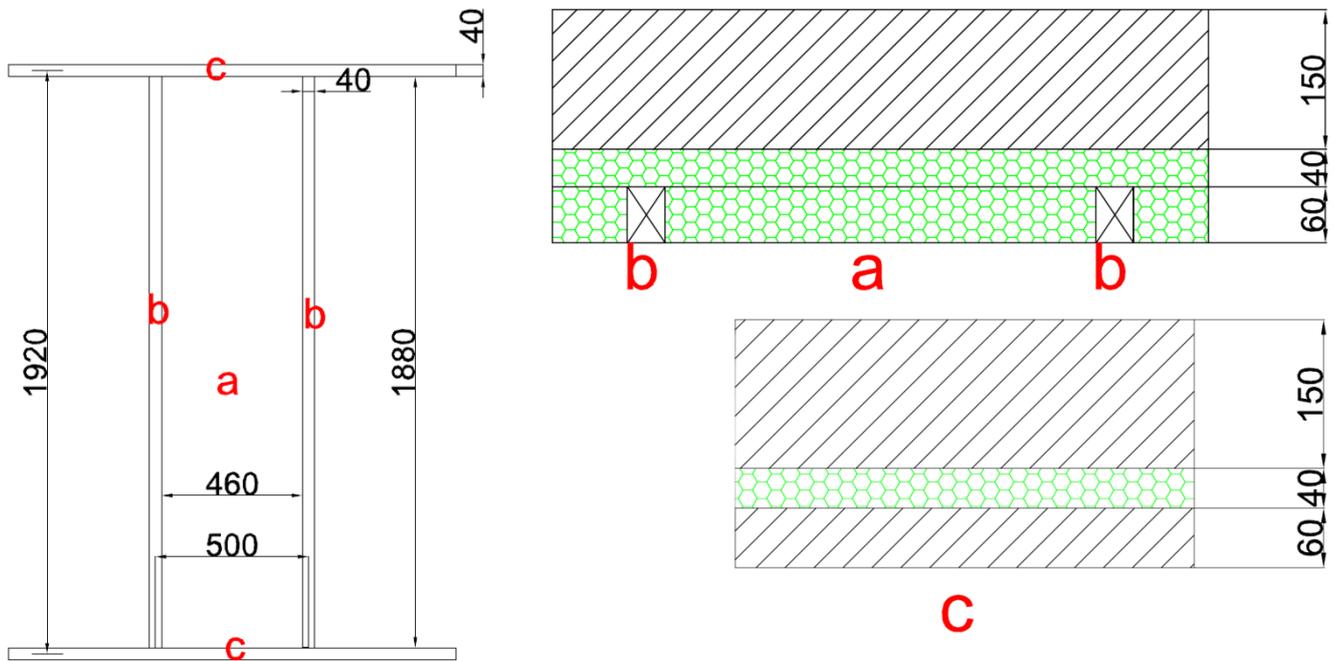


Abbildung 9-5: Bereiche der Wandkonstruktion, links Vertikalschnitt, rechts Horizontalschnitt in Wandebene

Betrachtete Fläche: $F = 0,50m \cdot 1,96m = 0,98m^2$

oberer Grenzwert

- Bereich a
 - $f_a = \frac{0,46m \cdot 1,92m}{0,98m^2} = 0,901$
 - $R_{Ta} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} = 0,13 + \frac{0,06}{0,038} + \frac{0,04}{0,038} + \frac{0,15}{0,13} = 3,955 \frac{m^2K}{W}$
 - Bereich b
 - $f_b = \frac{0,04 \cdot 1,92}{0,98} = 0,078$
 - $R_{Tb} = 0,13 + \frac{0,06}{0,13} + \frac{0,04}{0,038} + \frac{0,15}{0,13} = 2,838 \frac{m^2K}{W}$
 - Bereich c
 - $f_c = \frac{0,50 \cdot 0,04}{0,98} = 0,020$
 - $R_{Tc} = 0,13 + \frac{0,06}{0,13} + \frac{0,04}{0,038} + \frac{0,15}{0,13} = 2,838 \frac{m^2K}{W}$
- $\frac{1}{R'_T} = \frac{0,901}{3,955} + \frac{0,078}{2,838} + \frac{0,020}{2,838} = 0,262 \frac{W}{m^2K} \rightarrow R'_T = 3,812 \frac{m^2K}{W}$

unterer Grenzwert

- Schicht 1
 - $f_{a1} = \frac{0,46\text{m} \cdot 1,92\text{m}}{0,98\text{m}^2} = 0,901$
 - $R_{a1} = \frac{0,06}{0,038} = 1,579 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \frac{f_{a1}}{R_{a1}} = 0,571 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- Schicht 1.1
 - $f_{a1.1} = \frac{0,04\text{m} \cdot 1,92\text{m}}{0,98\text{m}^2} = 0,078$
 - $R_{a1.1} = \frac{0,06}{0,13} = 0,462 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \frac{f_{a1.1}}{R_{a1.1}} = 0,169 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- Schicht 1.2
 - $f_{a1.2} = \frac{0,50\text{m} \cdot 0,04\text{m}}{0,98\text{m}^2} = 0,020$
 - $R_{a1.2} = \frac{0,06}{0,13} = 0,462 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \frac{f_{a1.2}}{R_{a1.2}} = 0,043 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- $\sum R_{a,i} = 0,783 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- Schicht 2
 - $f_{b2} = \frac{0,50\text{m} \cdot 1,96\text{m}}{0,50\text{m} \cdot 1,96\text{m}} = 1,000$
 - $R_{b2} = \frac{0,04}{0,038} = 1,053 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \frac{f_{a1}}{R_{a1}} = 0,950 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- Schicht 3
 - $f_{c3} = 1,000$
 - $R_{c3} = \frac{0,15}{0,13} = 1,154 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \rightarrow \frac{f_{a1}}{R_{a1}} = 0,867 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
- $R_T'' = 0,13 + \frac{1}{0,783} + \frac{1}{0,950} + \frac{1}{0,867} + 0,04 = 3,653 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
- Mittelwert $R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2} = \frac{3,812 + 3,653}{2} = 3,733 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

Damit ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient zu $U_m = \frac{1}{3,733} = 0,268 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

Analog wurde der Wärmedurchgangskoeffizient für die 130er-Wände zu $U_m = 0,281 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ ermittelt.

Eine weitere Möglichkeit, U_m zu bestimmen, ist die Berechnung mit THERM. Hierbei wird einmal der Gefachebereich und einmal der Bereich der Riegel wie folgt abgebildet.

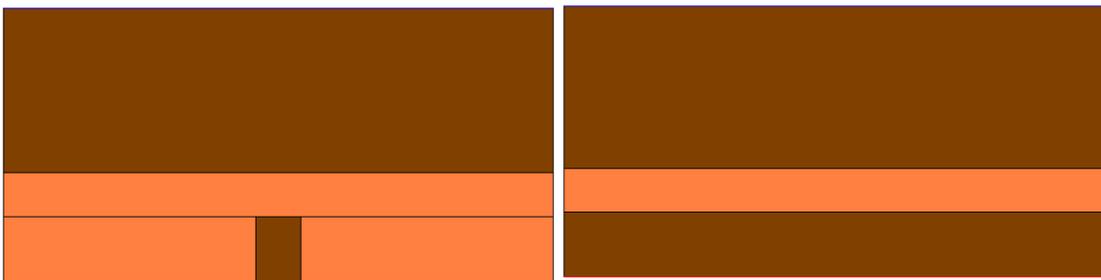


Abbildung 9-6: Darstellung des Gefachebereiches mit Holzpfosten (links) sowie des Bereiches mit Holzriegel (rechts) in THERM

Für den Gefachebereich ermittelt THERM einen U-Wert von $0,2649 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$, für den anderen Bereich $0,3524 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ (s. Abbildung 9-7).

Durch flächengemäße Gewichtung folgt:

$$\frac{1,88m}{1,96m} \cdot 0,2649 \frac{W}{m^2K} + \frac{0,08m}{1,96m} \cdot 0,3524 \frac{W}{m^2K} = 0,268 \frac{W}{m^2K}$$

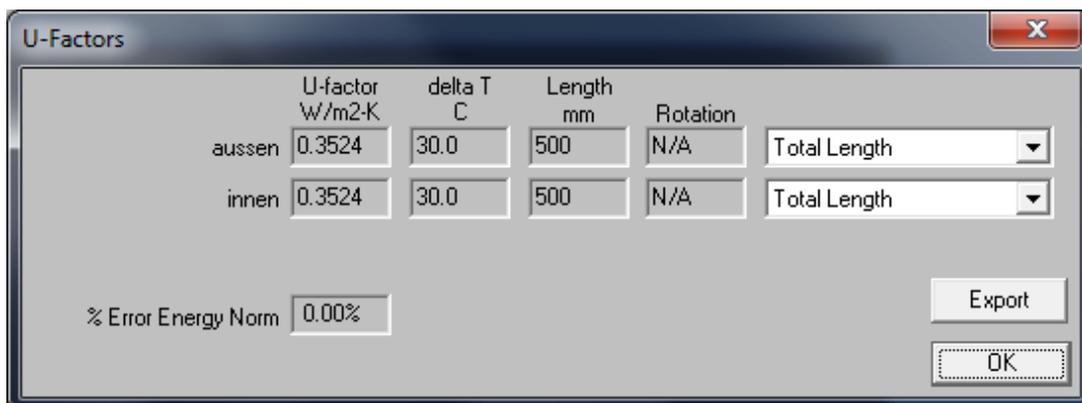
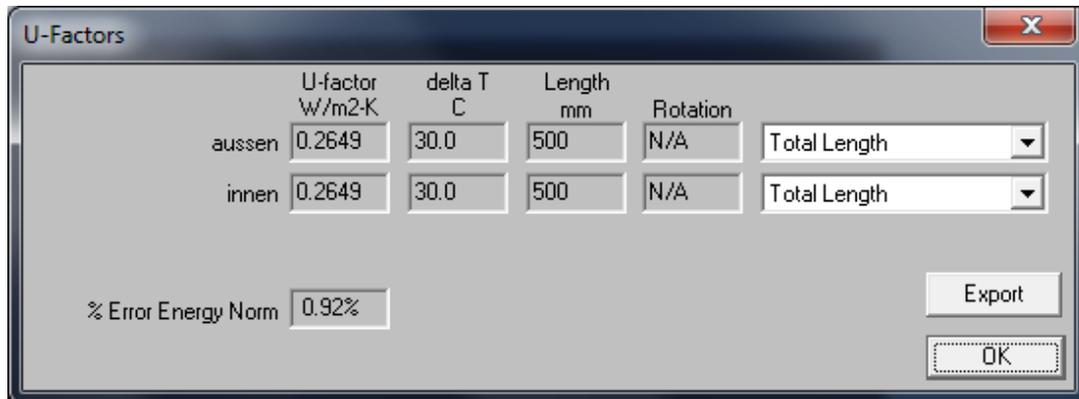


Abbildung 9-7: U-Werte nach THERM (oben: Gefachebereich, unten: Riegelbereich)

Zur weiteren Verwendung in THERM wurden die mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten in äquivalente Wärmeleitfähigkeiten $\lambda_{\text{äq}}$ umgerechnet, so dass nicht für jede Wärmebrückenberechnung der gesamte Wandaufbau gezeichnet werden musste.

- sanierte 150er-Wand: $\lambda_{\text{äq}} = d \cdot U = 0,25m \cdot 0,268 \frac{W}{m^2K} = 0,067 \frac{W}{mK}$
- sanierte 130er-Wand: $\lambda_{\text{äq}} = \quad = 0,23m \cdot 0,280 \frac{W}{m^2K} = 0,065 \frac{W}{mK}$

Für die vorhandenen Decken erfolgte das Vorgehen analog.

9.5. Wärmebrückenkatalog

Für sämtliche nachfolgend betrachteten Wärmebrücken wurde ein Wärmebrückenkatalog mithilfe der Berechnungsergebnisse aus THERM erstellt.

Eine Übersicht sämtlicher untersuchter Wärmebrücken kann den folgenden Abbildungen entnommen werden. Mehrfach verwendete Bezeichnungen resultieren daraus, dass verschiedene Wärmebrücken die gleiche Konstruktion aufweisen und daher zusammengefasst werden konnten. Auf der ungünstigen Seite liegend, wurden an Erdreich anliegende Wärmebrücken angesetzt als wären sie von Außenluft umgeben, zumal die genaue Konstruktionsweise z.B. im nicht-unterkellerten Bereich unklar ist. In den übrigen Bereichen liegt die Holzkonstruktion zweckmäßigerweise ohnehin gegen Außenluft an und nur ein Teil des Bruchsteinmauerwerks gegen Erdreich. Des Weiteren wird diese Vorgehensweise auch in der Literatur beschrieben und von der Bildung eines großen, untemperierten (und damit unrealistischen) Erdreichmodells wie dies bspw. in DIN EN ISO 10211 gefordert wird, abgesehen [19].

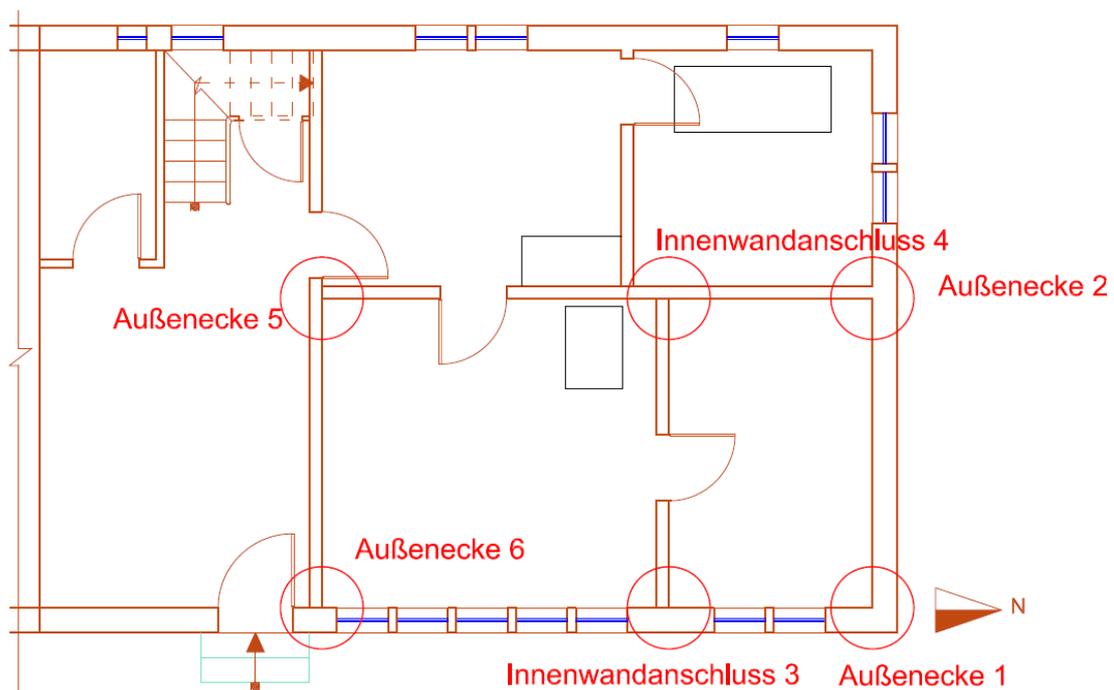


Abbildung 9-8: Grundriss mit untersuchten Wärmebrücken

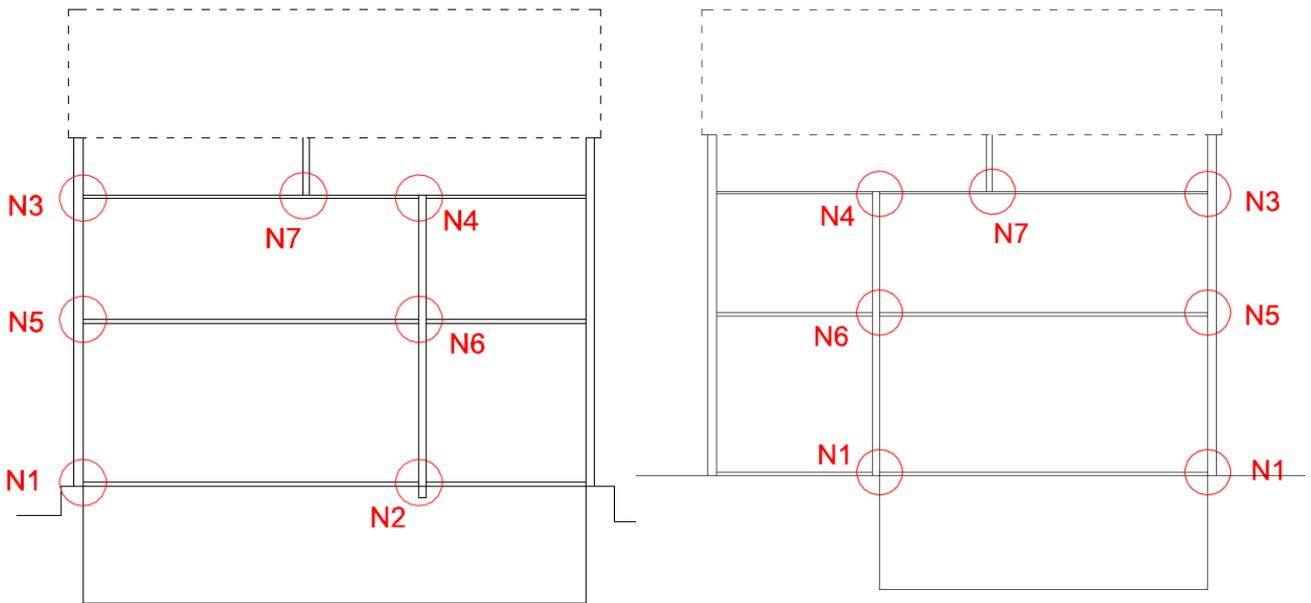


Abbildung 9-9: Schnitt von Nord (links) und von Süd (rechts)

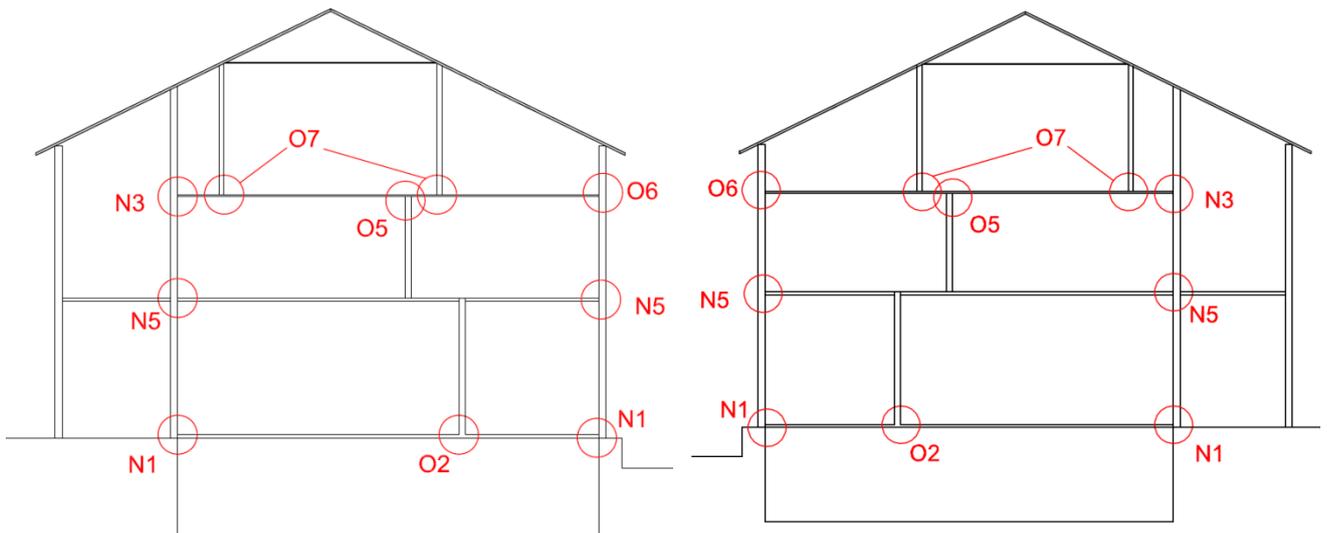


Abbildung 9-10: Schnitt von Ost (links) und Schnitt von West (rechts)

Anhand des folgenden Beispiels für die Außenecke 1 im unsanierten Zustand wird nun die generelle Vorgehensweise erläutert. Der gesamte Wärmebrückenkatalog für die Zustände vor und nach Sanierung befindet sich auf CD-ROM.

Zunächst erfolgt für die flankierenden 1D-Bauteile die Eingabe der jeweils zu verwendenden inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstände R_{si}/R_{se} entsprechend den vorliegenden Gegebenheiten (Wärmestrom aufwärts, abwärts, horizontal) sowie die Eingabe von Bauteilstärke d und Wärmeleitfähigkeit λ . Hieraus wird der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils R , der Gesamtwärmedurchlasswiderstand unter Berücksichtigung der Wärmeübergangswiderstände R_{ges} sowie der Wärmedurchlasskoeffizient U berechnet. Über Eingabe von Außen- und Innenmaß wird der jeweilige Faktor $U \cdot l$ ermittelt.

Nun werden die Ergebnisse aus THERM eingegeben. Wie Tabelle 9.3 entnommen werden kann, wurde THERM für diese Arbeit so konfiguriert, dass es einen innen- und einen außenmaßbezogenen „U-Factor“ unter Angabe der zugrunde gelegten Maße ausgibt. Dementsprechend ist es hier grundsätzlich nicht von Bedeutung, welches Wertepaar eingegeben wird, da beide miteinander multipliziert denselben thermischen Leitwert L_{2D} liefern.

Zur Berechnung der innen- bzw. außenmaßbezogenen Ψ -Werte Ψ_i bzw. Ψ_e wird nun von L_{2D} der Faktor $U \cdot l$ des ungestörten Bauteils subtrahiert.

In diesem Beispiel also:

$$\Psi_e = L_{2D} - (U_1 \cdot l_{e,1} + U_2 \cdot l_{e,2}) = 1,566 \frac{W}{mK} - \left(0,755 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,15m + 0,755 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,15 \right) = -0,172 \frac{W}{mK}$$

Für den innenmaßbezogenen Ψ_i -Wert erfolgt das Vorgehen analog. Aufgrund der Tabellenstruktur sind z.B. auch Deckenanschlüsse wie bei Wärmebrücke N5 mit zwei verschiedenen flankierenden 1D-Bauteilen einfach zu berechnen.

Schließlich wird noch der Temperaturfaktor f_{Rsi} durch Eingabe der verwendeten Randbedingungen sowie der von THERM berechneten niedrigsten Oberflächentemperatur ermittelt

Tabelle 9.3: Beispiel Berechnung Ψ - und f_{Rsi} -Wert Außenecke 1

Außenecke 1				
Eingabe				
Ausgabe				
Bauteile				
Wand1				
	Art	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
R_{si}				0,13
Material1	Weichholz	0,15	0,13	1,154
R_{se}				0,04
			R_{ges}	1,324 m ² K/W
			U	0,755 W/m ² K
			Außenmaß	
			l_e	1,15 m
			Innenmaß l_i	1 m
			$U \cdot l_e$	0,869 W/mK
			$U \cdot l_i$	0,755
Wand2				
	Art	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
R_{si}				0,13
Material1	Weichholz	0,15	0,13	1,154
R_{se}				0,04
			R_{ges}	1,324 m ² K/W
			U	0,755 W/m ² K

Außenmaß		
l_e	1,15	m
Innenmaß l_i	1	m
$U \cdot l_e$	0,869	W/mK
$U \cdot l_i$	0,755	

THERM		
Thermfaktor	0,681	W/m ² K
Thermlänge	2,3	m
L^{2D}	1,566	W/mK

Ψ-Wert		
Ψ_i	0,055	W/mK
Ψ_e	-0,172	W/mK

Temperaturfaktor mit $R_{si} = 0,25$			
Innentemperatur	20	°C	
Außentemperatur	-10	°C	
niedrigste Oberflächentemp.	10,5	°C	
f_{Rsi}	0,683	\geq	0,75

Dieser Temperaturfaktor wird abschließend mit einem Grenzwert verglichen, der aus folgender Überlegung resultiert.

Zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum an Bauteiloberflächen ist gemäß DIN 4108-2 i.V. mit DIN EN ISO 13788 eine minimale Oberflächentemperatur einzuhalten, welche durch einen Temperaturfaktor $f_{Rsi,min}$ ausgedrückt wird, einzuhalten („Schimmelpilzkriterium“).

Für die Randbedingungen nach DIN 4108-2 beträgt dieser 0,70. Hierbei wird angenommen, dass Schimmelpilzwachstum bereits dann eintritt, wenn die Oberflächenfeuchte über mehrere Tage mindestens 80% beträgt, d.h. noch bevor Tauwasser ausfällt.

Da jedoch die Außentemperatur mit -10°C anstatt mit -5°C gemäß Norm angesetzt wurde, ist der Temperaturfaktor nach DIN EN ISO 13788 zu bestimmen:

- $\theta_i = 20^\circ\text{C}$, $\varphi_i = 50\%$, $\varphi_{si} = 80\%$
- $\rightarrow p_s(20^\circ\text{C}) = 2340 \text{ Pa}$
- $\rightarrow 2340 \text{ Pa} \cdot 0,50 = 1170 \text{ Pa}$
- $\rightarrow p_{sat}(\theta_{si,min}) = 1170 \text{ Pa} / 0,80 = 1463 \text{ Pa} \rightarrow \cong p_{sat}(12,6^\circ\text{C})$
- $\theta_e = -10^\circ\text{C}$

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} = \frac{12,6 - (-10)}{20 - (-10)} = 0,75$$

Damit liegt ein Kriterium vor, oberhalb dessen Schimmelpilzwachstum aller Wahrscheinlichkeit nach vermieden werden kann.

9.6. Beurteilung

In folgender Tabelle sind die wichtigsten Ergebnisse aus dem Wärmebrückenkatalog zusammengestellt.

Bezeichnung	f_{Rsi}	Ψ_e
unsanierter Zustand		
Außenecke 1	0,68	-0,172
Außenecke 2	0,68	-0,175
Innenwandanschluss 3	0,81	-0,012
Innenwandanschluss 4	0,78	-0,016
Außenecke 5	0,68	-0,229
Außenecke 6	0,69	-0,159
N1	0,61	-0,388
N2	0,60	-0,366
N3	0,54	-0,310
N4	0,51	-0,260
N5	0,83	-0,003
N6	0,81	-0,003
N7	0,52	-0,264
O2	0,66	-0,364
O5	0,56	-0,100
O6	0,51	-0,294
O7	0,58	-0,058
saniertes Zustand		
Außenecke 1	0,84	-0,098
Außenecke 2	0,83	-0,095
Innenwandanschluss 3 EG	0,78	-0,134
Innenwandanschluss 3 OG	0,89	-0,053
Innenwandanschluss 4	0,88	-0,049
Außenecke 5 EG	0,83	-0,094
Außenecke 5 OG	0,83	-0,096
Außenecke 6 EG	0,71	-0,243
Außenecke 6 OG	0,83	-0,096
N1	0,79	-0,071
N1 Wohnzimmer	0,69	-0,185
N2	0,83	-0,082
N3	0,83	-0,085

N4	0,84	-0,087
N5	0,91	-0,071
N5 Wohnzimmer	0,79	-0,021
N6	0,90	-0,069
N7	0,83	-0,084
O1	0,81	-0,077
O2	0,92	-0,002
O5	0,91	-0,004
O6	0,84	-0,099
O7	0,84	-0,034

Eine Beurteilung der Wärmebrücken anhand der Ψ -Werte gestaltet sich schwierig, da dieser lediglich beschreibt, wie eine Wärmebrücke im Vergleich zum ungestörten Regelbauteil ausgebildet ist. Er besitzt also keine Aussagekraft über die Qualität der Gebäudehülle oder der jeweiligen Detailausbildung, da sich geringe Werte sowohl bei gut als auch schlecht gedämmten Konstruktionen einstellen können. Beispielsweise ergeben sich bei ungedämmten Regelquerschnitten wie im vorliegenden Fall vor der Sanierung so große Wärmeverluste, dass die Wärmebrücken energetisch betrachtet nicht wesentlich ins Gewicht fallen. Ebenso resultieren geringe Ψ -Werte dann, wenn an Wärmebrücken keine Dämmücken vorhanden sind und mit steigender Dämmschichtdicke sowohl die Wärmeverluste im ungestörten Querschnitt als auch im Bereich der Wärmebrücke sinken.

Dies erklärt die im Wärmebrückenkatalog vorhandenen geringen oder sogar negativen Ψ -Werte. Letztere resultieren im Einzelfall auch aus dem Außenmaßbezug der Berechnung (Ψ_e -Werte), wie er beispielsweise für die Weitergabe in PHPP nötig ist.

Hinsichtlich der Oberflächentemperaturen waren vor der Sanierung lediglich jene an den Innenwand- bzw. Deckenanschlüssen 3, N5 und N6 unkritisch. Durch die Sanierungsmaßnahmen konnten die Oberflächentemperaturen erheblich gesteigert werden. Lediglich am südöstlich gelegenen Außeneck 6 im Erdgeschoss sowie im Wohnzimmer im Bereich der Wärmebrücke N1 liegt der vorhandene Temperaturfaktor f_{Rsi} unter dem minimalen Temperaturfaktor $f_{Rsi,min}$ des Schimmelpilzkriteriums. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass aus Denkmalschutzgründen an der Außenwand im Bereich des früheren Wohnzimmers keine Wärmedämmung angebracht werden konnte und lediglich die als Außenwand betrachtete südliche Wand zum nachträglichen Anbau hin bzw. die Kellerdecke von außen gedämmt wurden.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang noch, dass die minimale Oberflächentemperatur der Wärmebrücke N5 im Wohnzimmer nach der Sanierung niedriger ist als vor der Sanierung. Wie anhand des Isothermenverlaufs ersichtlich wird, ist dies auf die zusätzliche geometrische Wärmebrücke nach der Sanierung durch die Innendämmung im darüber liegenden Geschoss zurückzuführen (s. Abbildung 9-11).

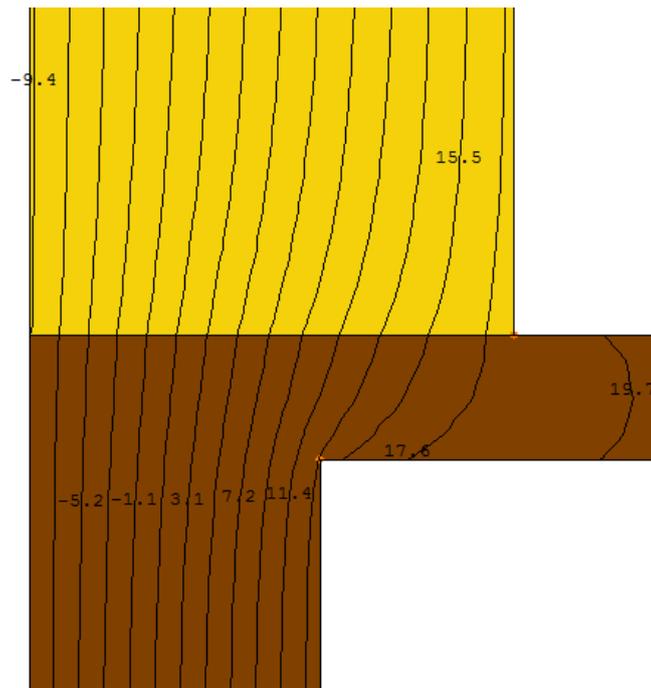


Abbildung 9-11: Wärmebrücke N5 im Bereich des ehemaligen Wohnzimmers

Der ermittelte Thermfaktor beträgt $1,415 \frac{W}{m^2K}$ bei einer Länge von 1,269m, woraus folgt

$$L_{2D} = 1,796 \frac{W}{mK}.$$

Der Ψ_{inst} -Wert ergibt sich damit bei Außenmaßbezug zu

$$\begin{aligned} \Psi_{inst} &= L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j = 1,796 \frac{W}{mK} - \left(0,755 \frac{W}{m^2K} \cdot 1m + 3,006 \frac{W}{m^2K} \cdot 0,045m + 4,403 \frac{W}{m^2K} \cdot 0,19m \right) \\ &= 0,068 \frac{W}{mK}. \end{aligned}$$

Für die Tür ergibt sich mit den Werten aus 8.2 bei analoger Vorgehensweise ein Wert von:

$$\Psi_{inst} = 0,0066 \frac{W}{mK}$$

Dieser Wert ist so gering, dass er nicht mit in die weitere Berechnung einbezogen wurde, zumal er nur für je eine Tür pro Geschoss zu den unbeheizten Räumen 0.5 und 1.5 relevant ist.

10. Innendämmungen

Aus Gründen des Denkmalschutzes kommen keine von außen auf die Fassaden aufgetragenen Dämmsysteme in Frage. Grundsätzlich ist denkbar, die vorhandenen Hinterlüftungen etwa zum Einblasen von Dämmstoffen zu nutzen, jedoch sind die vorgefundenen Abmessungen der Lufträume so gering, dass der Aufwand in keinerlei Verhältnis zum Nutzen steht und der Wärmestandard auch nach solchen Maßnahmen viel zu gering wäre. Lediglich Kellerdecke und Dachboden sind von außen dämmbar, was bei den bereits sehr geringen Raumhöhen im Bestand ohnehin kaum anders zu realisieren wäre.

Daher ist hier für die Dämmung der Wände im Zuge der Energieeinsparung und Behaglichkeitssteigerung für die Nutzer auf Innendämmsysteme zurückzugreifen.

Der Einsatz solcher Innendämmsysteme bringt jedoch eine Reihe möglicher Problemstellungen mit sich, derer man sich bewusst sein sollte und die daher im Folgenden behandelt werden.

Zum einen wird die Temperatur im Bestandswandquerschnitt durch Aufbringen innenseitiger Dämmungen erheblich reduziert. Bei Beurteilung solcher Konstruktionen durch das in den vergangenen Jahrzehnten gängige und auch in der aktuellen Normung noch zitierte Glaser-Verfahren kommt es bei Innendämmungen fast immer zu einer unzulässigen Feuchteanreicherung [22], weshalb verschiedenartige Dampfbremsen entwickelt und angewandt wurden.

Neben erheblichen Problemen in der konstruktiv fachgerechten Ausführung besonders im Bereich von Bauteilanschlüssen, -durchdringungen und bei thermisch oder hygrysch bedingten Bauteilverformungen, bestand hier lange der Nachteil, dass solche Dampfbremsen neben der Aufnahme von Feuchte raumseits auch die Austrocknung von außen eingedrungener Feuchte (bspw. durch Schlagregenbelastung) nach innen verhinderten, was zu hohen Feuchtelasten und Bauschäden führen konnte. Erst in den letzten Jahren sind auf dem Markt feuchteadaptive Dampfbremsen verfügbar, deren Diffusionswiderstand je nach Feuchtelast im Bauteil variiert und so auch ein Austrocknen über Dampfdiffusion in den Innenraum ermöglicht wird. Die Problematik des fehleranfälligen und aufwendigen Einbaus ist jedoch nach wie vor ungelöst.

Einen ersten Überblick möglicher, genormter Dämmstoffe für die Innendämmung kann DIN 4108-10 entnommen werden. Es dürfen dabei nur Wärmedämmungen mit dem Kurzzeichen „WI“ (Innendämmung der Wand) verwendet werden:

- Mineralwolle (MW)
- Polystyrol-Hartschaum (EPS)
- Polystyrol-Extruderschaum (XPS)
- Polyurethan-Hartschaum (PUR)
- Schaumglas (CG)
- Holzwolle-Platten (WW)
- Holzwolle-Mehrschichtplatten (WW-C)
- expandiertes Perlite (EPB)
- expandierter Kork (ICB)
- Holzfasern (WF)

Weitere nicht genormte Dämmstoffe, dürfen gemäß ihrer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) bzw. europäischen technischen Zulassung (ETA) verwendet werden. Beispiele hierfür sind nach [23]:

- Mineraldämmplatten
- Perlite-Dämmplatten
- Vakuumisulationspaneele
- Zellulose
- Calcium-Silikat-Platten
- pyrogene Kieselsäure, Aergole
- Dämmputze
- Bausteine mit Dämmstofffüllung

Je nach Systemaufbau sind darüber hinaus bestimmte Kleber oder mechanische Befestigungselemente erforderlich, die der jeweiligen Zulassung zu entnehmen sind. Zur kapillaren Ankopplung können darüber hinaus Hinterfüllungen wie mineralische Mörtel, schüttfähige Dämmstoffe oder auch Lehmprodukte erforderlich sein.

Eine Reihe von Beispielkonstruktionen für die Innendämmung von Fachwerkwänden durch Putze, Mörtel, Vorsatzschalen mit Dämmstoff sowie Dämmplatten befindet sich im WTA-Merkblatt 8-5 [24]. , Diese können unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten auch auf andere Konstruktionen übertragen werden.

10.1. Außendämmung vs. Innendämmung

Innengedämmte Konstruktionen sind ohne entsprechende Maßnahmen (keilförmige Dämmschichten im Eck- und Randbereich etc.) in der Regel im Vergleich zu außengedämmten Konstruktionen verstärkt von Wärmebrücken betroffen, d.h. der Wärmedurchgang wird durch das stärkere Auftreten von Wärmebrücken nicht in dem Maße reduziert wie bei Außendämmungen. [7], [25]

Zudem geht durch die raumseitigen Konstruktionen Wohnfläche verloren und die sommerliche Aufheizung ist vor allem aufgrund des Wärmeeintrages durch transparente Bauflächen größer als bei Außendämmungen, da die innenseitige Wärmespeicherkapazität bis zur Dämmebene sehr begrenzt ist.

Im Winterfall schließlich kommt es aufgrund der vorliegenden Temperaturen zu einem Dampfstrom von innen nach außen in die Wand hinein, wobei der Dampfgradient mit dem Temperaturgradienten steigt. Da dieser bei Innendämmungen an der raumseitigen Schicht sehr groß ist, kommt es aufgrund des starken Druckabfalls zu entsprechenden Dampfströmen, die bei Erreichen der Taupunkttemperatur Tauwasserausfall zur Folge haben (Abbildung 10-1).

Bei Außendämmungen hingegen verläuft der Temperaturgradient auf der Raumseite weniger steil, so dass das Temperaturniveau in der tragenden Konstruktion höher ist. Aus dem sich einstellenden Dampfdruckprofil folgt ein wesentlich geringerer Dampfstrom, welchem zudem nahezu das gesamte Bauteil als Widerstand bis zu den tieferen Temperaturen entgegensteht.

Daher wird dem Problem des einströmenden Wasserdampfes in die Wand hinein wie bereits geschildert häufig mit der Abdichtung der Konstruktion gegen eindringenden Dampfstrom von innen durch Verwendung diffusionsdichter Materialien wie Dämmplatten aus Polystyrol oder Anbringung von

Dampfbremsen begegnet. Problem hierbei ist wie zuvor erwähnt die fehlende Möglichkeit einer Feuchteabgabe nach innen und somit einer Austrocknung der Konstruktion. Außerdem ist der Einbau von Dampfbremsen fehleranfällig und bereits kleinste Beschädigungen (z.B. durch Nägel) können Schäden der Konstruktion nach sich ziehen, da es im Bereich der Beschädigung zu lokal sehr hohen Feuchtebelastungen kommt, weil der übrige Bereich nach wie vor dampfdicht ist. Des Weiteren wird die Dauerhaftigkeit von Dampfbremsen und deren Verbindungen nach wie vor lebhaft diskutiert [26],[27].

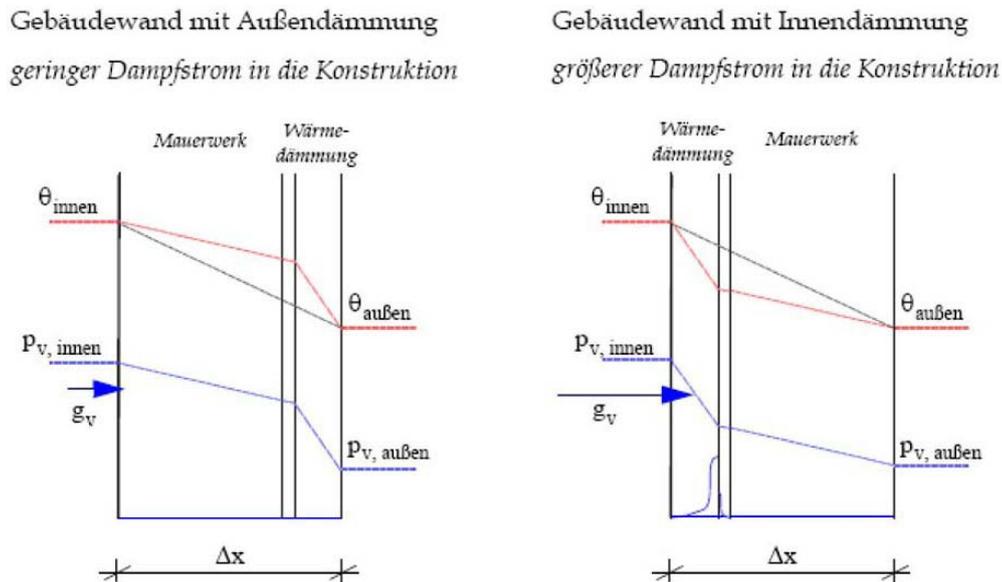


Abbildung 10-1: Temperatur- und Dampfstromverlauf einer außen und einer innen gedämmte Konstruktion; aus [27]

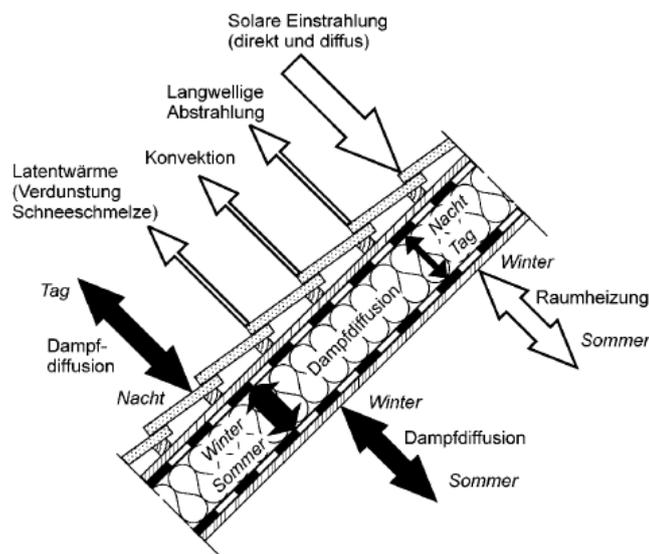


Abbildung 10-2: wärme- und feuchtetechnische Einwirkungen am Beispiel eines Steildaches; aus [28]

Eine Alternative bietet die Verwendung kapillarleitfähiger Dämmsysteme. Auch hier kann es zwar lokal zu Tauwasserausfall kommen, jedoch wird die Feuchte aufgrund der Materialeigenschaften schnell umverteilt, zwischengespeichert und kann bei entsprechenden klimatischen Randbedingungen wieder an die Oberfläche transportiert und dort abgegeben werden. Solche Phänomene sind mit dem Glaser-

Verfahren und seinen stationären Randbedingungen aufgrund mangelhafter Berücksichtigung des Flüssigwassertransportes nicht abbildbar, weshalb zur Beurteilung hygrisch-thermische Simulationen mit instationären Klimaverhältnissen das Mittel der Wahl sind.

10.2. Befeuchtungsrisiko durch Dampfkonnektion

Eine der wichtigsten Maßnahmen bei Innendämmungen ist die Vermeidung der Hinterströmung der Dämmkonstruktion durch feuchtwarme Raumluft, da hierdurch weit mehr Feuchte als etwa durch Dampfdiffusion in die Konstruktion gelangen kann. [22], [7]

Hohlräume hinter Innendämmungen entstehen, wenn steife Dämmplatten punktuell angebracht werden (Abbildung 10-3) oder Dämmplatten auf sowie Vorsatzschalen vor unebenen Wänden montiert werden. [22]

Strömt nun Raumluft aufgrund von Undichtigkeiten etwa in den Anschlussbereichen in diese kühlen Hohlräume, so kühlt sie ihrerseits ab und wird schwerer. Durch Leckagen (Steckdosen, Fußleisten etc.) tritt sie wieder in den Raum ein und sorgt so für einen Kreislauf von oberhalb einströmender, warmer Luft und unterhalb ausströmender kalter Luft (s. Abbildung 10-4). Dies sorgt dafür, dass Wärmeenergie an die kühle Außenwand abgegeben wird. Problematischer ist jedoch, dass die kalte Luft aufgrund des relativ raschen Abkühlens schnell übersättigt und sich somit Tauwasser in den Hohlräumen niederschlagen kann.



Abbildung 10-3: Schimmelpilzbildung hinter einer punktuell verklebten Gipskartonplatte mit Polystyrolkaschierung, aus: [25]

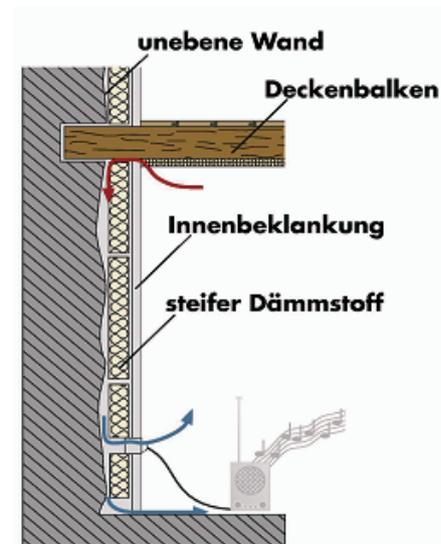


Abbildung 10-4: Hinterströmung von Hohlräumen hinter Innendämmungen; aus [22]

In diesem Zusammenhang ist noch ein weiteres Detail problematisch. Da im Bestand die Gebäudehülle oftmals erhebliche Undichtigkeiten aufweist, besteht die Gefahr der Durchströmung der Wand. Hier resultieren besonders bei einbindenden Holzbalken im Deckenbereich schwere Bauschäden durch biologischen Zerfall der Balkenköpfe. In dieser Hinsicht scheint die vorliegende Strickbaukonstruktion gutmütiger, da keine Holzbalken- sondern eine Holzbohlendecke vorliegt, bei der die Bohlen über ein Nut-Feder-System in den Wänden befestigt wurden. [29]

Während im Bestand aufgrund kurzer Strömungswege und höherer Wandtemperaturen in der Regel keine Feuchteschäden vorhanden sind, wird durch eine Innendämmung der Strömungsweg feuchtwarmer Raumluft nach außen verlängert, wodurch die Verweildauer in der Konstruktion erhöht wird. Durch die reduzierte Wandtemperatur kann hier schnell der Taupunkt der durchströmenden Luft erreicht werden, so dass es zu Tauwasserausfall in diesen kritischen Bereichen kommen kann.

Hier hilft nur eine fachgerechte Ausbildung der luftdichten Ebene, vor allem in den Anschlussbereichen.

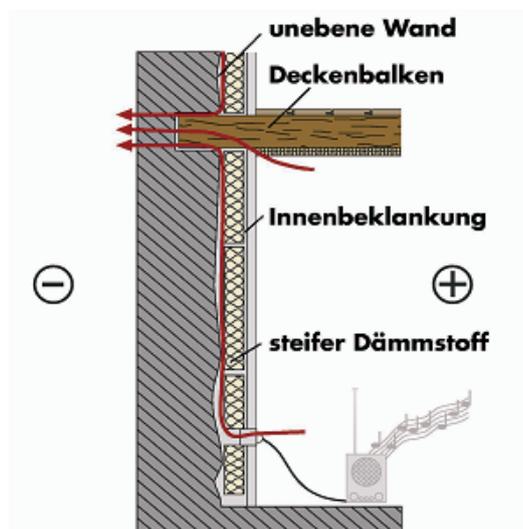


Abbildung 10-5: Durchströmungspfade einer innengedämmten Wand, aus [22]

10.3. Dampfbremsen

Dampfbremsen dienen also wie erwähnt der Verringerung der Dampfdiffusion in bzw. durch Bauteile, wobei der s_d -Wert auf die jeweilige Konstruktion abgestimmt werden muss. Die klassische Dampfbremse ist in Folienform erhältlich, jedoch besitzen etwa auch verschiedene Holzwerkstoffplatten eine dampfbremsende Wirkung. [7]

Nach [28] haben Untersuchungen an modernen Holzbauten aus den USA gezeigt, dass für Dampfsperren mit s_d -Werten über 100m die konvektionsbedingten Feuchteinträge trotz sorgfältiger Ausführung so groß sind, dass so viel Feuchte in das Bauteil gelangt als wenn nur eine Dampfbremse mit $s_d = 3m$ vorliegen würde. Somit bieten Dampfbremsen mit hohen s_d -Werten im Winterfall keinen wesentlichen Vorteil hinsichtlich des Feuchteintrages, behindern die sommerliche Austrocknung aber stark, so dass eine moderate Dampfbremse mit s_d -Werten von 2 bis 5m sinnvoller sei. Diese Überlegung führte zur Entwicklung feuchteadaptiver Dampfbremsen.

Diese sind hinsichtlich ihres Diffusionswiderstandes variabel und besitzen bei höheren Feuchten einen sehr viel niedrigeren als bei geringeren (s. Abbildung 10-6). Da z.B. im Winter eine niedrigere relative Luftfeuchte als im Sommer vorliegt, wandert der Feuchtehorizont im Bauteil nach außen und im Bereich der Dampfbremse sinkt der Feuchtegehalt deutlich ab. Um das Eindiffundieren weiterer Feuchte von innen in die Konstruktion hinein zu unterbinden, ist ein relativ hoher Diffusionswiderstand nötig. Wandert Feuchte dagegen nach innen (Schlagregen, Sommerlastfall mit Dampfdruckgefälle von außen nach innen), steigen die Feuchtegehalte im Bereich der Dampfbremse stark an. Bei solchen Randbedingungen zeigt die feuchtevariable Dampfbremse einen deutlich reduzierten Diffusionswiderstand und die Feuchte kann an die Raumluft abgegeben werden.

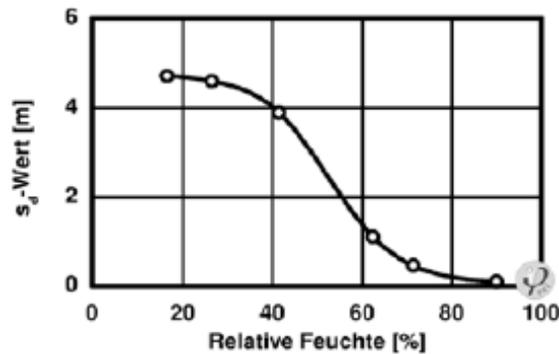


Abbildung 10-6: Verlauf Diffusionswiderstand einer feuchteadaptiven Dampfbremse in Abhängigkeit von der relativen Feuchte; aus [7]

Deutlich wird dieses Verhalten anhand Abbildung 10-7. Während bei der Dampfsperre unverkennbar die Auswirkung sommerlicher Umkehrdiffusion (Dampfdruckgefälle von außen nach innen) beobachtet werden kann und dies auch bei einer moderaten Dampfbremse noch der Fall ist, zeigt die feuchtevariable Dampfbremse ein viel günstigeres Verhalten. Für die Winterperiode sind dagegen keine wesentlichen Vorteile hoher s_d -Werte erkennbar. Besonders relevant werden solche Dampfbremsen dort, wo Tauwasser- und Schlagregenschutzanforderungen gegenläufig sind (z.B. bei Fachwerk), d.h. aufgrund eines starken Feuchteintrages von außen muss eine Austrocknung zu beiden Seiten der Konstruktion möglich sein, im Rahmen des Tauwasserschutzes ist aber eine möglichst dichte Ebene auf der Raumseite anzustreben.

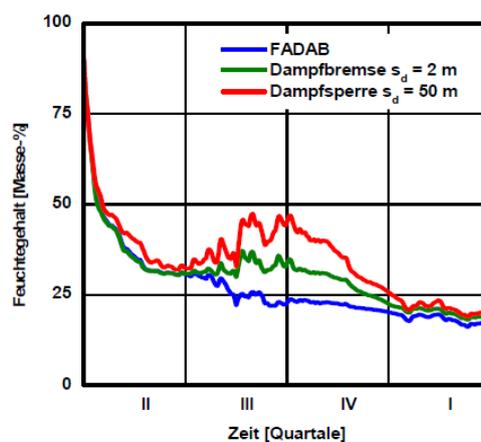


Abbildung 10-7: Feuchtegehalt an der Innenseite eines Fachwerkgriegels mit feuchteadaptiver Dampfbremse, einer herkömmlichen Dampfbremse und einer Dampfsperre; aus [30]

Im Widerspruch hierzu stehen diverse Aussagen nach [7], wonach zu beachten sei, dass feuchteadaptiven Dampfbremsen nicht die Diffusionsdichtheit herkömmlicher Dampfbremsen erreichen und daher für diffusionsdichte Innendämmaufbauten nur bei genauer Überprüfung zu verwenden seien. Hier bestehe die Gefahr übermäßiger Feuchteeinlagerung während der Heizperiode, welche auch durch das verbesserte Austrocknungsverhalten im Sommer ausgeglichen werden könne, weshalb explizit Dampfsperren mit $s_d > 100\text{m}$ empfohlen werden.

10.4. Kapillaraktive Innendämmsysteme

Aus den bereits dargelegten Gründen kann die Verwendung dampfsperrender Systeme, besonders auch im Bereich einbindender Deckenbalken oder von Zwischenwandanschlüssen, problematisch sein. Hinzu kommt, dass historische Konstruktionen häufig darauf ausgelegt sind, dass eine Austrocknung sowohl nach außen als auch nach innen erfolgen kann (etwa nach Schlagregenbelastung bei mangelndem Schlagregenschutz).

Hier bieten eine kapillaraktive und diffusionsoffene Konstruktion erhebliche Vorteile, da sie eine Austrocknung nicht behindert. Dies ist besonders auch dann von Bedeutung, wenn im Bestand teilweise Durchfeuchtungen vorhanden sind, die so langfristig abgetrocknet werden können.

Neben der Umverteilung und Speicherung von Flüssigwasser ermöglichen diffusionsoffene Konstruktionen durch ihre feuchtepuffernde Wirkung auch die Abfederung von Feuchtelastspitzen (Abbildung 10-8).

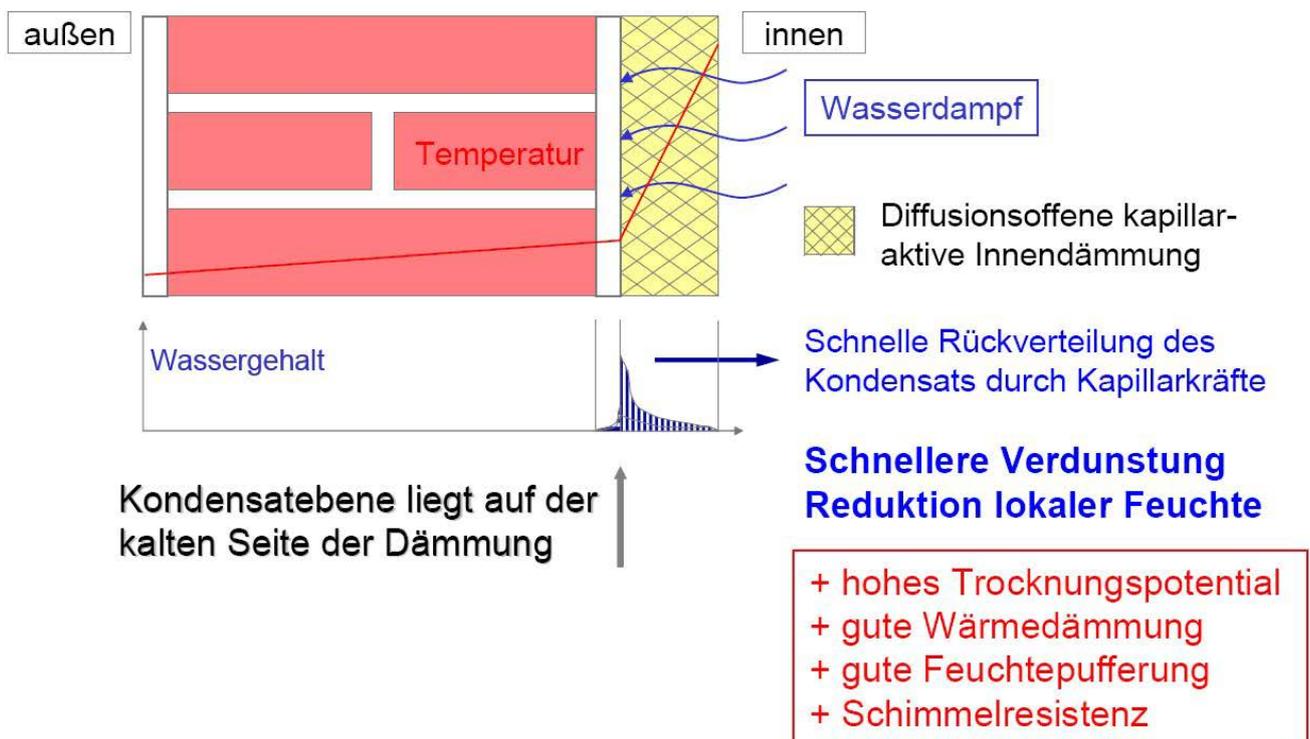


Abbildung 10-8: Wirkprinzip kapillaraktive Innendämmung; aus [27]

Innerhalb solcher Dämmungen herrscht ein Gleichgewichtszustand, bei dem die Menge der eindiffundierenden Feuchte etwa der Menge der zurückgeleiteten Feuchte entspricht. Hierbei setzt auch schon

bevor Tauwasser ausfällt in Form der Oberflächendiffusion ein Kapillartransport entgegen dem Dampfdruckgefälle ein. [31]

Die Wasserdampfsorptionsfähigkeit führt außerdem dazu, dass Feuchte während der Heizperiode gespeichert wird und eine Austrocknung nach außen (Sommer) möglich ist. [32]

Ein wesentliches, prinzipielles Problem der Innendämmung wird jedoch auch hier nicht gelöst. Die Temperatur in der alten Bestandskonstruktion wird herabgesetzt und besitzt somit bei unveränderten Randbedingungen eine erhöhte Luftfeuchte und ist je nach Material anfällig für Frostschäden. Diese erhöhte Luftfeuchte ist einer der Gründe, warum bei Innendämmungen besonders auf einen ausreichenden Schutz vor Feuchteeintrag, z.B. durch Schlagregen, zu achten ist.

Außerdem befindet sich die potentielle Kondensatebene zwischen Innendämmung und Bestandswand, was eine sorgfältige Abstimmung der Materialien hinsichtlich Feuchtepufferung sowie Dampf- und Flüssigtransport erforderlich macht.

Hinsichtlich der Sensibilität kapillaraktiver Innendämmungen bezüglich der vollflächigen kapillaren Anbindung deuten Untersuchungen darauf hin, dass durch Fehlstellen die Wirkung nicht wesentlich beeinflusst wird. In einigen Versuchen wurden zur Unterbrechung der Ankopplung Drahtgitter zwischen Innendämmung und Bestandskonstruktion verbaut und keine wesentlichen Unterschiede festgestellt (s. Abbildung 10-9 und Abbildung 10-10). Dies ist besonders bei Gebäuden wie dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten von Bedeutung, da durch hygriischbedingte Formänderungen des Holzes eine gleichmäßige Anbindung nicht überall angenommen werden kann. [31]

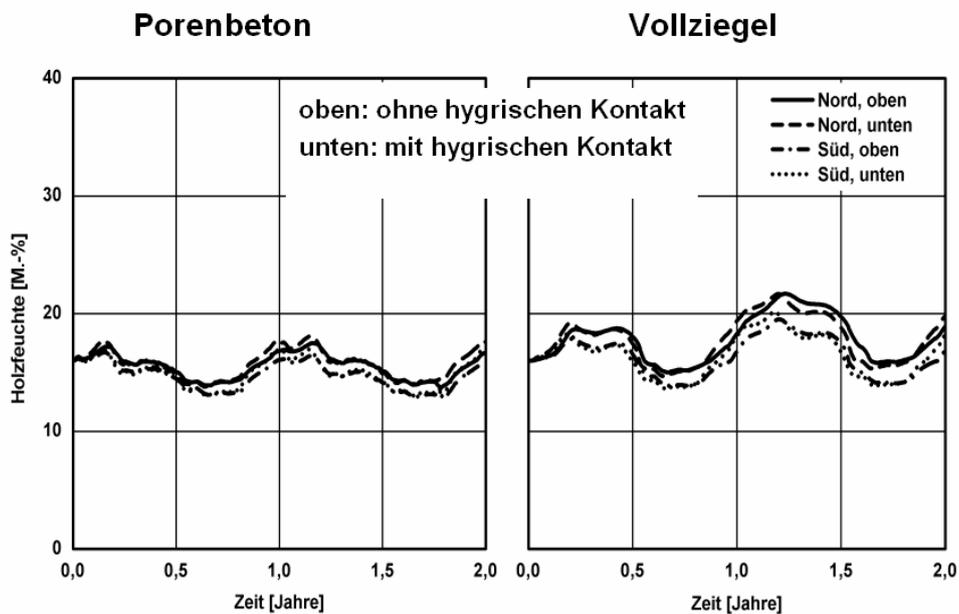


Abbildung 10-9: Entkopplung durch Drahtgeflecht; aus [30]

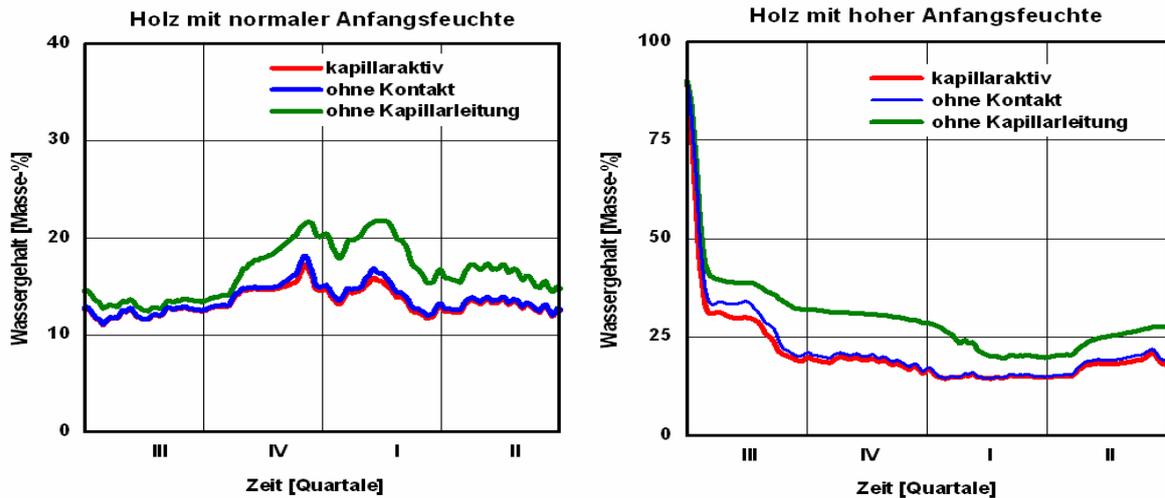


Abbildung 10-10: Wassergehalte mit und ohne hygrischen Kontakt sowie mit (rechnerisch) ausgeschalteter Kapillarleitung; aus [30]

Diesen Gedanken greift auch [33] auf, kommt aber zu dem Ergebnis, dass eine Feuchterückleitung durch kapillare Wirkung nicht als sicher einkalkuliert werden sollte. Bestenfalls seien kapillaraktive Dämmstoffe als zusätzliche Maßnahme des Feuchteschutzes in Verbindung mit entsprechend hohen Diffusionswiderständen innen, z.B. durch Anbringung von Dampfbremsen, zu verwenden. Auch die Verwendung von Lehmputz als „Koppelschicht“ sieht er kritisch, da die dauerhafte Funktionsfähigkeit noch nicht nachgewiesen sei.

Beispiele für solche kapillaraktiven, diffusionsoffenen Innendämmsysteme sind Holzfaserplatten, Calcium-Silikat-Platten oder auch Leichtlehmplatten.

11. Energetische Bewertung mit PHPP

11.1. PHPP

Die Ermittlung der Energiebedarfe erfolgte mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) des Passivhaus-Institutes Darmstadt in der Version von 2007.

Bei PHPP handelt es sich um eine Tabellenkalkulations-Arbeitsmappe für Microsoft Excel, die ursprünglich für die Planung von Passivhäusern entwickelt wurde, aber auch wie im vorliegenden Fall für die Bewertung von Bestandsgebäuden und energetischen Ertüchtigungen zum Einsatz kommt. Die Berechnung erfolgt dabei rein stationär.

Die Arbeitsmappe enthält Tabellenblätter für die Eingabe geometrischer, klimatischer und technischer Randbedingungen sowie für die Projektierung von Fenstern, Lüftung, Heizung und Warmwasser.

Grundsätzlich ist eine Berechnung sowohl nach dem Jahres- als auch nach dem Monatsbilanzverfahren durchführbar. Da das Jahresbilanzverfahren jedoch seit Einführung der EnEV 2009 nicht mehr mit dieser konform ist, wird die Bilanzierung nach letzterem gemäß DIN EN ISO 13790 in Verbindung mit DIN V 4108-6 durchgeführt. Hierbei werden die monatlichen Wärmeverluste und –gewinne unter Berücksichtigung des möglichen monatlichen Ausnutzungsgrades, welcher die nutzbaren solaren und internen Wärmegewinne in Abhängigkeit der Gebäudebauweise berücksichtigt, bilanziert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die haustechnischen Komponenten außer Acht gelassen. Im Ist-Zustand ist zur Beheizung lediglich der Kachelofen im Wohnzimmer vorhanden, Warmwassererwärmung erfolgt über Elektro-Boiler dezentral. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde daher sowohl vor als auch nach der Sanierung nur der spezifische Heizwärmebedarf ermittelt.

11.2. Geometrische Randbedingungen

11.2.1. Wände und Decken

Die geometrischen Eingaben erfolgten auf Grundlage der Angaben im PHPP-Handbuch. Hinsichtlich der Flächenermittlung sind die Außenmaße der thermischen Hülle zu verwenden. Verkleidungen („cladding elements“) sollen hierbei als nicht zur thermischen Hülle gehörig betrachtet werden.

Was die „Treated Floor Area (TFA)“ (Wohnfläche) anbelangt, sollen die Angaben der Wohnflächenverordnung (WoflV) zu berücksichtigen, wonach

- der Kachelofen Teil der Wohnfläche ist (§3(2)),
- die Eckbank Teil der Wohnfläche ist (§3(2)),
- Türnischen nicht Teil der Wohnfläche (§3(3))

sind.

Bezüglich der Raumhöhe ist bei Räumen kleiner als 2,00m lichter Höhe nach WoflV grundsätzlich eine Abminderung vorzunehmen, welche jedoch im vorliegenden Fall nicht berücksichtigt wird. Durch die Innendämmung reduziert sich die Fläche innerhalb der thermischen Hülle dementsprechend um die Dicke der Vorsatzschalen.

Da im Rahmen der Luftdichtheitsprüfung nur Daten für die einzelnen betrachteten Räumen sowie für die Kombinationen Räume 0.2&0.3 und Räume 1.2&1.3 vorliegen, wurden in PHPP die Geschosse se-

parat bilanziert, da die Luftdichtheit im vorliegenden Fall einer der Kennwerte mit dem größten Einfluss auf den Heizwärmebedarf darstellt.

Es ergeben sich also folgende Flächen für die TFA:

Tabelle 11.1: alle berücksichtigten TFA

Raum	lichte Maße [m]	TFA [m ²]
unsaniertes Zustand		
0.2	4,03x3,76	15,15
0.3	2,46x3,76	9,25
0.2&0.3	-	24,40
1.2	3,53x3,76	13,27
1.3	2,96x3,76	11,13
1.2&1.3	-	24,40
saniertes Zustand		
0.2	4,03x3,66	14,75
0.3	2,36x3,56	8,40
0.2&0.3	-	23,15
1.2	3,43x3,56	12,21
1.3	2,86x3,56	10,18
1.2&1.3	-	22,39

Für die Außenwände hat die Berechnung etwas detaillierter zu erfolgen, da Erdgeschoss und Obergeschoss aus dargelegten Gründen getrennt betrachtet werden.

Mit einer lichten Raumhöhe von 1,96m im Erdgeschoss, einer Fußbodenstärke von 65mm und der halben Deckenstärke ergibt sich für die betrachteten Außenwandabschnitte vor der Sanierung:

- Außenwand Ost/West
 - o Breite $b = 4,03\text{m} + 2,46\text{m} + 0,15\text{m} + 0,13\text{m} + 0,15\text{m} = 6,92\text{m}$
 - o Höhe $h = 0,065\text{m} + 1,96\text{m} + \frac{0,065\text{m}}{2} = 2,06\text{m}$
- Außenwand Nord/Süd
 - o Breite $b = 3,76\text{m} + 0,15\text{m} + 0,13\text{m} = 4,04\text{m}$
 - o Höhe $h = 2,06\text{m}$

Für das Obergeschoss beträgt die lichte Raumhöhe 1,85m und die Deckenstärke 40mm, womit folgt:

- Außenwand Ost/West
 - o Breite $b = 6,92\text{m}$
 - o Höhe $h = 0,04\text{m} + 1,96\text{m} + \frac{0,065\text{m}}{2} = 1,92\text{m}$

- Außenwand Nord/Süd
 - o Breite $b = 4,04\text{m}$
 - o Höhe $h = 1,92\text{m}$

Zu der getrennten Betrachtung von Erd- und Obergeschoss kommt nach der Sanierung noch die Berücksichtigung gedämmter und ungedämmter Bereiche der Außenwände hinzu. Zu beachten ist, dass sich durch das Anbringen der Außendämmung an der Südwand sowie an Kellerdecke und auf dem Dachboden die thermische Hülle vergrößert.

- Erdgeschoss
 - o Außenwand Ost, ungedämmter Bereich
 - Breite $b = 4,03\text{m} + 0,15\text{m} + 0,10\text{m} + 0,13\text{m} = 4,41\text{m}$
 - Höhe $h = 0,10\text{m} + 0,065\text{m} + 1,96\text{m} + \frac{0,065\text{m}}{2} = 2,16\text{m}$
 - o Außenwand Ost, gedämmter Bereich
 - Breite $b = 2,46\text{m} + 0,15\text{m} = 2,61\text{m}$
 - Höhe $h = 2,16\text{m}$
 - o Außenwand Nord/Süd
 - Breite $b = 4,04\text{m}$
 - Höhe $h = 2,16\text{m}$
 - o Außenwand West
 - Breite $b = 6,92\text{m} + 0,10\text{m} = 7,02\text{m}$
 - Höhe $h = 2,16\text{m}$
 - Fläche hinter Kachelofen (ungedämmt): $1,50\text{m} \cdot 1,50\text{m} = 2,25\text{m}^2$
- Obergeschoss
 - o Außenwand Ost/West
 - Breite $b = 6,92\text{m}$
 - Höhe $h = 0,10\text{m} + 0,04\text{m} + 1,85\text{m} + \frac{0,065\text{m}}{2} = 2,02\text{m}$
 - o Außenwand Nord/Süd
 - Breite $b = 4,04\text{m}$
 - Höhe $h = 2,02\text{m}$

Da im Dachgeschoss die Dämmebene durch die aufgehenden Wände der Firstkammer (Raum 2.2) unterbrochen wird, ist diese Fläche vom Obergeschoss aus gesehen als ungedämmt zu betrachten. Sie beträgt bei einer Wandstärke von rund 10cm:

$$F = 0,1\text{m} \cdot 3,91\text{m} + 0,1\text{m} \cdot 3,08\text{m} = 1,09\text{m}^2$$

11.2.2. Wärmebrücken

Die Mehrzahl der anzusetzenden Wärmebrückenlängen ergibt sich aus den bereits dargestellten Breiten und Höhen der Außenwände bzw. für die Wärmebrücken an Innenanschlüssen aus den lichten Maßen. Es ist darauf zu achten, dass aufgrund der geschossweisen Betrachtung Wärmebrücken nicht doppelt berücksichtigt werden.

Bei einigen Fällen ist jedoch eine gesonderte Betrachtung erforderlich. Da an der Westwand des betrachteten Gebäudeabschnittes nur ein Teil unterkellert ist, kommen entlang der Wand zwei Wärmebrückenfälle mit unterschiedlichen Längen vor (N1 mit 2,52m und N2 mit 4,40m).

Die bereits geschilderte Durchdringung der Wärmedämmebene durch die Wände des Raumes 2.2 verursacht weitere Wärmebrücken der Längen $2 \cdot 3,91m = 7,82m$ sowie $3,08m + 2 \cdot 0,10m = 3,28m$ (Außenmaßbezug).

11.3. Klimatische Randbedingungen

Es wurden die mit METEONORM für PHPP generierten Klimadaten für den Standort Teufen verwendet. Teufen befindet sich etwa 11km Luftlinie vom untersuchten Objekt entfernt. Entsprechend dem Monatsbilanzverfahren handelt es sich bei den Daten um Monatsmittelwerte eines rechnerisch ermittelten Referenzjahres. Hierbei wurden für die Strahlungswerte die Jahre 1981 bis 2000, für die übrigen Werte die Jahre 1961-1990 herangezogen. Die Kennwerte sind in Abbildung 11-1 bis Abbildung 11-4 dargestellt. In PHPP selbst werden jedoch nur Lufttemperatur, Taupunkt, Himmelstemperatur sowie Strahlung nach Himmelsrichtung in die Bilanzierung mit einbezogen (s. Abbildung 11-5).

Für das Innenklima wurden keine Änderungen vorgenommen und der Standardwert in PHPP von 20°C beibehalten.



Abbildung 11-1: Bandbreite Monatstemperaturen mit Monatsmittelwerten

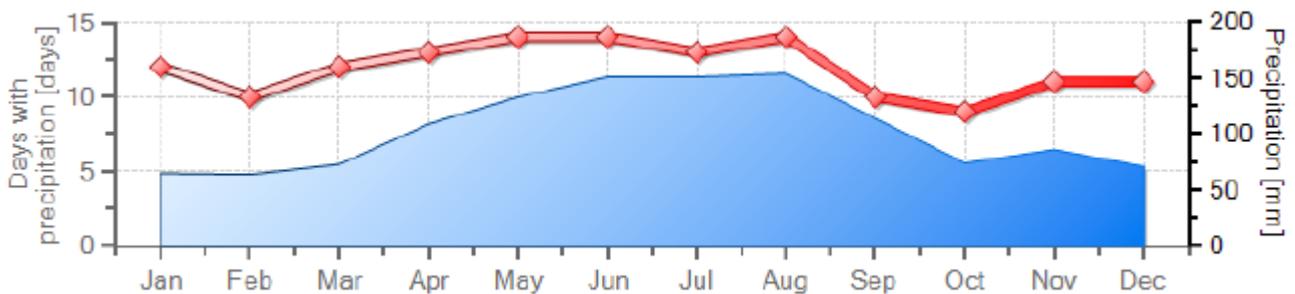


Abbildung 11-2: monatliche Niederschlagsmenge und Tage mit Niederschlag pro Monat

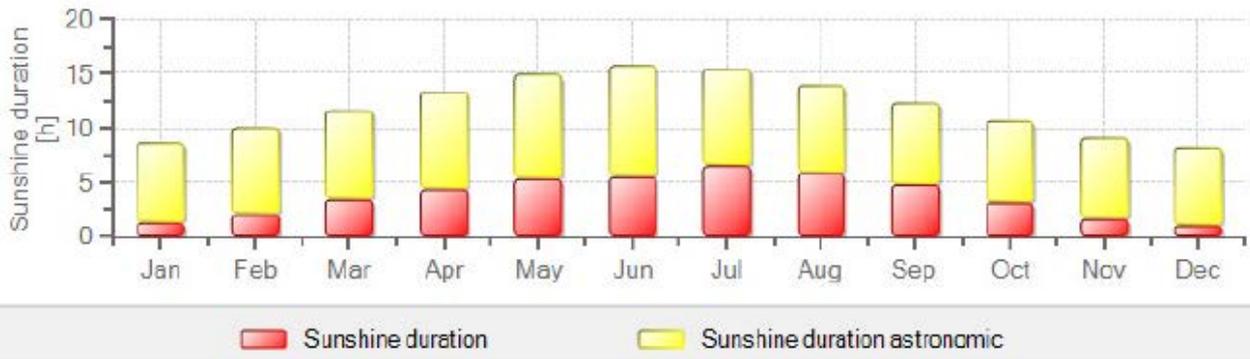


Abbildung 11-3: monatliche Sonnenscheindauer



Abbildung 11-4: monatliche Einstrahlung durch diffuse und direkte Strahlung

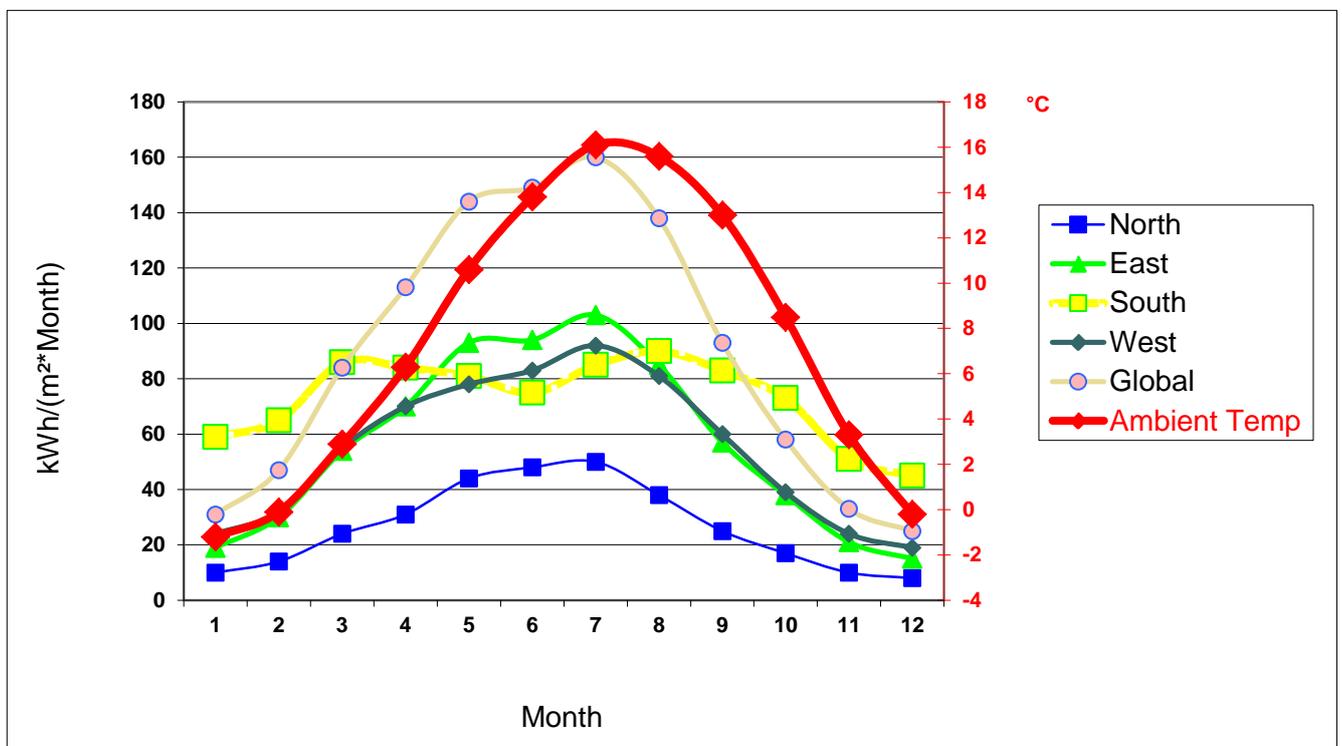


Abbildung 11-5: Jahrgang Monatsmitteltemperatur und Strahlung

11.4. sonstige Randbedingungen

Die Decke zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss wurde als „Partition Wall to Neighbour“ deklariert über die keine Wärmeverluste stattfindet.

Im Tabellenblatt „Ventilation“ wurden die empfohlenen Standardwerte verwendet. Außerdem erfolgte hier die Eingabe der Ergebnisse der Luftdichtheitsprüfungen.

Bezüglich der Verschattung wurden das südöstlich gelegene Nachbargebäude sowie die Fensterlaibungen im Tabellenblatt „Shading“ berücksichtigt.

Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes und des Risikos der Überhitzung (Temperaturen über 25°C) erfolgten noch die nötigen Eingaben in den Tabellenblättern „Summer“ (leichte Bauweise mit einer spezifischen Wärmespeicherkapazität von 60 Wh/K pro m² TFA) und „Summer Ventilation“ (Kühlung durch Fensterlüftung).

Ansonsten sind keine sinnvollen Angaben mehr möglich, da sie die weder vorhandene noch geplante Haustechnik betreffen.

11.5. Ergebnisse

Wie Tabelle 11.2 zu entnehmen ist, konnte der auf die TFA bezogene Heizwärmebedarf pro Jahr durch die Sanierung im Erdgeschoss etwa um die Hälfte, im Obergeschoss etwa um zwei Drittel reduziert werden.

Tabelle 11.2: wichtigste Ergebnisse PHPP

Geschoß	spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m ² a]	n ₅₀ [h ⁻¹]	Verbesserung [%]
unsaniertes Zustand			
EG	528	30,1	-
OG	621	28,3	-
saniertes Zustand			
EG	244	14,5	54
OG	233	9,1	62
ohne Verbesserung der Luftdichtheit (hypothetisch)			
EG	356	30,1	33
OG	364	28,3	31
Luftdichtheitsniveau nach EnEV '09 (hypothetisch)			
EG unsaniert	342	3,0	-
EG saniert	162	3,0	53
OG unsaniert	461	3,0	-
OG saniert	191	3,0	59

Mit der einflussreichste Parameter ist hierbei die Verbesserung der Luftdichtheit. Lässt man die Luftdurchlässigkeit bei der Bilanzierung hinsichtlich des Zustandes vor der Sanierung unverändert, liegt nur eine Verbesserung von 33% im EG und 31% im OG vor.

Unter Annahme eines Standards der Gebäudehülle hinsichtlich der Luftdichtheit nach EnEV '09 von $n_{50}=3,0 \text{ h}^{-1}$ würden die reinen Wärmedämmmaßnahmen eine Verbesserung von knapp 53% im EG und 59% im OG erbringen. Dass die Heizwärmebedarfe hier im EG niedriger sind als im OG ist im Wesentlichen auf die geringere Deckenstärke, verbunden mit höheren Wärmeverlusten, zurückzuführen. Außerdem sind im EG Winterfenster vorgeplant, welche die solaren Wärmegewinne zwar etwas abmindern (g-Wert 10% niedriger), sich insgesamt aber beim vorliegenden Klima durch die Verminderung der Wärmeverluste (Verbesserung U_w -Wert 40%) günstig auf die Energiebilanz auswirken – trotz zweier Fenster mehr im Erdgeschoss.

Beim Blick auf Tabelle 11.2 fällt des Weiteren im Vergleich mit Tabelle 7.1 (Ergebnisse des Blower-Door-Tests) auf, dass die Verbesserung der Luftdichtheit, dargestellt durch den n_{50} -Wert nahezu der Verringerung des spezifischen Heizwärmebedarfs entspricht:

- EG
 - o Verbesserung n_{50} : 52%
 - o Verringerung Heizwärmebedarf: 54%
- OG
 - o Verbesserung n_{50} : 68%
 - o Verringerung Heizwärmebedarf: 62%

Als Beispiel für die graphische Auswertung in PHPP, sind in Abbildung 11-6 die Monatswerte des Referenzjahres für die Wärmeverluste (türkise Linie), die Wärmegewinne (gelber Bereich des Balkendiagramms) und daraus resultierend für den Heizwärmebedarf (grauer Bereich) pro m^2 TFA dargestellt. Alle übrigen Ergebnisse für die betrachteten Räume können den PHPP-Tabellenblättern auf beigefügter CD-ROM entnommen werden.

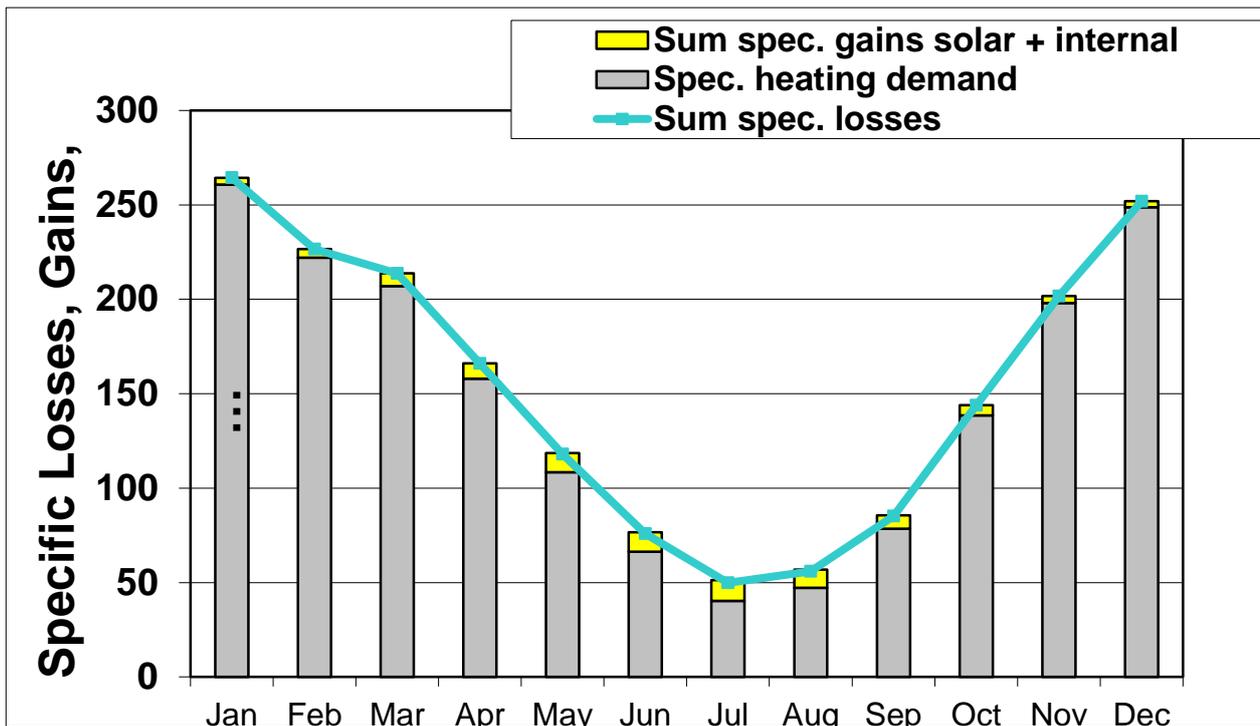


Abbildung 11-6: Wärmegewinne, Wärmeverluste und Heizwärmebedarf pro m² TFA im Jahresgang für das unsanierte Erdgeschoss

Die Wärmegewinne sollen dabei hier noch einer genaueren Betrachtung unterzogen werden. Während die internen Wärmegewinne je m² für beide Geschosse gleich sind, variieren die solaren Wärmegewinne aufgrund der verschiedenen Fensteraufbauten und Dämmvarianten (Wärmegewinne durch transparente und opake Bauteile).

In Abbildung 11-7 sind die solaren Wärmegewinne geschossweise für den sanierten und unsanierten Zustand dargestellt.

Sie sind vor der Sanierung im EG am größten. Da die Wandaufbauten identisch sind, unterscheiden sich die solaren Wärmegewinne durch opake Bauteile nicht voneinander, weshalb der Unterschied auf die Fensteranzahl zurückzuführen ist, denn der Energiedurchlass ist im Erdgeschoss aufgrund der vorgeschzten Winterfenster sogar geringer als im OG.

Nach der Sanierung sind die solaren Wärmegewinne erwartungsgemäß niedriger, da sich die verminderten Wärmedurchgangskoeffizienten durch die angebrachte Dämmkonstruktion auch auf den Wärmeeintrag ins Gebäude auswirken. Im Erdgeschoss kommen noch die PMMA-Vorsatzscheiben hinzu, welche sowohl den Wärmedurchgang (27% niedriger als vor Sanierung) als auch den Energiedurchlass (10% niedriger als vor Sanierung) abmindern. Dies resultiert in einer Umkehrung der Verhältnisse vor der Sanierung, da nun die Wärmegewinne im Obergeschoss größer sind.

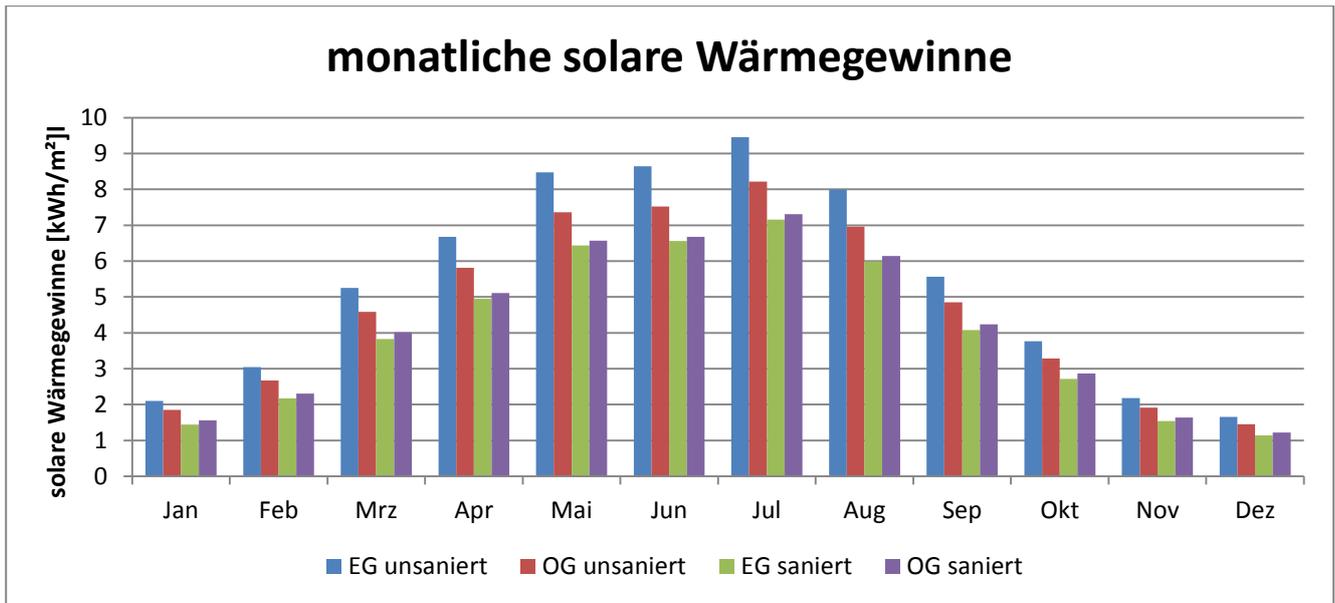


Abbildung 11-7: solare Wärmegewinne im Jahresgang

Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes ist das Risiko der Überhitzung nach der Sanierung größer als zuvor (geringerer Energiedurchlass der Fenster, aber bessere Qualität der innenliegenden Wärmedämmung und der Luftdichtheit). Da die Temperaturen im Tagesgang jedoch stark schwanken, ist die Berechnung hier nicht zuverlässig. Diese hohen Schwankungen resultieren u.a. aus der leichten Bauweise sowie den fehlenden Verschattungsmöglichkeiten und werden durch die Sanierungsmaßnahmen leicht reduziert.

Das Überhitzungsrisiko ist hierbei im EG aufgrund der bereits dargelegten Sachverhalte (Fenster) sowohl vor als auch nach Sanierung größer.

Tabelle 11.3: Überhitzungsrate ($T > 25^\circ\text{C}$) und tägliche Temperaturschwankungen

Geschoss	Überhitzungsrate [%]	Temperaturschwankung [K]
unsaniertes Zustand		
EG	0,6	5,5
OG	0,3	4,7
saniertes Zustand		
EG	3,3	4,3
OG	1,9	4,4

11.6. Sanierungsvarianten

Zur Beurteilung alternativer Varianten wurden für diese mittels PHPP analog zur durchgeführten Sanierungsmaßnahme Energiebilanzen aufgestellt.

Die geometrischen Randbedingungen blieben hierbei unverändert, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Aus diesem Grund wurde auch eine einheitliche Luftdurchlässigkeit angesetzt, obwohl diese bei der Realisierung innerhalb dieser Varianten schwanken würden. Es wurde hier das Kriterium nach EnEV 2009 von $n_{50} = 3,0$ Luftwechsel pro Stunde verwendet.

Bezüglich der zu untersuchenden Konstruktionen wurde auf die Vorschläge des WTA-Merkblattes 8-5 [24] für die Innendämmung von Fachwerkhäusern zurückgegriffen. Da an diesen Varianten in einem weiteren Schritt das Schadensrisiko mittels thermisch-hygrischer Simulation durch die Software DELPHIN wurde die Verfügbarkeit der Materialkennwerte abgeglichen um keine Bilanzen für Konstruktionen aufzustellen, die im Nachgang nicht zuverlässig auf ihr Schadenspotential beurteilt werden können.

Die Dicken der einzelnen Dämmungen wurde dabei so gewählt, dass ein Ziel-U-Wert in Höhe des halben Bestandwertes für die alternativen Konstruktionen von etwa $0,400 \frac{W}{m^2K}$ für die Außenwände definiert wurde. Dies resultiert aus den angedachten Varianten, da beispielsweise ausführungsbedingt die Schichtstärke für Wärmedämmputze nach [32] begrenzt ist. Nur durch Festlegung eines sich in einem einheitlichen Rahmen bewegenden U-Wertes ist schließlich eine Vergleichbarkeit gegeben.

Gemäß WTA-Merkblatt 8-1 [34] ist für Innendämmungen für Fachwerkwände der innere Wärmedurchlasswiderstand zwar auf $R_i < 0,8 \frac{m^2K}{W}$ zu begrenzen, jedoch werden hier zur Beurteilung der Konstruktionen hygrothermische Simulationen durchgeführt, so dass von diesem Richtwert nach oben abgewichen wird. Des Weiteren scheint der Feuchteeintrag beim vorliegenden Bauwerk durch Schlagregen, einer der Gründe für die Begrenzung des inneren Wärmedurchlasswiderstandes, im Vergleich zu Fachwerk (besonders Sichtfachwerk) niedriger zu sein.

Für die Nachweisfreiheit von Innendämmungen generell und im Speziellen für Fachwerk gibt DIN 4108-3 den maximalen Wärmedurchlasswiderstand zum Schutz vor Tauwasser im Inneren von Bauteilen mit $R_i \leq 1,0 \frac{m^2K}{W}$ an.

Alle Varianten genügen den Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 von $R > 1,2 \frac{m^2K}{W}$.

Dementsprechend wurden unabhängig vom bereits bilanzierten Bestandszustand und dem Zustand nach Sanierung folgende Innendämmkonstruktionen untersucht:

- STEICOflex 100mm mit OSB-Platte 22mm
- Calcium-Silikat-Platte 50mm auf 20mm Leichtlehmausgleichsputz mit 20mm Kalkputz
- trasshaltiger Wärmedämmputz 100mm mit 20mm Kalkputz
- Wärmedämmlehm mit Kork 80mm mit 20mm verlorener Schalung und 20mm Kalkputz
- Zellulose-Dämmplatten 60mm mit Dampfbremse und 12,5mm starker Gipskartonplatte in Holzständerbauweise
- EPS-Platte 50mm auf 5mm Ansetzbinder mit 12,5mm starker Gipskartonplatte
- XPS-Platte 40mm auf 5mm Ansetzbinder mit 12,5mm starker Gipskartonplatte

- Mineralwolle 50mm mit Dampfbremse und 12,5mm starker Gipskartonplatte in Holzständerbauweise

Für die verwendeten Materialien sind folgenden Kennwerte in der Materialdatenbank der Simulationssoftware DELPHIN hinterlegt bzw. verfügbare Daten wurden hier entsprechend eingepflegt (STEICOflex, isover vario KM).

Tabelle 11.4: wichtigste Materialkennwerte verwendete Materialien

Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	λ [W/mK]
Fichte	528	2000	0,130
STEICOflex	50	2100	0,038
isover vario KM	1000	1400	0,150
Calcium-Silikat	270	1158	0,065
Kalkputz	1700	1000	0,870
Wärmedämmputz	611	1000	0,100
Wärmedämmlehm	368	1000	0,080
Zellulosedämmung	55	2544	0,040
Gipskarton	850	850	0,200
EPS	34	1300	0,040
XPS	30	1300	0,030
Ansetzbinder	1100	850	0,700
Mineralwolle	30	840	0,040
OSB-Platte	630	2200	0,130
Leichtlehmputz	900	1000	0,230

Die inneren Durchlasswiderstände ergeben sich dabei anhand der Schichtdicken und jeweiligen Wärmeleitfähigkeiten ab der Strickkonstruktion:

$$R_i = \sum R_n$$

Tabelle 11.5: innere Wärmedurchlasswiderstände der untersuchten Varianten

Variante	R_i [m ² K/W]
STEICOflex mit Dampfbremse	2,632
STEICOflex mit OSB-Platte	2,801
Calcium-Silikat-Platte	0,879
Wärmedämmputz	1,023
Wärmedämmlehm	1,177
Zellulose	1,563
Mineralwolle	1,313
EPS	1,320
XPS	1,403

Die leichte Änderung der Wohnflächen infolge der verschieden starken Dämmaufbauten ist von vernachlässigbar kleiner Auswirkung auf die Energiebilanz und wurde nicht berücksichtigt.

Für die obengenannten Konstruktionen ergeben sich folgende Wärmedurchgangskoeffizienten.

Tabelle 11.6: Wärmedurchgangskoeffizienten der Sanierungsvarianten mit Verbesserung gegenüber Bestand in %

Variante	U-Wert Bauteil [$\frac{W}{m^2K}$]			
	Außenwand	Innenwand	Kellerdecke	Dachboden
Calcium-Silikat-Platte	0,454 (-40%)	0,488 (-43%)	0,629 (-56%)	0,754 (-65%)
Wärmedämmputz	0,426 (-44%)	0,456 (-40%)	0,577 (-60%)	0,680 (-70%)
Wärmedämmlehm	0,408 (-46%)	0,436 (-51%)	0,545 (-62%)	0,616 (-72%)
Zellulose	0,370 (-51%)	0,393 (-54%)	0,480 (-66%)	0,510 (-77%)
Mineralwolle	0,402 (-47%)	0,429 (-50%)	0,534 (-62%)	0,584 (-74%)
EPS	0,386 (-49%)	0,411 (-52%)	0,506 (-64%)	0,584 (-74%)
XPS	0,374 (-50%)	0,397 (-54%)	0,486 (-65%)	0,557 (-75%)

Hierdurch ergaben sich bei den angegebenen Randbedingungen folgende spezifische Heizwärmebedarfe.

Tabelle 11.7: spezifische Heizwärmebedarfe und Verbesserung gegenüber Bestand

Geschoß	spezifischer Heizwärmebedarf [kWh/m²a]		Verbesserung [%]	
	EG	OG	EG	OG
Bestand				
	342	461	-	-
Calcium-Silikat-Platte				
	237	284	31	38
Wärmedämmputz				
	225	269	34	42
Wärmedämmlehm				
	218	257	36	42
Zellulose				
	203	236	41	49
Mineralwolle				
	215	252	37	45
EPS				
	215	248	37	46
XPS				
	204	242	40	47

Wie bereits bei den Bilanzen zur durchgeführten Sanierungsmaßnahme dargelegt, sind die reinen Verbesserungen durch die Dämmmaßnahmen eher moderat. Weiterer sehr wichtiger Punkt bleibt daher die Verbesserung der luftdichten Gebäudehülle. Welche konkreten Auswirkungen die alternativen Dämmvarianten auf die Luftdichtheit besitzen, würde den Umfang dieser Arbeit sprengen und kann verlässlich nur vor Ort überprüft werden.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen wird die reine Einsparung des Heizwärmebedarfs durch die Dämmmaßnahme ins Verhältnis zu den Preisen der Konstruktion pro m² gesetzt.

Alle Preise inkl. MwSt. laut google.de-Suche vom 25.09.2012:

Tabelle 11.8: Preise für reine Dämmstoffe in € pro m² Wandfläche

Dämmung	Preis [€]
STEICOflex	10,48 (<i>rehm-onlineshop.de</i>)
Calcium-Silikat-Platte	44,34 (<i>heim-baustoffe.de</i>)
Wärmedämmputz	137,53 (<i>sievers-onlinetrading.com</i>)
Wärmedämmlehm	75,36 (<i>bausep.de</i>)
Zellulose	17,31 (<i>biobauhandel.de</i>)
Mineralwolle	6,75 (<i>heim-baustoffe.de</i>)
EPS	3,09 (<i>heim-baustoffe.de</i>)
XPS	5,91 (<i>heim-baustoffe.de</i>)

Der Preis pro m² Kalkputz beträgt 9,89€ (*bausep.de*), pro m² Gipskartonplatte 2,54€ (*bausep.de*) und pro m² Dampfbremse isover vario KM 29,92€ (*bausep.de*). Ein m² Lehmausgleichsputz schlägt mit 28,56€ zu Buche (*gesundwerk.de*), diffusionsoffenes Vlies als Trennschicht mit 1,65€/m² (*wego-systembaustoffe.de*) und Armierungskleber für die Polystyrolplatten mit 4,14€/m² (*heim-baustoffe.de*).

Hinsichtlich der hölzernen Vorsatzschale wurde die Bauweise der durchgeführten Sanierung für alle Vorsatzschalen verwendet. Es ergibt sich beispielsweise für die verbaute Konstruktion an der Nordwand in Raum 0.3:

- 6 Pfosten á 1,87m Länge
- 2 Riegel á 3,76m Länge
- Gesamtlänge: 18,74m
- Wandfläche: 7,40m²
- entsprechend 2,50lfm Kantholz pro m² Wandfläche

Eine 40mm dicke Lattung aus Fichtenholz verursacht damit Kosten in Höhe von 4,38€ pro m² Wandfläche (*holzland-seibert.de*).

Für die verlorene Schalung bei der Konstruktion mit Wärmedämmlehm wird die gleiche Holzvorsatzschale verwendet und mit Holzplatten beplankt. Hierbei werden für die Holzplatten pro m² 8,90€ veranschlagt (*holzland-seibert.de*).

Die erforderliche Menge an Nägeln, Klebebändern etc. lässt sich schwer voraussagen und wird daher für die Preisbildung vernachlässigt. Ebenso die Kosten für Vlies und Armierungsgewebe als Putzuntergrund, da sie für die Gesamtbetrachtung kaum ins Gewicht fallen (s.o.).

Tabelle 11.9: Preise für Konstruktionen pro m² Wandfläche mit Bezug auf Heizwärmebedarfseinsparung

Dämmvariante	Preis pro m ² Konstruktionsfläche [€]	Kosten pro m ² Konstruktionsfläche je kWh/m ² a Bedarfseinsparung [€]	
		EG	OG
STEICOflex	44,78	EG	0,25
		OG	0,17
Calcium-Silikat-Platte	82,79	EG	0,79
		OG	0,47
Wärmedämmputz	147,07	EG	1,26
		OG	0,77
Wärmedämmlehm	98,53	EG	0,79
		OG	0,48
Zellulose	54,15	EG	0,39
		OG	0,24
Mineralwolle	43,59	EG	0,34
		OG	0,21
EPS	9,79	EG	0,08
		OG	0,05
XPS	12,59	EG	0,09
		OG	0,06

Es ist erkennbar, dass die Varianten mit Polystyrolämmung unter Berücksichtigung des Heizwärmebedarfs am preiswertesten sind. Aber auch die verwendete Sanierungsmaßnahme schneidet gut ab, wenngleich hier als Raumabschluss die Dampfbremse dient. Die zusätzliche Anbringung einer Gipskartonplatte oder Ähnlichem ist hier noch einzubeziehen, verändert die Verhältnisse aber kaum.

Nicht berücksichtigt wurden hier jedoch die Energien, die für die Erzeugung der jeweiligen Produkte aufzuwenden sind. Auch die Nachhaltigkeit ist ein weiterer Aspekt. Hier stellt sich bei den Polystyrolämmungen vor allem die Frage, wie in der Zukunft die Entsorgung von mit Kleber verunreinigten Polystyrolplatten vonstattengehen soll. Bei dieser Betrachtung haben Alternativen mit nachwachsenden Rohstoffen deutliche Vorteile und sind bei den vorgestellten Varianten sortenrein rückbau- und verwertbar.

Betrachtet man den nötigen Herstellungsaufwand, treten ebenfalls Unterschiede zutage. In [35] wurde dieser Aspekt ausführlich berücksichtigt und für viele verschiedene Dämmvarianten eine Bewertungsmatrix erstellt. Hierbei kommt der Autor zu dem Schluss, dass der Herstellungsaufwand für die Konstruktionen mit Vorsatzschalen mit Dämmplatten (Mineralwolle, Holzfasern, Zellulose) sowie mit Schüttdämmung (Wärmedämmlehm) am geringsten ist. Ein ähnlicher Arbeitsaufwand wird der Variante mit Wärmedämmputz attestiert. Etwas aufwendiger ist demnach die Montage der Konstruktion

mit Calcium-Silikat-Dämmung. Von den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Varianten schneiden jene mit Polystyrol-Dämmung am schlechtesten ab. Als kritisch angesehen wird hier vor allen Dingen die aufwendige Untergrundvorbehandlung sowie der Oberflächenabschluss, wobei jedoch von einem raumseitigen Putzauftrag ausgegangen wird, welcher im vorliegenden Fall durch die Anbringung der Gipskartonplatten wegfällt. Diese Konstruktionsweise ist somit weniger aufwendig und nicht unüblich, da u.a. Gipskartonplatten mit aufkaschiertem Polystyrol für die Innendämmung existieren (z.B. Rigips RIGITHERM).

12. IDA ICE

12.1. Randbedingungen und Eingaben

Mithilfe der englischsprachigen Software IDA ICE (Indoor Climate and Energy) wurde eine dynamische Gebäudesimulation der Zustände vor und nach der Sanierung zur Bilanzierung von Energiegewinnen und -verlusten durchgeführt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Energiebilanzen vor und nach Sanierung wurde wie schon in PHPP nur der Quader betrachtet, der saniert wurde.

Im Gegensatz zu einer statischen Berechnung mit stationären Randbedingungen können hier instationäre, realistischere Klimabedingungen berücksichtigt werden und die Gewinne bzw. Verluste selbst stundenweise ausgegeben werden.

Die klimatischen Randbedingungen entsprechen hier dem gleichen Referenzklima wie im Kapitel zu DELPHIN beschrieben. Hinsichtlich der geometrischen Randbedingungen wurden die gleichen wie in PHPP verwendet.

Analog zu PHPP werden auch hier Erd- und Obergeschoss getrennt betrachtet (s. Abbildung 12-1, da für verschiedene Zonen keine verschiedenen Infiltrationsraten, welche sich aus der Luftdichtheit der Gebäudehülle ergeben, angesetzt werden können. Es wurde daher hier das Ergebnis aus dem Blower-Door-Test des jeweiligen Geschosses eingetragen. Hierbei wurde eine winddruckabhängige Infiltration gewählt, was deutlich realistischer ist als ein konstanter Fluss.

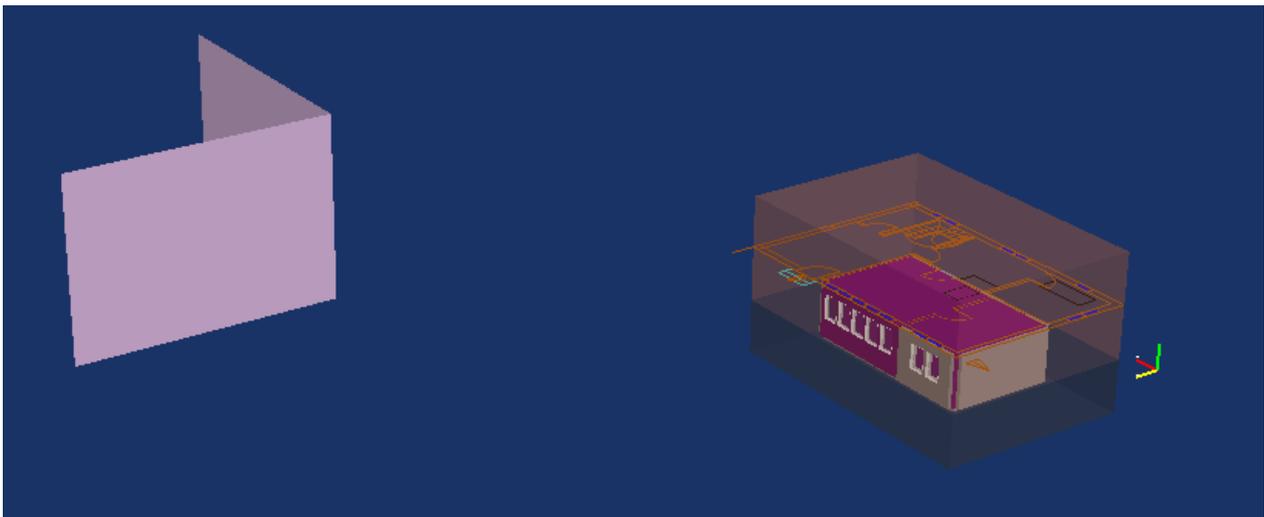


Abbildung 12-1: 3D-Modell des untersuchten Gebäudes mit Zonierung für Erdgeschoss für den Zustand nach Sanierung mit Verschattungselement (Nachbargebäude) links; die grauen Elemente spiegeln nur den zweischichtigen Wandaufbau mit innenliegender Dämmung wieder, welche im ehemaligen Wohnzimmer nicht angebracht werden konnte

Hinsichtlich der opaken Bauteile ist bei IDA ICE keine direkte Eingabe von U-Werten möglich. Auch können keine inhomogenen Bauteile, beispielsweise das verwendete Ständerwerk im Rahmen der Sanierung, eingegeben werden, so dass die U-Werte der sanierten Wände etwas günstiger ausfallen als in der Realität. Die Fenster dagegen konnten mit den gleichen Ausgangsmaterialwerten wie in PHPP eingegeben werden.

Des Weiteren konnten keine negativen Ψ -Werte für die Wärmebrücken eingegeben werden, da IDA ICE nur ungünstig wirkende Wärmebrücken und damit positive Ψ -Werte akzeptiert. Dies liegt zwar auf der günstigen Seite, ist aber dennoch nicht zufriedenstellend.

Mögliche Verschattungen können durch die Fensterlaibungen sowie das Gebäude in der Nachbarschaft entstehen. Bei den Fenstern wurde daher eine Fensterlaibung von 12cm Tiefe wie in PHPP berücksichtigt. Das Gebäude wurde mit 20m horizontalem Abstand zweidimensional modelliert (vgl. Abbildung 12-1).

Die Druckkoeffizienten zur Berücksichtigung des Winddruckes im Rahmen der Infiltrationen durch die Gebäudehülle wurden von IDA ICE automatisch für eine exponierte Lage berechnet, wie sie am untersuchten Objekt vorzufinden ist.

Alle Eingaben, welche die Haustechnik betreffen, wurden wie schon im Kapitel zu PHPP erläutert, freigelassen bzw. sind ohne Bedeutung, da keine entsprechenden Aggregate berücksichtigt wurden. Lediglich ein „Electric Radiator“ wurde aus der IDA ICE-Datenbank eingefügt, um die Raumtemperatur über einen entsprechenden „Controller Setpoint“ auf mindestens 20°C zu halten.

Für die internen Wärmegewinne wurde hier eine Person pro Geschoss angesetzt, der ein Zeitplan gemäß der üblichen Wohnnutzung zugewiesen wurde (s. Abbildung 12-2). Außerdem wurden zwei Glühbirnen á 60W aus der IDA ICE-Datenbank pro Geschoss verwendet, welchen derselbe Zeitplan zugewiesen wurde. Als zusätzliche räumliche Wärmespeichermasse dient die Standard-Einstellung zu Mobiliar von 20% bedeckter Bodenfläche.

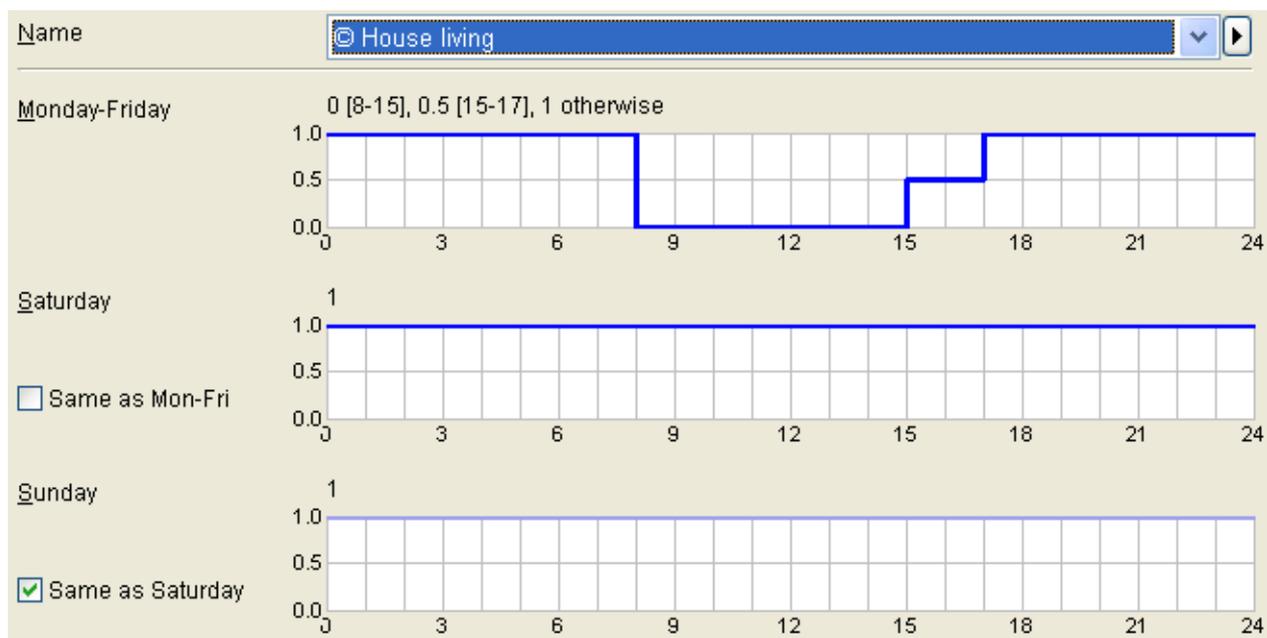


Abbildung 12-2: Zeitplan für Wohnnutzung der Zone

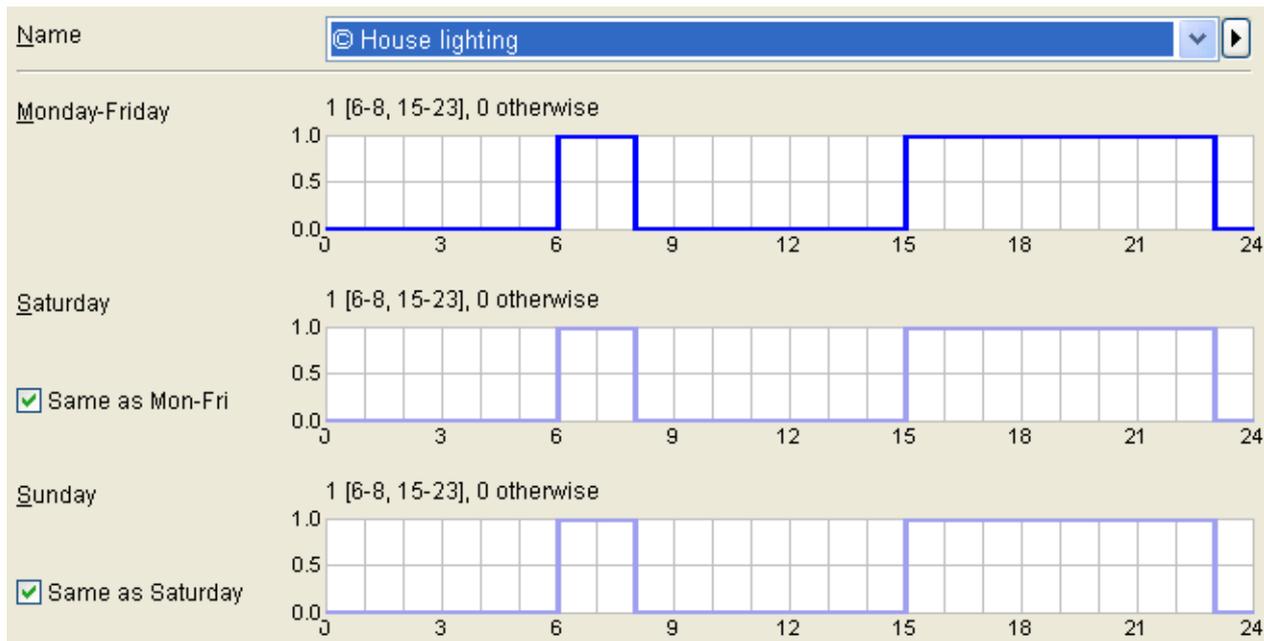


Abbildung 12-3: Zeitplan für Beleuchtung der Zone

12.2. Ergebnisse

Die Berechnung erfolgte für ein Jahr ohne Änderung der Solvereinstellungen für den unsanierten Zustand sowie die vor Ort durchgeführte Sanierungsmaßnahme.

Die Transmissionsverluste liegen dabei in ähnlichen Größenordnungen wie bei PHPP, sind aber außer bei den Fenstern etwas günstiger. Die größten Wärmeverluste erfolgen damit auch hier über den Fußboden.

Lediglich hinsichtlich der Verluste durch Infiltration folgen aus der Simulation mit IDA ICE deutlich bessere Ergebnisse, was wohl auf die winddruckabhängige Infiltration zurückzuführen ist, die anhand der meteorologischen Daten erfolgen kann. Dies kann eine statische Lösung wie PHPP nicht leisten. Des Weiteren werden bauteil- und richtungsabhängige Druckbeiwerte automatisch von IDA ICE ermittelt wohingegen in PHPP lediglich feste Tabellenwerte verwendet werden. Aus diesen Kennwerten und den Ergebnissen des Blower-Door-Testes ermittelt PHPP eine „energetisch effektive Luftwechselrate“, die permanent angesetzt wird und somit in hohen Wärmeverlusten durch Ventilation resultiert. Setzt man diese Luftwechselrate in IDA ICE als „fixed infiltration“, also einen ebenfalls ständig vorhandenen Luftwechselstrom an, die sich in der Größenordnung der durch PHPP ermittelten Wärmeverluste infolge Ventilation befinden. Für den unsanierten Zustand ermittelt PHPP beispielsweise eine effektive Luftwechselrate von $3,206\text{h}^{-1}$. Aus dieser, dem betrachteten Volumen, der Wärmespeicherkapazität von Luft und dem temperaturabhängigen Gradtagszahlfaktor aus den Klimadaten berechnen sich jährliche Wärmeverluste infolge Luftwechsel von 4350kWh/a . Mit dieser Luftwechselrate als feste Größe ergeben sich durch dynamische Simulation mit IDA ICE von 5390kWh/a .

Von dieser Betrachtungsweise wurde jedoch Abstand genommen, da sie dem Prinzip einer dynamischen Gebäudesimulation zuwider läuft und daher eine winddruckabhängige Infiltration auf Grundlage der Luftdichtheitsprüfung gewählt, was zu wesentlich günstigeren Lüftungswärmeverlusten führte.

Die Winddruckkoeffizienten wurden dabei aufgrund der geographischen Gegebenheiten des untersuchten Objektes für eine exponierte Lage durch IDAICE bestimmt.

12.2.1. Erdgeschoss unsaniert

Mit diesen gewählten Randbedingungen ergeben sich die nach Abbildung 12-4 dargestellten Wärmeverluste und Gewinne. Anhand der Verluste in Verbindung mit solaren und internen Gewinnen kann über die Zonenfläche die Ermittlung des jährlichen spezifischen Heizwärmebedarfs erfolgen, welcher sich zu 280 kWh/m²a ergibt.

Mit dem Ansatz eines konstanten Volumenstroms wie zuvor beschrieben ergibt sich eine Bilanz nach Abbildung 12-5 von rund 500 kWh/m²a. Zu Vergleichszwecken ist in diesem Zusammenhang die Bilanz bei winddruckabhängiger Infiltration bei einer theoretischen Luftwechselrate von 3,0h⁻¹ wie sie der EnEV 2009 entspricht (Abbildung 12-6). Hiermit ergäbe sich ein Heizwärmebedarf von 226 kWh/m²a. Hieraus wird deutlich, dass bei winddruckabhängiger Betrachtung die Auswirkungen der Luftdichtheit wesentlich niedriger sind als nach der bereits dargelegten Bilanzierung gemäß PHPP.

kWh (sensible only)

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	External Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
1	-922.0	0.3	-131.7	0.0	-133.4	32.5	0.0	22.4	1132.0	0.0	0.0
2	-806.6	0.1	-90.1	0.0	-169.4	29.7	0.0	20.9	1015.0	0.0	0.0
3	-685.5	0.1	-27.5	0.0	-146.4	31.8	0.0	22.4	805.2	0.0	0.0
4	-507.2	0.2	43.9	0.0	-112.8	30.8	0.0	21.6	523.3	0.0	0.0
5	-321.0	-0.1	96.5	0.0	-73.7	28.9	0.0	22.4	246.8	0.0	0.0
6	-224.3	0.1	118.1	0.0	-51.6	26.3	0.0	21.6	109.5	0.0	0.0
7	-205.4	-0.3	152.4	0.0	-47.4	26.2	0.0	22.4	51.8	0.0	0.0
8	-182.2	0.2	115.2	0.0	-34.3	26.8	0.0	22.4	51.8	0.0	0.0
9	-310.2	0.2	42.4	0.0	-55.7	30.9	0.0	21.6	270.6	0.0	0.0
10	-482.4	0.2	-28.6	0.0	-72.5	32.0	0.0	22.4	529.0	0.0	0.0
11	-731.7	0.3	-100.1	0.0	-110.2	31.3	0.0	21.6	889.0	0.0	0.0
12	-907.2	0.4	-134.0	0.0	-147.2	32.8	0.0	22.4	1133.0	0.0	0.0
Total	-6285.7	1.9	56.5	0.0	-1154.6	360.0	0.0	264.0	6757.0	0.0	0.0
During heating	-5750.0	10.0	-451.9	0.0	-1062.2	298.3	0.0	199.2	6758.3	0.0	0.0
During cooling	-168.5	-8.1	167.8	0.0	-21.7	11.9	0.0	18.8	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-367.2	-0.0	340.6	0.0	-70.7	49.8	0.0	46.0	-1.3	0.0	0.0

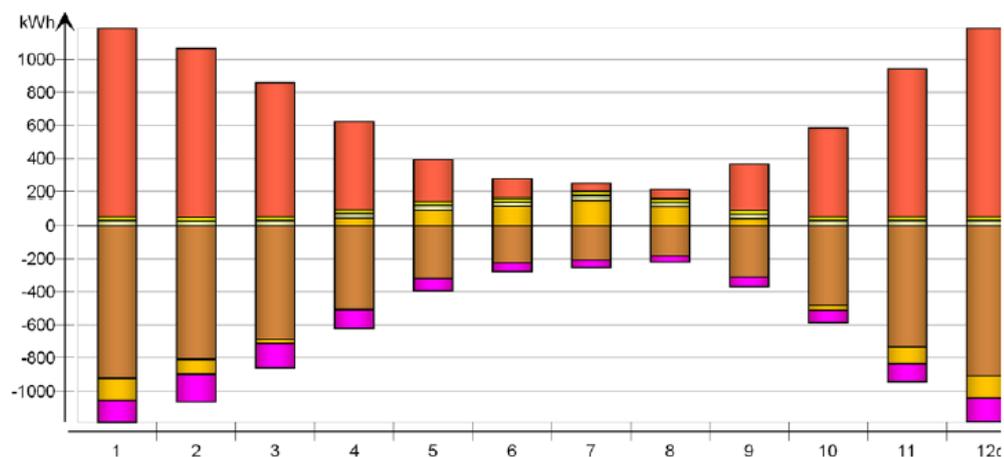


Abbildung 12-4: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Erdgeschoss mit winddruckabhängiger Infiltration

kWh (sensible only)

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	External Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
1	-1110.0	0.0	-151.7	0.0	-738.2	21.1	0.0	22.4	1957.0	0.0	0.0
2	-959.5	-0.1	-106.5	0.0	-655.1	20.1	0.0	20.9	1680.0	0.0	0.0
3	-819.5	-0.1	-42.1	0.0	-586.8	23.5	0.0	22.4	1403.0	0.0	0.0
4	-608.1	0.3	32.8	0.0	-462.1	24.4	0.0	21.6	990.9	0.0	0.0
5	-353.6	0.0	93.7	0.0	-308.5	25.9	0.0	22.4	519.9	0.0	0.0
6	-216.3	0.1	120.7	0.0	-220.9	25.2	0.0	21.6	269.4	0.0	0.0
7	-187.5	-0.2	156.5	0.0	-207.1	25.5	0.0	22.4	190.1	0.0	0.0
8	-165.3	0.1	119.1	0.0	-177.8	26.0	0.0	22.4	175.4	0.0	0.0
9	-369.4	-0.2	36.1	0.0	-301.7	27.0	0.0	21.6	586.4	0.0	0.0
10	-579.3	-0.3	-39.4	0.0	-421.3	26.2	0.0	22.4	991.8	0.0	0.0
11	-874.6	0.3	-115.4	0.0	-592.2	22.7	0.0	21.6	1538.0	0.0	0.0
12	-1084.0	-0.1	-152.8	0.0	-717.2	21.9	0.0	22.4	1910.0	0.0	0.0
Total	-7327.1	-0.3	-49.0	0.0	-5388.9	289.4	0.0	264.0	12211.9	0.0	0.0
During heating	-7077.8	5.0	-464.2	0.0	-5141.7	251.4	0.0	217.8	12211.1	0.0	0.0
During cooling	-51.2	-4.6	77.2	0.0	-35.8	5.4	0.0	9.2	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-198.1	-0.7	338.0	0.0	-211.4	32.6	0.0	37.0	0.8	0.0	0.0

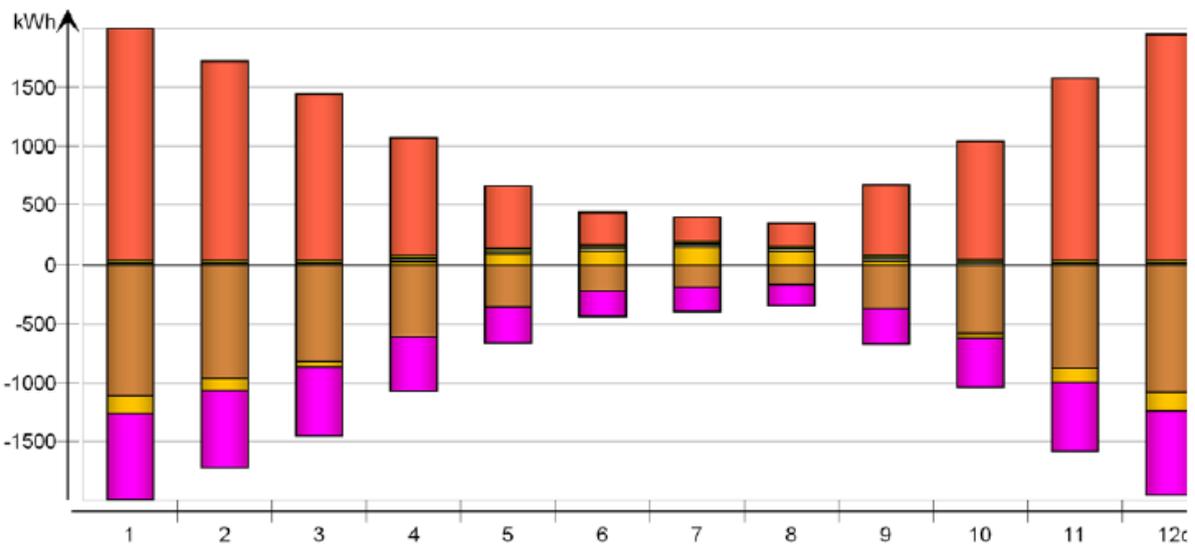


Abbildung 12-5: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Erdgeschoss mit konstanter Infiltrationsrate

kWh (sensible only)

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	External Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
1	-888.9	0.0	-128.6	0.0	-13.5	34.9	0.0	22.4	973.8	0.0	0.0
2	-766.0	0.0	-86.1	0.0	-17.1	32.2	0.0	20.9	816.2	0.0	0.0
3	-651.5	0.1	-24.1	0.0	-14.8	34.1	0.0	22.4	633.9	0.0	0.0
4	-486.6	-0.0	46.0	0.0	-11.6	32.5	0.0	21.6	397.9	0.0	0.0
5	-315.4	-0.1	96.7	0.0	-7.7	29.9	0.0	22.4	174.1	0.0	0.0
6	-231.9	0.1	116.4	0.0	-5.8	26.7	0.0	21.6	72.7	0.0	0.0
7	-224.6	-0.5	149.4	0.0	-5.7	26.3	0.0	22.4	32.6	0.0	0.0
8	-194.2	0.3	112.9	0.0	-4.0	27.1	0.0	22.4	35.4	0.0	0.0
9	-300.2	0.2	43.4	0.0	-5.8	32.1	0.0	21.6	208.4	0.0	0.0
10	-465.5	0.1	-27.0	0.0	-7.4	33.4	0.0	22.4	444.1	0.0	0.0
11	-705.6	-0.0	-97.4	0.0	-11.2	33.1	0.0	21.6	759.5	0.0	0.0
12	-870.5	0.0	-130.4	0.0	-14.9	35.3	0.0	22.4	958.2	0.0	0.0
Total	-6100.9	0.2	71.1	0.0	-119.5	377.6	0.0	264.0	5506.7	0.0	0.0
During heating	-5461.1	9.2	-451.1	0.0	-105.5	308.1	0.0	193.8	5505.6	0.0	0.0
During cooling	-210.7	-8.8	187.0	0.0	-3.9	14.4	0.0	22.3	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-429.1	-0.2	335.2	0.0	-10.1	55.1	0.0	47.9	1.1	0.0	0.0

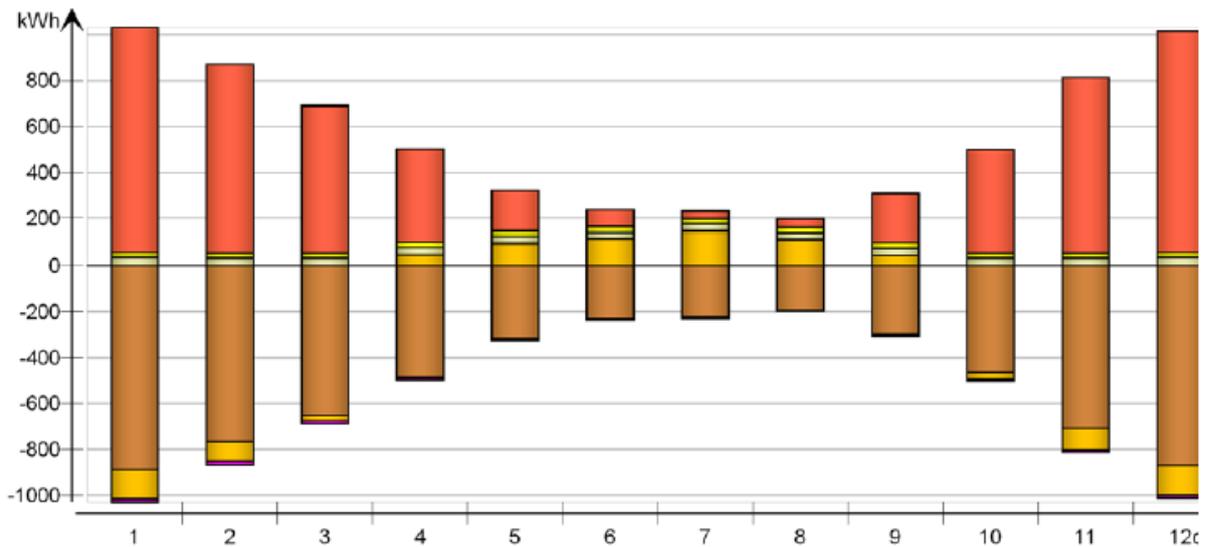


Abbildung 12-6: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Erdgeschoss bei winddruckabhängiger Infiltration mit Luftdichtheit nach EnEV 2009

12.2.2.übrige Geschosse und Zustände

Für die weiter untersuchten Geschosse vor und nach Sanierung ergeben sich gemäß Abbildung 12-7 bis Abbildung 12-9 folgende jährlichen spezifischen Heizwärmebedarfe:

Tabelle 12.1: Übersicht jährliche spezifische Heizwärmebedarfe

Bezeichnung	Heizwärmebedarf [kWh/m ² a]
EG unsaniert	280
EG saniert	100
OG unsaniert	395
OG saniert	123

kWh (sensible only)

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	External Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
1	-338.4	0.2	-81.9	0.0	-65.2	31.6	0.0	22.3	431.8	0.0	0.0
2	-293.5	0.1	-48.1	0.0	-82.9	29.0	0.0	20.9	374.7	0.0	0.0
3	-251.5	0.0	3.2	0.0	-72.3	30.8	0.0	22.3	267.5	0.0	0.0
4	-194.1	-0.2	59.0	0.0	-58.0	29.4	0.0	21.6	142.2	0.0	0.0
5	-149.8	-0.5	92.5	0.0	-42.0	24.9	0.0	22.3	52.5	0.0	0.0
6	-127.4	0.1	103.7	0.0	-35.8	20.3	0.0	21.6	17.3	0.0	0.0
7	-135.6	-0.7	130.7	0.0	-36.6	19.4	0.0	22.3	0.5	0.0	0.0
8	-117.5	0.4	97.2	0.0	-26.5	20.8	0.0	22.3	3.2	0.0	0.0
9	-127.1	0.4	47.1	0.0	-29.7	28.6	0.0	21.6	59.0	0.0	0.0
10	-180.8	0.1	-7.0	0.0	-36.3	30.8	0.0	22.3	171.0	0.0	0.0
11	-270.2	0.1	-61.0	0.0	-53.9	30.2	0.0	21.6	333.4	0.0	0.0
12	-333.1	0.2	-84.8	0.0	-72.0	32.0	0.0	22.3	435.6	0.0	0.0
Total	-2519.0	0.3	250.6	0.0	-611.0	327.6	0.0	263.6	2288.6	0.0	0.0
During heating	-1858.6	8.4	-369.4	0.0	-467.2	238.2	0.0	161.1	2288.6	0.0	0.0
During cooling	-486.1	-14.4	474.2	0.0	-91.5	51.0	0.0	67.8	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-174.3	6.3	145.8	0.0	-52.3	38.4	0.0	34.7	-0.0	0.0	0.0

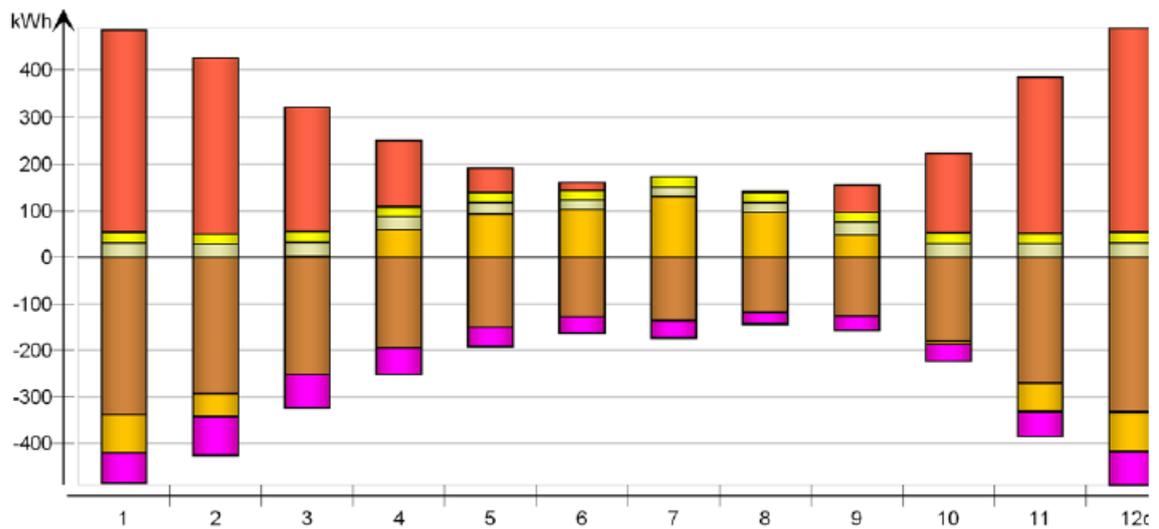


Abbildung 12-7: Wärmeverluste und -gewinne im sanierten Erdgeschoss

kWh (sensible only)

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	External Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
1	-1268.0	0.3	-199.2	0.0	-117.6	28.6	0.0	22.3	1534.0	0.0	0.0
2	-1108.0	0.1	-154.2	0.0	-149.3	26.3	0.0	20.9	1365.0	0.0	0.0
3	-951.0	0.1	-94.1	0.0	-129.1	29.0	0.0	22.3	1123.0	0.0	0.0
4	-706.6	0.4	-20.2	0.0	-99.1	28.9	0.0	21.6	775.1	0.0	0.0
5	-436.7	-0.0	43.8	0.0	-63.1	28.8	0.0	22.3	404.9	0.0	0.0
6	-285.2	0.3	73.8	0.0	-41.7	27.4	0.0	21.6	203.9	0.0	0.0
7	-251.1	-0.2	104.3	0.0	-36.3	27.7	0.0	22.3	133.3	0.0	0.0
8	-230.0	0.1	78.0	0.0	-25.7	28.1	0.0	22.3	127.3	0.0	0.0
9	-450.6	0.2	-0.2	0.0	-48.6	30.3	0.0	21.6	447.4	0.0	0.0
10	-690.2	0.2	-73.7	0.0	-63.8	30.4	0.0	22.3	775.1	0.0	0.0
11	-1013.0	0.5	-154.8	0.0	-97.0	28.3	0.0	21.6	1215.0	0.0	0.0
12	-1246.0	0.5	-198.8	0.0	-129.9	28.9	0.0	22.3	1523.0	0.0	0.0
Total	-8636.4	2.3	-595.3	0.0	-1001.3	342.8	0.0	263.1	9627.0	0.0	0.0
During heating	-8250.0	9.1	-942.5	0.0	-950.3	296.4	0.0	211.0	9627.8	0.0	0.0
During cooling	-90.1	-4.0	82.6	0.0	-7.8	7.6	0.0	12.0	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-296.3	-2.8	264.6	0.0	-43.2	38.8	0.0	40.1	-0.8	0.0	0.0

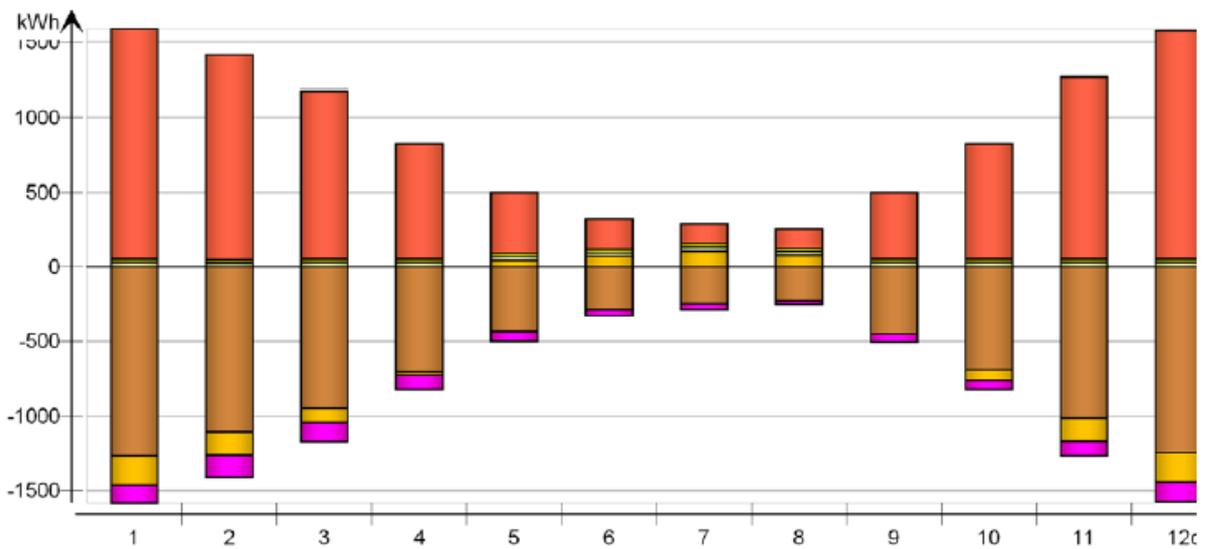


Abbildung 12-8: Wärmeverluste und -gewinne im unsanierten Obergeschoss

kWh (sensible only)

Month	Envelope & Thermal bridges	Internal Walls and Masses	External Window & Solar	Mech. supply air	Infiltration & Openings	Occupants	Equipment	Lighting	Local heating units	Local cooling units	Net losses
1	-314.2	0.1	-196.1	0.0	-38.5	31.0	0.0	22.3	495.6	0.0	0.0
2	-272.5	0.1	-151.1	0.0	-48.9	28.6	0.0	20.9	423.1	0.0	0.0
3	-234.7	0.1	-93.6	0.0	-42.7	30.6	0.0	22.3	318.1	0.0	0.0
4	-180.7	-0.1	-24.7	0.0	-34.4	29.5	0.0	21.6	189.0	0.0	0.0
5	-131.1	-0.3	25.3	0.0	-23.5	26.4	0.0	22.3	80.9	0.0	0.0
6	-104.2	0.2	46.3	0.0	-18.5	23.2	0.0	21.6	31.6	0.0	0.0
7	-105.0	-0.6	70.8	0.0	-19.1	22.4	0.0	22.3	9.3	0.0	0.0
8	-92.4	0.4	47.5	0.0	-13.7	23.8	0.0	22.3	12.2	0.0	0.0
9	-119.2	0.2	-9.1	0.0	-17.1	29.4	0.0	21.6	94.2	0.0	0.0
10	-172.5	0.1	-76.0	0.0	-21.4	30.7	0.0	22.3	216.9	0.0	0.0
11	-252.2	0.1	-153.2	0.0	-31.9	29.9	0.0	21.6	386.0	0.0	0.0
12	-309.2	0.1	-195.4	0.0	-42.5	31.5	0.0	22.3	493.5	0.0	0.0
Total	-2287.9	0.3	-709.3	0.0	-352.3	337.2	0.0	263.1	2750.4	0.0	0.0
During heating	-1825.8	11.0	-1079.2	0.0	-283.9	255.8	0.0	172.9	2750.3	0.0	0.0
During cooling	-236.2	-15.6	224.9	0.0	-26.8	19.6	0.0	35.1	0.0	0.0	0.0
Rest of time	-225.9	4.9	145.0	0.0	-41.6	61.8	0.0	55.1	0.1	0.0	0.0

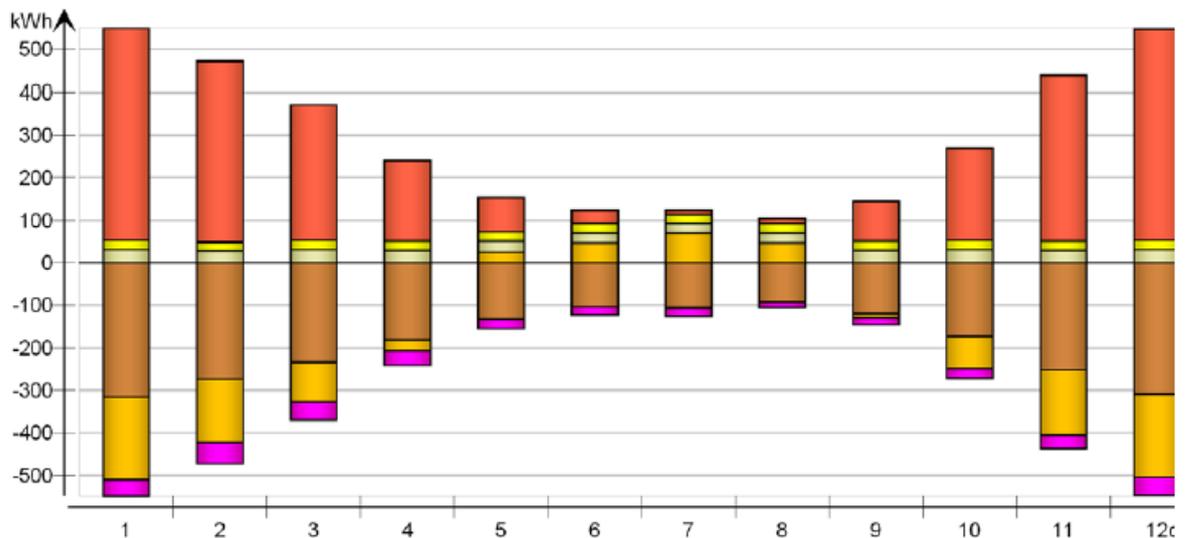


Abbildung 12-9: Wärmeverluste und -gewinne im sanierten Obergeschoss

Die erhöhten Heizwärmebedarfe im Obergeschoss sind hier auf die größeren Verluste über die Decke im Vergleich zur Kellerdecke zurückzuführen, obwohl für den Zustand nach der Sanierung im Erdgeschoss ein Teil der Außenwand ungedämmt bleiben musste, wie folgende Abbildungen mit den Transmissionswärmeverlusten nach Bauteilgruppe darlegen.

Es ist hierbei erkennbar, dass im Vergleich zum Ursprungszustand durch die Sanierung die Wärmeverluste über die Wände anteilig etwa gleich bleiben. Erheblich zurück gehen jedoch die Verluste über Kellerdecke bzw. die Decke im Obergeschoss. Dafür steigt der Anteil der Verluste über die Fenster, was ein deutliches Indiz für das hier vorhandene Verbesserungspotential darstellt.

kWh

Month	Walls	Roof	Floor	Windows	Doors	Thermal bridges
1	-385.8	0.0	-470.6	-160.6	-65.6	0.0
2	-334.2	0.0	-416.0	-143.7	-56.3	0.0
3	-280.1	0.0	-358.0	-128.6	-47.5	0.0
4	-204.3	0.0	-269.3	-102.0	-33.5	0.0
5	-126.4	0.0	-174.7	-74.8	-19.9	0.0
6	-88.5	0.0	-122.4	-60.6	-13.4	0.0
7	-78.0	0.0	-116.0	-59.4	-11.5	0.0
8	-66.3	0.0	-105.3	-52.3	-10.6	0.0
9	-122.3	0.0	-166.6	-68.7	-21.3	0.0
10	-198.4	0.0	-250.0	-92.2	-34.0	0.0
11	-308.4	0.0	-371.7	-128.9	-51.7	0.0
12	-381.6	0.0	-461.0	-156.5	-64.7	0.0
Total	-2574.3	0.0	-3281.6	-1228.4	-429.9	0.0
During heating	-2335.0	0.0	-3002.8	-1087.8	-413.3	0.0
During cooling	-94.7	0.0	-74.3	-36.5	0.6	0.0
Rest of time	-144.6	0.0	-204.5	-104.1	-17.2	0.0

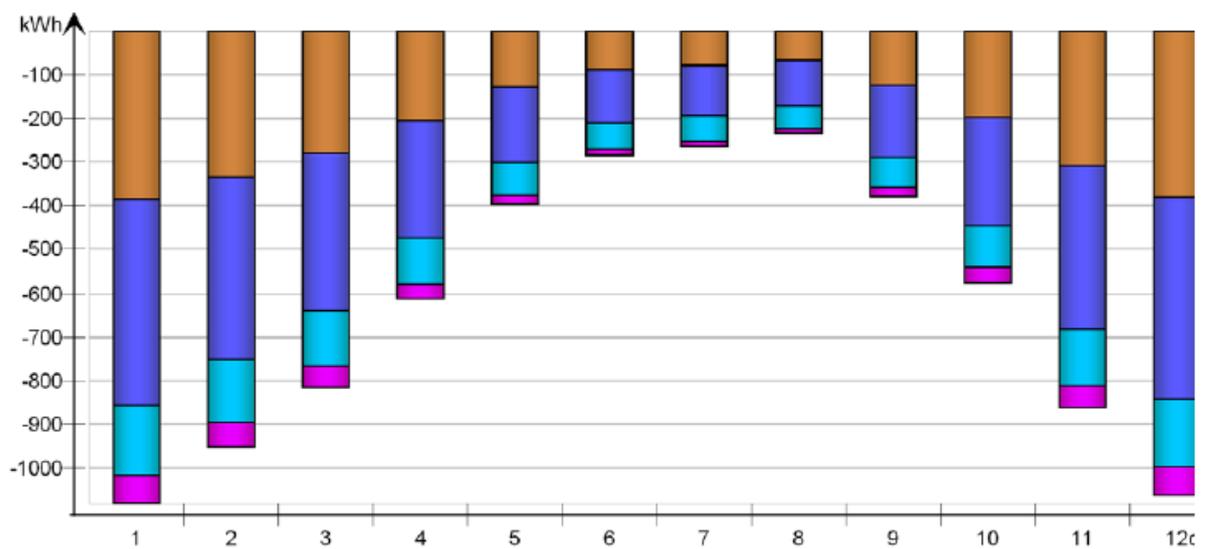


Abbildung 12-10: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im unsanierten Erdgeschoss

kWh

Month	Walls	Roof	Floor	Windows	Doors	Thermal bridges
1	-163.7	0.0	-106.9	-107.8	-67.8	0.0
2	-141.9	0.0	-93.6	-96.2	-58.0	0.0
3	-120.2	0.0	-81.7	-87.3	-49.6	0.0
4	-92.1	0.0	-65.3	-71.6	-36.7	0.0
5	-71.4	0.0	-51.0	-60.7	-27.4	0.0
6	-60.7	0.0	-42.8	-56.0	-23.9	0.0
7	-63.3	0.0	-48.0	-58.8	-24.4	0.0
8	-55.0	0.0	-40.1	-52.6	-22.4	0.0
9	-59.3	0.0	-41.7	-52.3	-26.0	0.0
10	-86.5	0.0	-58.0	-63.9	-36.3	0.0
11	-131.7	0.0	-84.9	-86.9	-53.7	0.0
12	-162.1	0.0	-104.3	-104.9	-66.7	0.0
Total	-1207.9	0.0	-818.3	-898.8	-492.9	0.0
During heating	-897.2	0.0	-567.8	-650.3	-393.3	0.0
During cooling	-223.9	0.0	-194.8	-172.0	-67.6	0.0
Rest of time	-86.8	0.0	-55.7	-76.5	-31.9	0.0

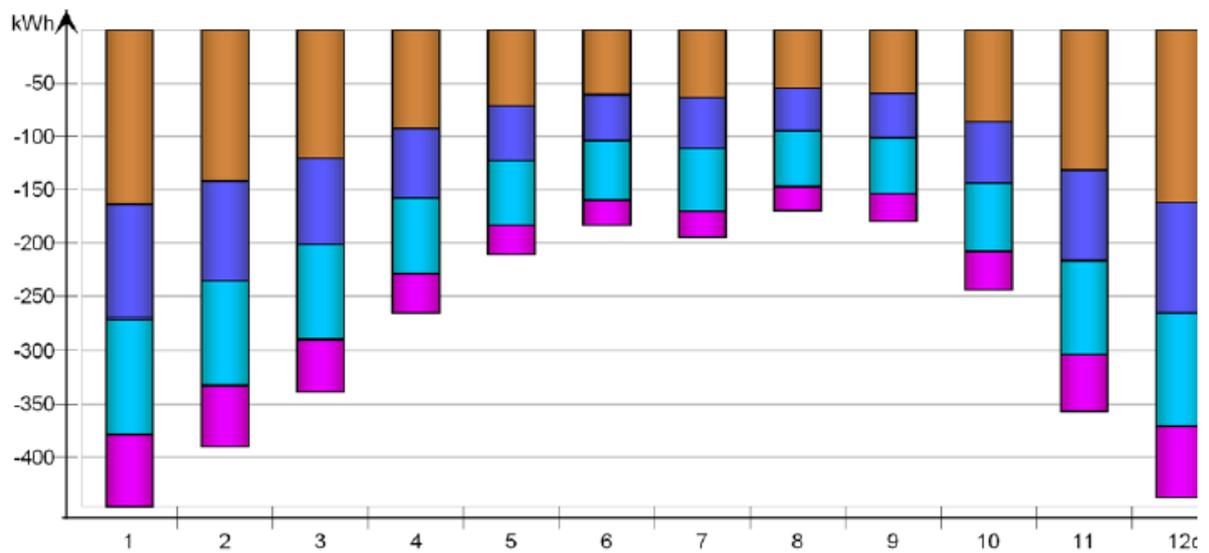


Abbildung 12-11: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im sanierten Erdgeschoss

kWh

Month	Walls	Roof	Floor	Windows	Doors	Thermal bridges
1	-384.1	-818.9	0.0	-222.9	-65.0	0.0
2	-332.1	-720.3	0.0	-199.0	-55.7	0.0
3	-277.1	-627.1	0.0	-176.9	-46.7	0.0
4	-199.5	-474.3	0.0	-138.5	-32.8	0.0
5	-113.0	-305.8	0.0	-95.1	-17.9	0.0
6	-68.0	-207.1	0.0	-71.0	-10.0	0.0
7	-54.1	-189.3	0.0	-67.2	-7.7	0.0
8	-43.9	-179.2	0.0	-57.8	-6.9	0.0
9	-116.7	-313.8	0.0	-90.7	-20.1	0.0
10	-195.6	-461.3	0.0	-126.4	-33.3	0.0
11	-305.6	-656.6	0.0	-178.5	-51.1	0.0
12	-379.4	-802.7	0.0	-217.2	-64.0	0.0
Total	-2469.2	-5756.4	0.0	-1641.4	-411.4	0.0
During heating	-2315.0	-5519.4	0.0	-1536.7	-415.0	0.0
During cooling	-57.1	-37.3	0.0	-20.0	4.4	0.0
Rest of time	-97.1	-199.7	0.0	-84.7	-0.8	0.0

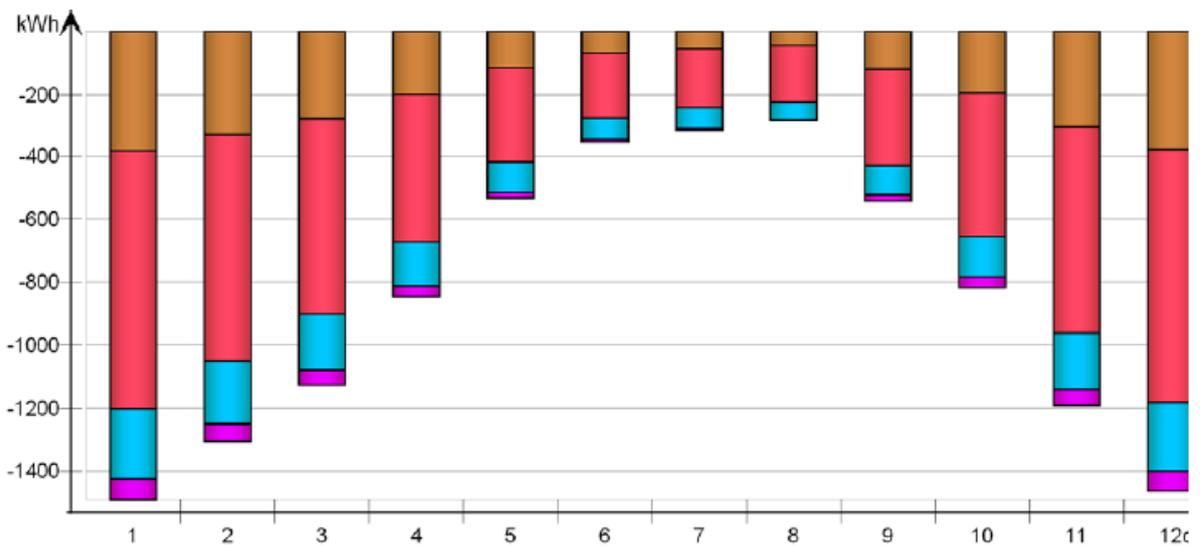


Abbildung 12-12: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im unsanierten Obergeschoss

kWh

Month	Walls	Roof	Floor	Windows	Doors	Thermal bridges
1	-123.7	-125.9	0.0	-219.8	-64.6	0.0
2	-107.3	-110.0	0.0	-195.8	-55.2	0.0
3	-90.6	-97.1	0.0	-176.4	-47.0	0.0
4	-69.0	-77.2	0.0	-143.1	-34.5	0.0
5	-49.2	-58.4	0.0	-113.5	-23.5	0.0
6	-38.5	-47.5	0.0	-98.5	-18.2	0.0
7	-37.6	-49.7	0.0	-100.8	-17.7	0.0
8	-32.4	-44.0	0.0	-88.3	-16.1	0.0
9	-42.8	-53.3	0.0	-99.6	-23.1	0.0
10	-64.8	-73.2	0.0	-128.7	-34.4	0.0
11	-99.3	-101.8	0.0	-176.9	-51.1	0.0
12	-122.6	-123.0	0.0	-213.9	-63.6	0.0
Total	-877.9	-961.1	0.0	-1755.3	-448.9	0.0
During heating	-705.6	-730.8	0.0	-1382.2	-389.4	0.0
During cooling	-82.9	-136.6	0.0	-146.2	-16.7	0.0
Rest of time	-89.4	-93.7	0.0	-226.9	-42.8	0.0

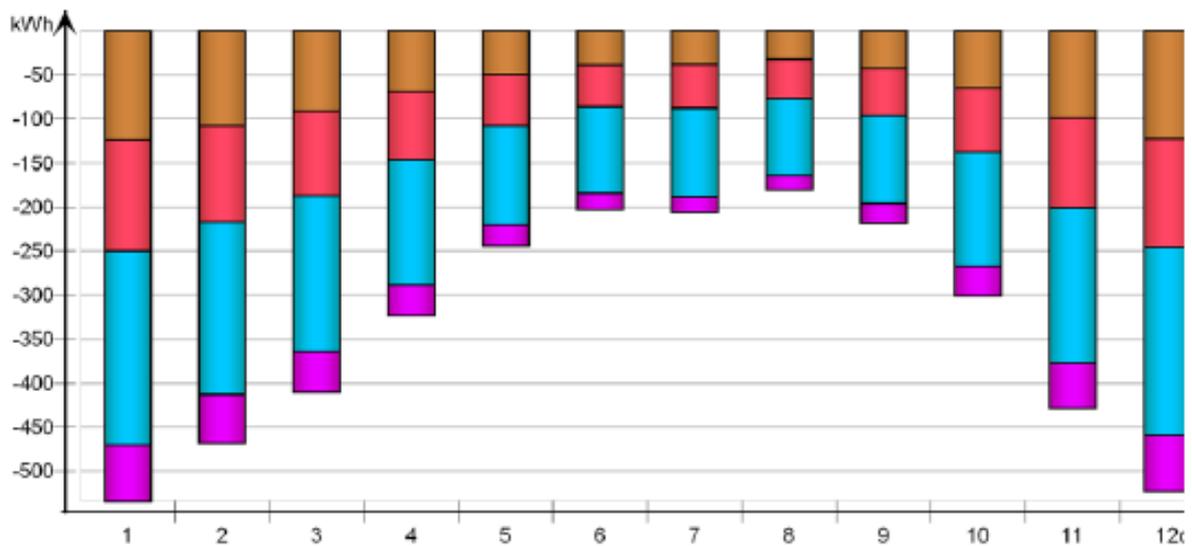


Abbildung 12-13: Transmissionswärmeverluste über Gebäudehülle im sanierten Obergeschoss

12.3. Vergleich mit Messwerten

Zum Vergleich wurden die Messwerte von Mai 2011 bis einschließlich Oktober 2011, also vor der Sanierung, im Fensterbereich durch Sensor ATAH1109 mit den Ergebnissen für die Fensteroberflächentemperaturen nach IDAICE für den unsanierten Zustand verglichen. Da in IDAICE eine konstante Innenraumtemperatur von 20°C gefahren sowie ein Klimareferenzjahr verwendet wird und die gerechneten Werte auf der Fensteroberfläche innenseitig, die gemessenen jedoch im Scheibenzwischenraum liegen, weichen die Werte voneinander ab. Dennoch lässt sich eine vergleichbare Tendenz erkennen (Abbildung 12-4).

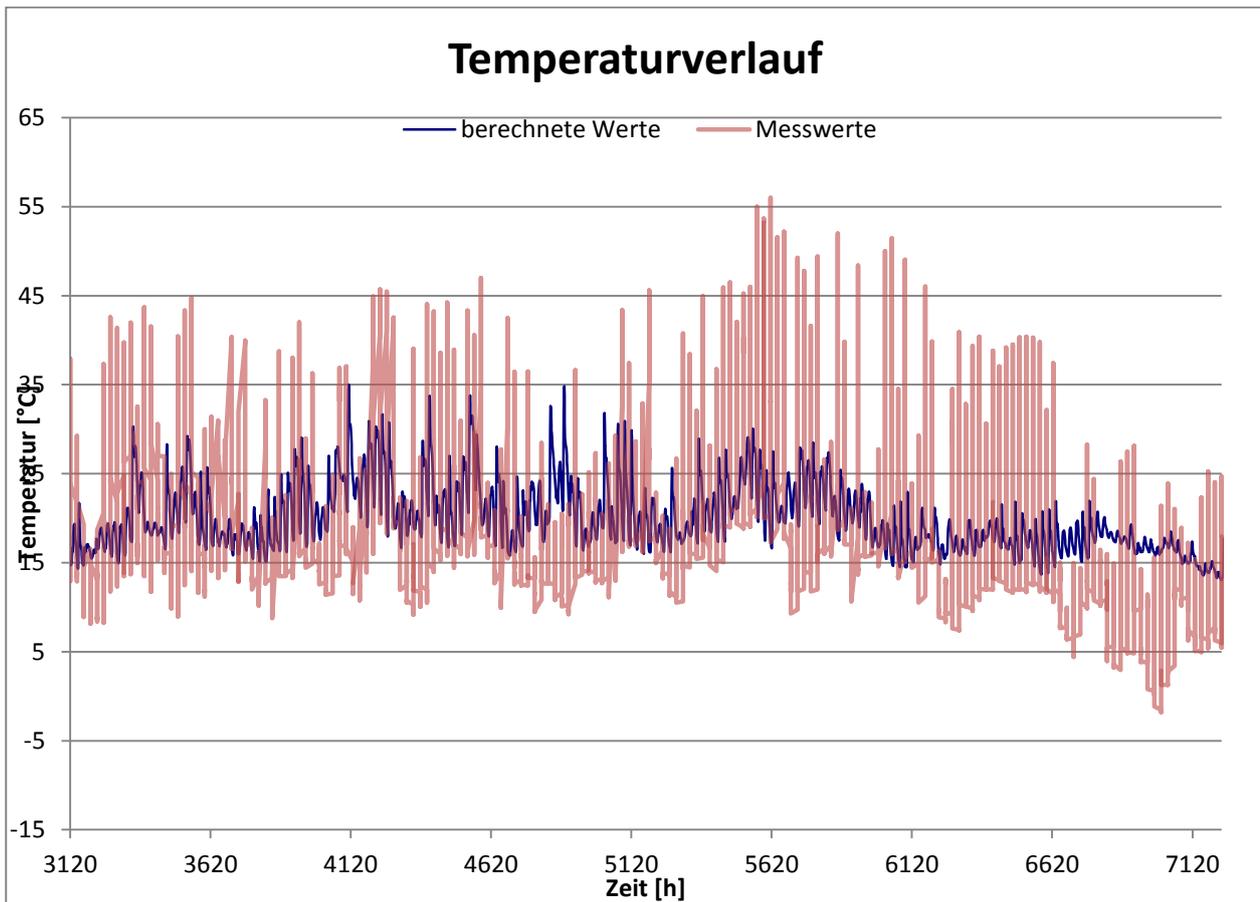


Abbildung 12-14: Vergleich gemessene und berechnete Temperaturen im Fensterbereich

13. Thermisch-hygrische Berechnungen mit DELPHIN

13.1. DELPHIN

Zur thermisch-hygrischen Beurteilung der Sanierungsmaßnahmen und theoretischer, alternativer Maßnahmen wurden Simulationen mithilfe der Software DELPHIN der TU Dresden in der Version 5.6.5, welche das Modell des instationären, gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Salz- und Lufttransport in kapillarporösen Baustoffen verwendet, durchgeführt.

Die im Programm verwendete Theorie des Wärme- und Feuchtetransportes geht weiter über das der gängigen Normung (z.B. nur die Wasserdampfdiffusion berücksichtigendes Glaser-Verfahren mit stationären Randbedingungen nach DIN 4108-3) hinaus. Beispielsweise wird zwischen gasförmigem und flüssigem Wasser unterschieden, weshalb etwa für nach dem Glaser-Verfahren kritische Feuchtegehalte im Rahmen des verwendeten (realistischeren) Modells geringere Bauteilfeuchten resultieren. Außerdem können weitere Randbedingungen wie Schlagregen oder Strahlungskomponenten berücksichtigt werden.

Das Baustoffmodell setzt grundsätzlich voraus, dass es sich bei den transportierten Energien sowie den Wasser-, Luft- und Salzmoleküle um Erhaltungsgrößen handelt, d.h. wenn keine inneren Wärmequellen vorliegen (z.B. in einer Wand verlegte Leitungen), die in ein definiertes Referenzvolumen eintretenden Größen gleich den austretenden sind. Über diese Erhaltungsgleichungen lassen sich in Kombination mit den Gesetzen der Thermodynamik (Übergängen zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Phase) Differenzialgleichungen aufstellen, durch deren Integration sich der zeitliche Verlauf der beschriebenen Größen im betrachteten Referenzvolumen darstellen lässt.

13.2. Klimatische Randbedingungen

13.2.1. Innenklima

Das Raumklima wurde nach WTA-Merkblatt 6-2-01 [36] in Form einer Sinuskurve auf Grundlage von Monatsmittelwerten und erwarteter Amplitude abgebildet (s. Tabelle 13.1), wobei von einer normalen Feuchtelast ausgegangen wurde.

Tabelle 13.1: Raumklimabedingungen nach WTA-Merkblatt 6-2-01 [36]

	Temperatur [°C]	Rel. Feuchte [%]		
		Feuchtelast		
		niedrig	normal	hoch
Mittelwert	21	45	50	55
Amplitude	1	15	10	5
Minimum	20	30	40	50
Maximum	22	60	60	60
Zeitpunkt des Maximums	Juni	August	August	August

In Abbildung 13-1 und Abbildung 13-2 sind die Jahresverläufe der Raumklimabedingungen dargestellt. Um die Maxima in den nach Tabelle 13.1 anzusetzenden Zeitpunkten zu erhalten, war bei der Temperatur eine Phasenverschiebung der Sinuskurve von 0,8 Jahren und bei der Raumluftfeuchte von 0,65 Jahren erforderlich.

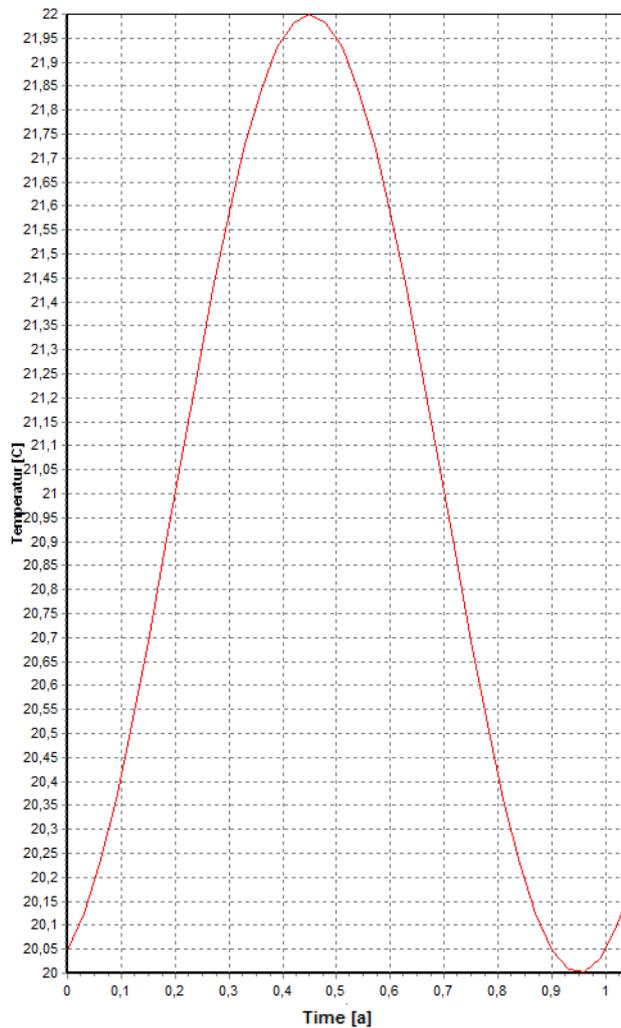


Abbildung 13-1: Jahresverlauf Innentemperatur

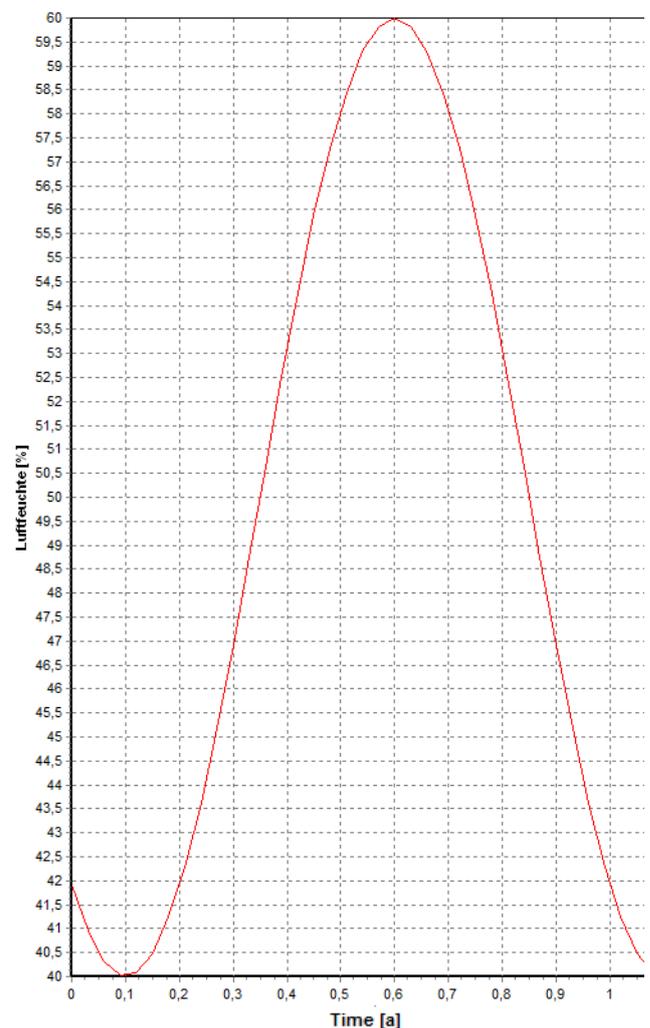


Abbildung 13-2: Jahresverlauf Innenluftfeuchte

13.2.2. Außenklima

Gemäß WTA-Merkblatt 6-2-01 [36] sind für thermisch-hygrische Simulationsberechnungen Stundenmittelwerte von Außenlufttemperatur, Strahlung, Außenluftfeuchte und Niederschlag erforderlich. Hinsichtlich des Niederschlages erfolgt die Modellierung der Schlagregenbelastung über die Windgeschwindigkeit sowie die Niederschlagsmenge auf eine horizontale Fläche.

Um die notwendigen meteorologischen Daten zu erhalten, wurde ein Test-Referenz-Jahr TRY für den Standort Appenzell mithilfe von METEONORM kreiert. Bei den Strahlungswerten wurden die Jahre 1981-200, für alle übrigen Werte die Jahre 1996-2005 herangezogen. Die Übermittlung der konvertier-

ten Daten in das für DELPHIN erforderliche Format *.ccd erfolgte durch die TU Dresden durch Herrn Bishara Anfang August.

Zu beachten ist, dass es sich bei einem TRY um ein „künstliches“ Referenzklima handelt, das mittlere Klimaverhältnisse widerspiegelt, weshalb in der Realität kritische Feuchtesituationen entstehen können, über welche die durchgeführte Simulation nur bedingte Aussagen treffen kann.

Die Niederschlagsmenge von 1336 l/m²a entspricht der höchsten Schlagregenbeanspruchungsgruppe III nach WTA-Merkblatt 8-1 [34]. Die exponierte Lage verstärkt die ohnehin sehr hohe Schlagregenbeanspruchung zusätzlich. Dementsprechend sind bereits im Bestand in Form von Verschindelungen Maßnahmen zum konstruktiven Schlagregenschutz vorzufinden.

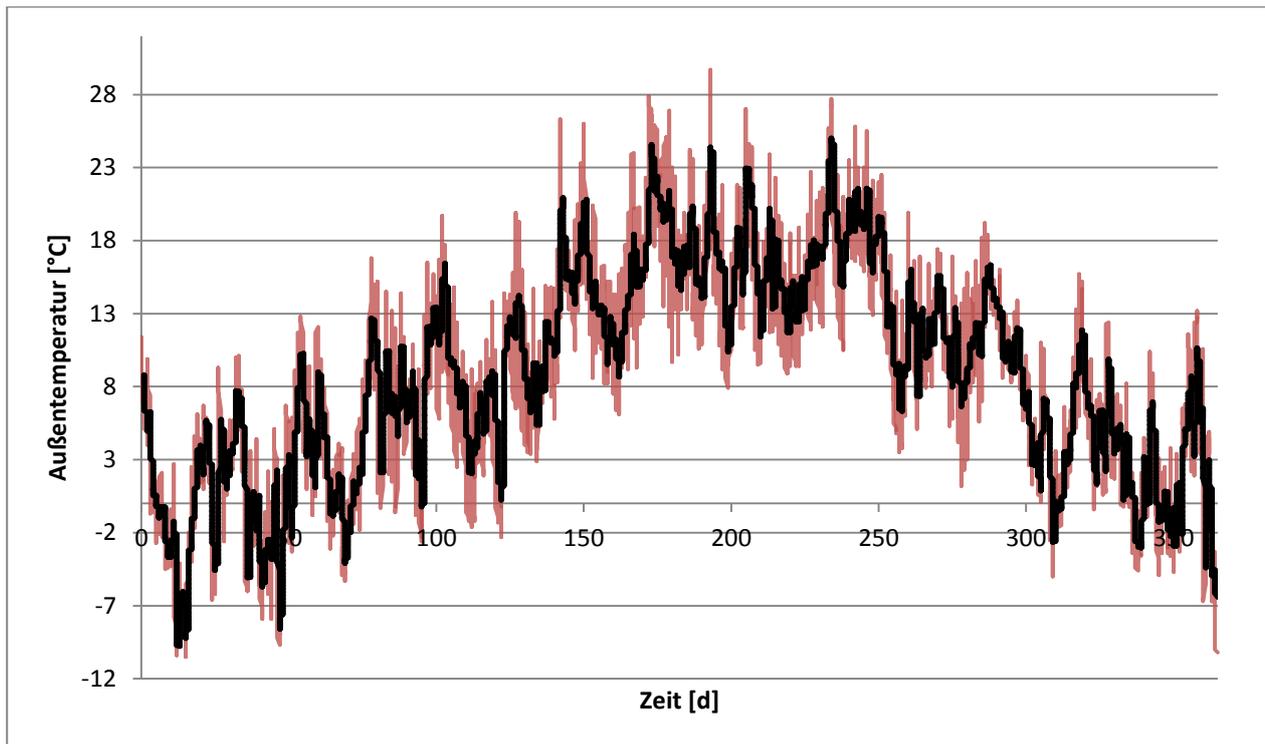


Abbildung 13-3: Außentemperatur im Jahresverlauf (Stundenwerte rot, Tagesmittelwerte schwarz)

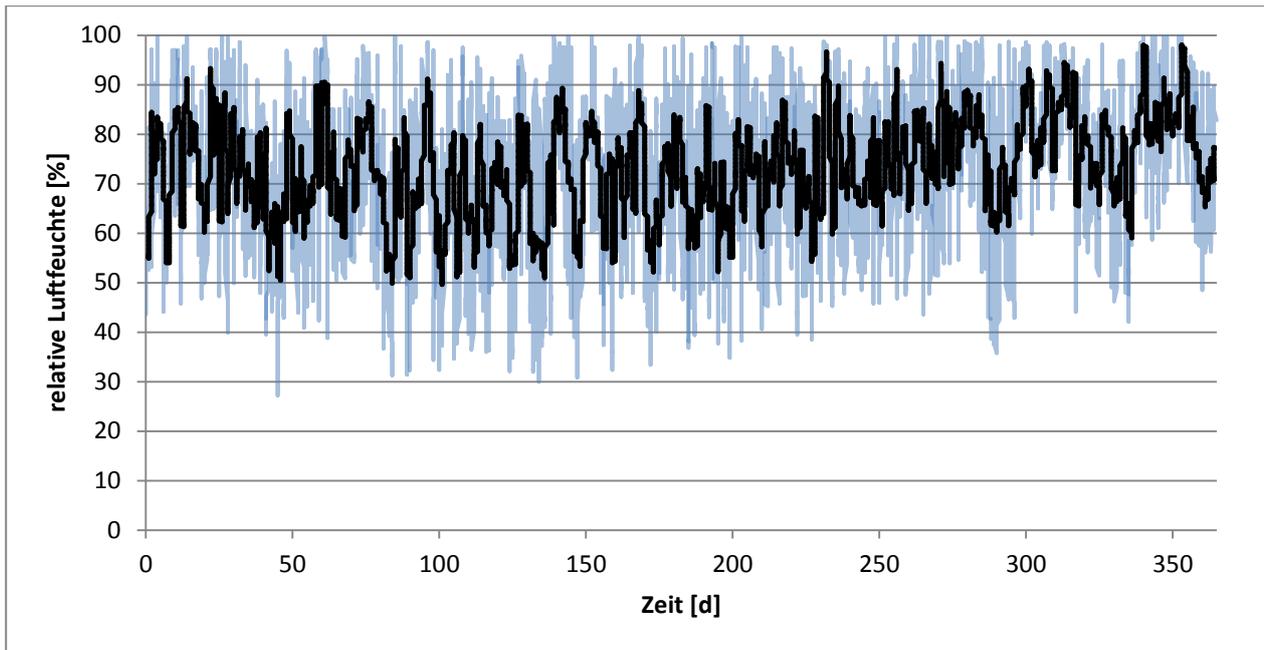


Abbildung 13-4: Außenluftfeuchte im Jahresverlauf (Stundenwerte blau, Tagesmittelwerte schwarz)

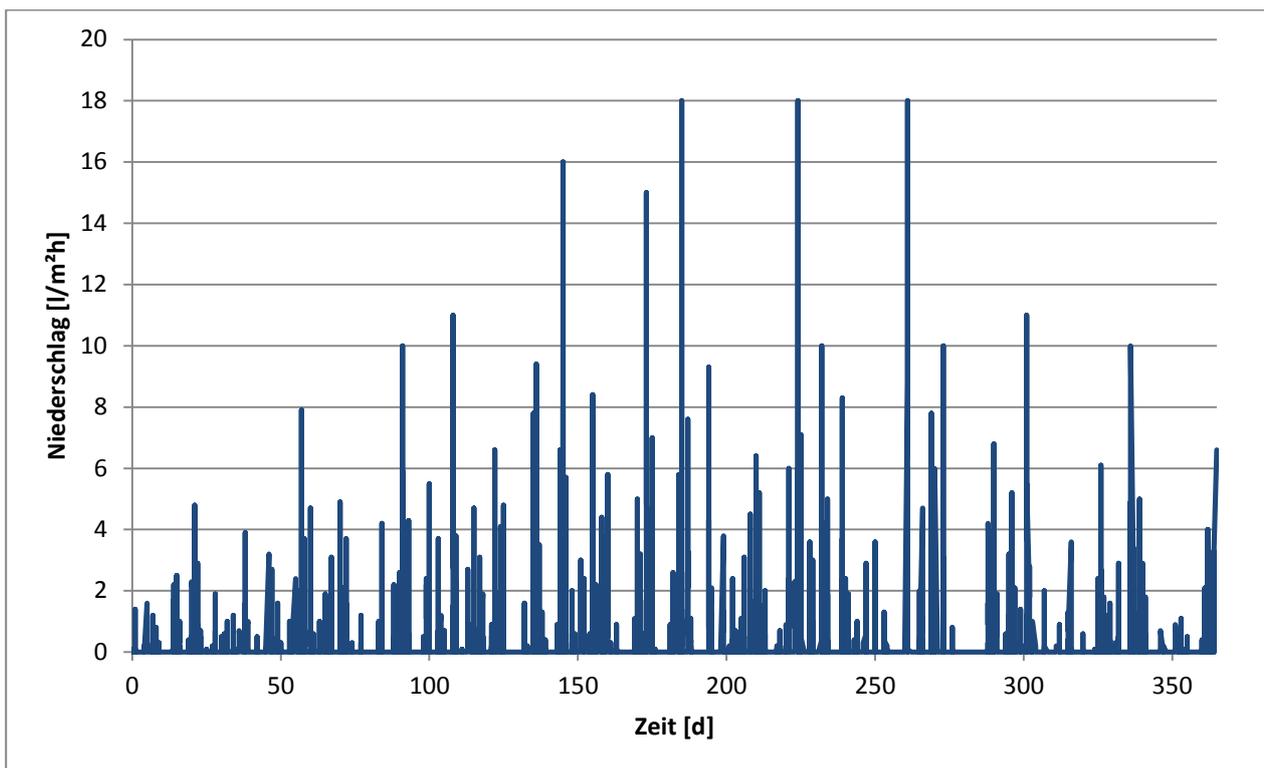


Abbildung 13-5: Niederschlagsmengen (auf horizontale Fläche) im Jahresverlauf

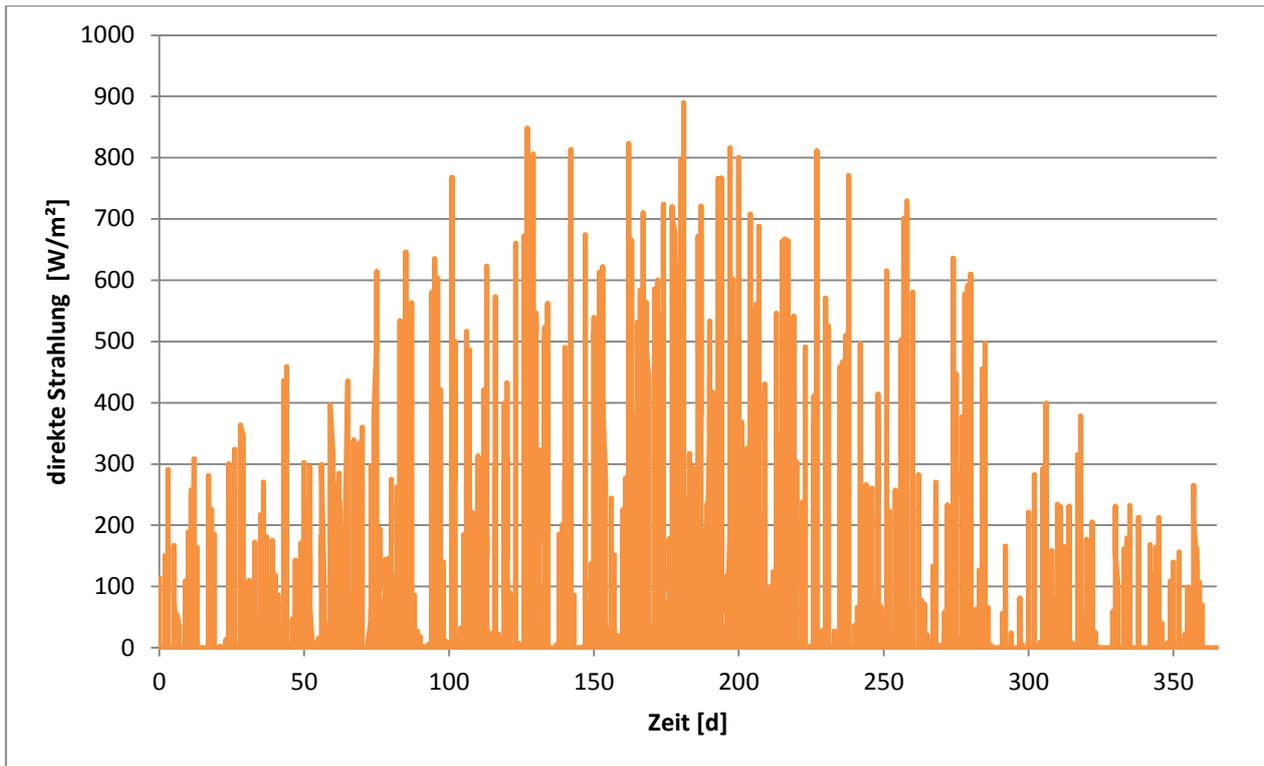


Abbildung 13-6: direkte Strahlung (auf horizontale Fläche) im Jahresverlauf

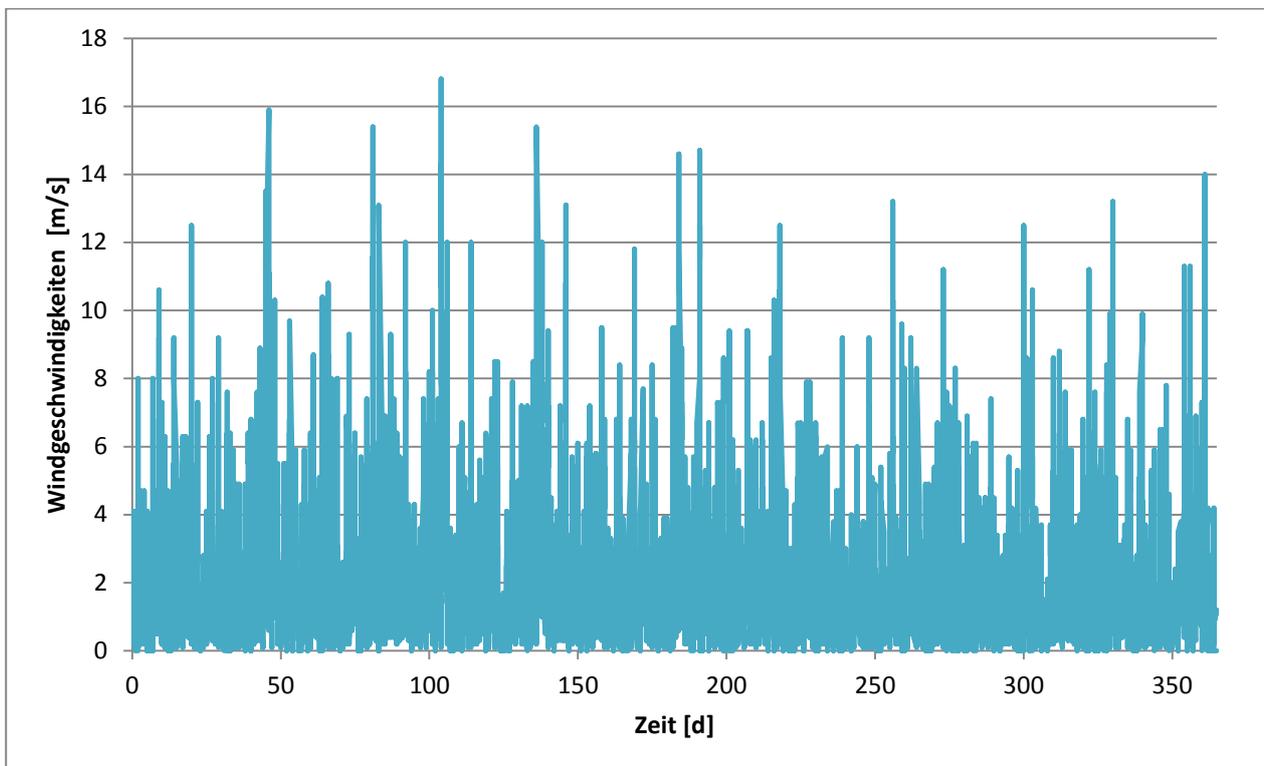


Abbildung 13-7: Windgeschwindigkeiten im Jahresverlauf

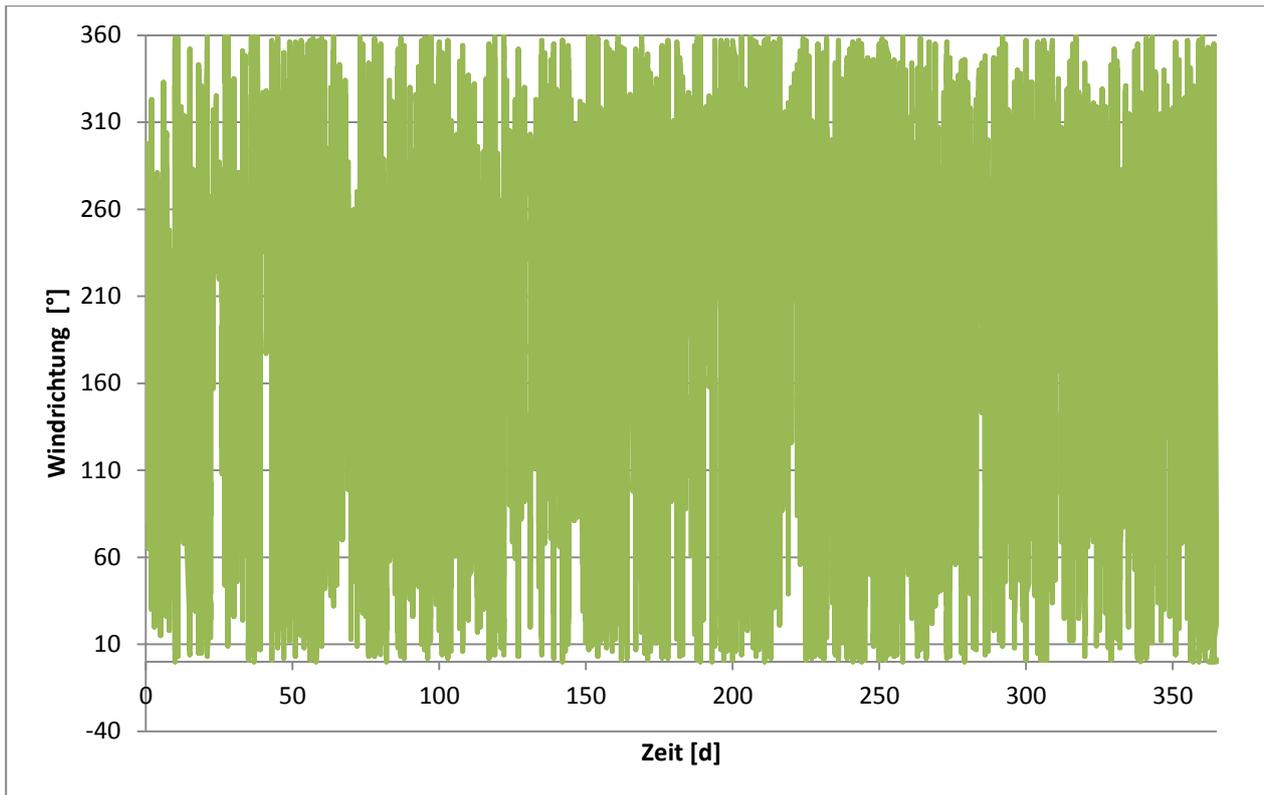


Abbildung 13-8: Windrichtungen im Jahresverlauf: Nordwind 90°, Ostwind 90°, Südwind 180°, Westwind 270°

13.2.3. Wärme- und Feuchteübertragung an den Bauteilgrenzen

Das WTA-Merkblatt 6-2-01/D [36] schlägt hier die Werte gemäß Tabelle 13.2 vor. Da sich das vorliegende Gebäude jedoch in exponierter Lage befindet, wurde der erhöhte Wärmeübergangskoeffizient nach DELPHIN-Empfehlung von $25 \frac{W}{m^2K}$ (außen) angesetzt. Innen sind DELPHIN-Empfehlung und WTA-Angabe identisch, so dass hier $8 \frac{W}{m^2K}$ berücksichtigt wurden.

Da in DELPHIN die Berücksichtigung des Wasserdampfübergangs über den Austauschkoefizienten erfolgt, wurden die voreingestellten Werte von $2 \cdot 10^{-7} \frac{S}{m}$ (außen) bzw. $3 \cdot 10^{-8} \frac{S}{m}$ (innen) übernommen.

Tabelle 13.2: Wärme- und Wärmeübergangskoeffizienten nach WTA-Merkblatt 6-2-01/D [36]

Bauteiloberfläche	Wärmeübergang α [W/m ² K]	Wasserdampfübergang β_p [kgm ² sPa]
außen	17	$75 \cdot 10^{-9}$
innen	8	$25 \cdot 10^{-9}$

13.3. Geometrische Randbedingungen und Bauteilquerschnitte

Die Lösung der dem Programm zugrundeliegenden Differentialgleichungen erfolgt mit der Finite-Differenzen-Methode² (FDM).

Hierbei wird das Bauteil mit einem aus senkrecht aufeinander stehenden Linien in x- und y-Richtung belegt und somit rechteckige Gitterzellen generiert. Bei der Anwendung der FDM werden nun an den Übergängen zwischen den Gitterzellen die Ableitungen der Differentialgleichungen durch algebraische Gleichungen (Differenzen) angenähert. [37]

Die Erzeugung des Gitters erfolgte automatisch und variabel. Hierbei werden die Schichtenübergänge sowie Bereiche gegen Randbedingungen aufgrund der zu erwartenden höheren Gradienten feiner diskretisiert. Um die Rechenzeit zu optimieren, wurden im Bereich der Schnittebenen von Bauteilen die Elementgrößen erhöht, da dort näherungsweise von eindimensionalen Transportvorgängen ausgegangen werden kann.

Da verschiedene Randbedingungen wie z.B. Strahlung und Schlagregen von der Orientierung (Himmelsrichtung) und Neigung der betrachteten Bauteile abhängig sind, war auch dies zu berücksichtigen.

Hinsichtlich des Fassadenaufbaus ist die genaue Konstruktion ungewiss. Für eine genaue Beurteilung käme bestenfalls eine nicht-zerstörende Untersuchung mittels Endoskopie in Frage. Vermutlich wird der genaue Wandaufbau jedoch erst im Rahmen des Rückbaus ersichtlich.

Anhand der Einblicke durch die teilweise fehlende Verschindelung an der Nordwestecke des Bauwerkes wird von einer hinterlüfteten Konstruktion mit auf Konterlattung angebrachter Sparschalung, auf welcher die Verschindelung angebracht wurde, ausgegangen. Wie Abbildung 13-9 zu entnehmen ist, beträgt die Dicke der Sparschalung etwa 20mm. Für die darunter befindliche Luftschicht bzw. Konterlattung wurde ebenfalls von 20mm Stärke ausgegangen, da die Gesamtstärke von Strick bis Verschindelung zu etwa 50mm gemessen wurde (Abbildung 13-10). Die Dicke der Verschindelung wurde mit den gemessenen 2mm angesetzt.

² Auskunft Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger, Institut für Bauklimatik, TU Dresden



Abbildung 13-9: Stärke Sparschalung



Abbildung 13-10: Abstand Verschindelung zur Strickoberfläche

Folgender Abbildung 13-11 kann der grundsätzliche Wandaufbau im Längsschnitt vor der Sanierung mit seiner Darstellung in DELPHIN entnommen werden. Es wurde hierbei ein Wandabschnitt der Höhe 1m der am stärksten witterungsbeanspruchten Nordwand gewählt. Im Erdgeschoss befindet sich hierbei eine Holzverkleidung, welche lediglich über eine Querlattung (etwa in Wandmitte, s. Abbildung 13-12) fixiert wird. Im Obergeschoss ist auf der Rauminnenseite direkt die Strickkonstruktion sichtbar.

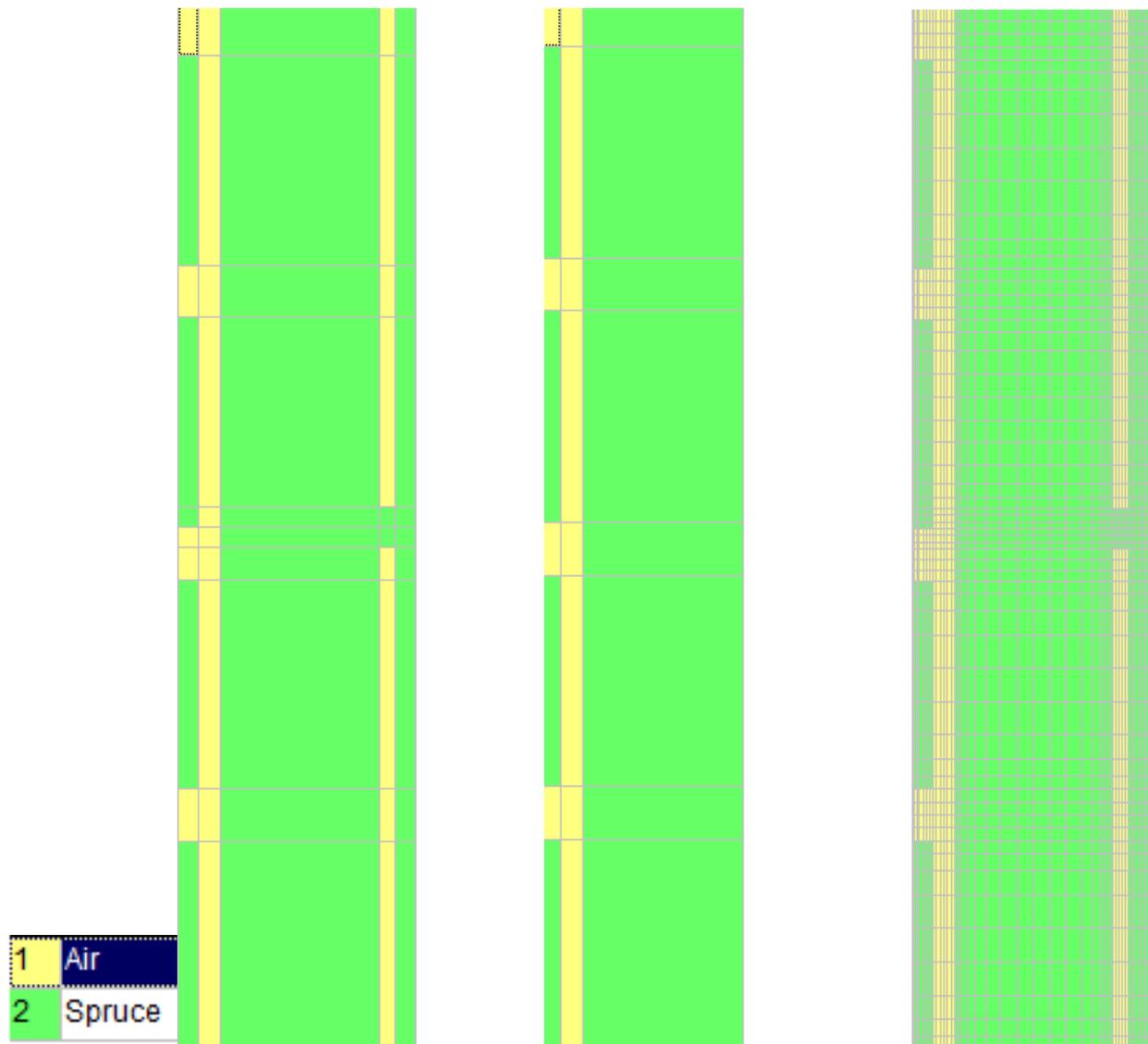


Abbildung 13-11: Wandaufbau EG (links), OG (Mitte) sowie generiertes Gitter EG (rechts) in DELPHIN



Abbildung 13-12: Querlattung in Wandmitte hinter Holzverkleidung

Für die betrachtete nordöstliche Außenwanddecke war noch ein Wandabschnitt der Westwand abzubilden. Auch hier ist die genaue Konstruktion unbekannt. Es wird hier davon ausgegangen, dass die gestemmen Täfer auf einer senkrechten Lattung ohne Konterlattung angebracht sind.

Demgemäß folgt der Wandaufbau der betrachteten Außenecke wie Abbildung 13-13 zeigt.

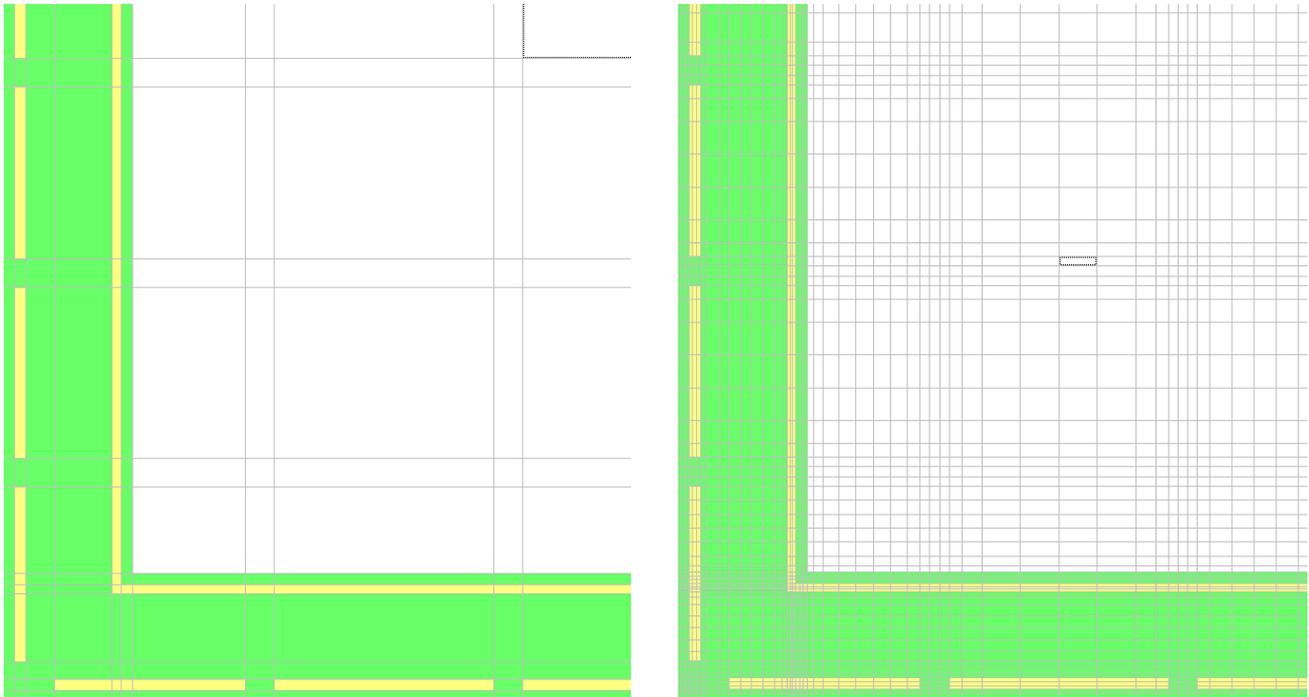


Abbildung 13-13: Außenecke Nordost ohne (links) und mit Gitter (rechts)

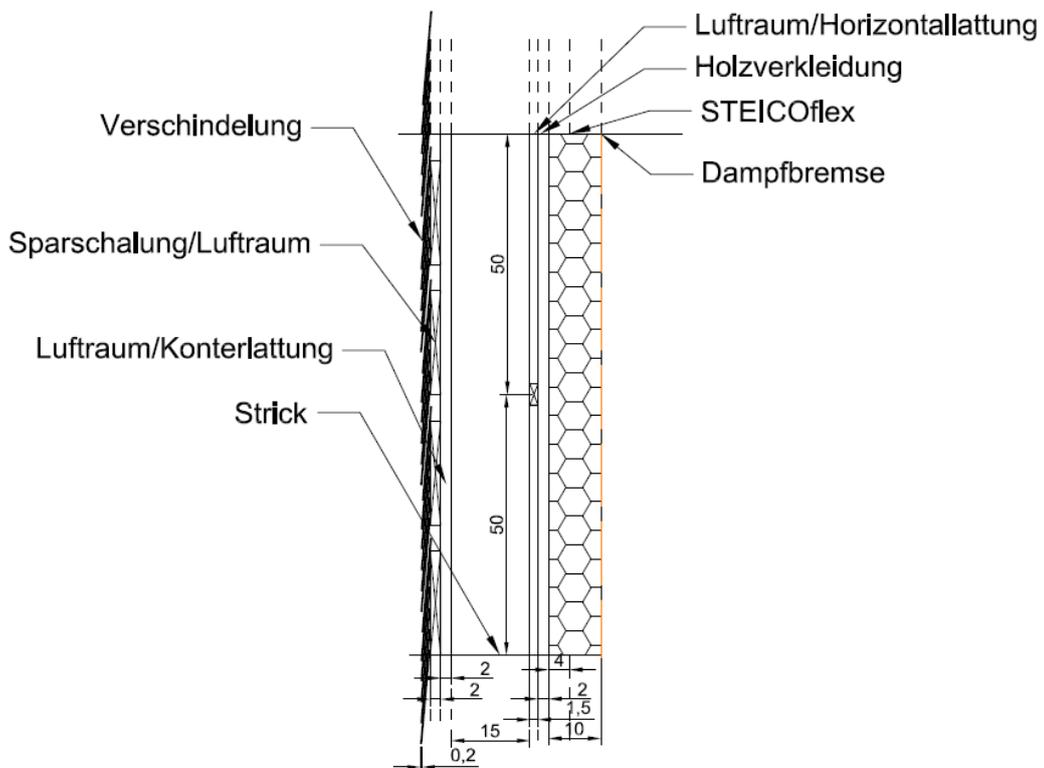


Abbildung 13-14: untersuchter Wandquerschnitt EG Nord nach Sanierung (Maße in cm)

13.4. Testrechnungen

Da die Klimadaten des Objektes zunächst nicht vorlagen, erfolgten diverse Testrechnungen mit Münchner Klimarandbedingungen.

Die Ergebnisse untereinander sind nur innerhalb der einzelnen betrachteten Fälle (z.B. EG vs. OG, Nord vs. Ost) vergleichbar, aber nicht untereinander (z.B. EG vs. Nord), da teilweise andere Konstruktionen (vor oder nach Sanierung) oder Randbedingungen angesetzt wurden oder der untersuchte Zeitraum ein anderer ist.

Die Testrechnungen wurden dabei zunächst am ungestörten Wandquerschnitt Nord vor Sanierung durchgeführt. Wie Abbildung 13-15 zeigt, treten bei den Feuchtegehaltsintegralen erhebliche Unterschiede zwischen täglicher und stündlicher Ausgabe auf, bei den Luftfeuchten und Temperaturen jedoch nicht (s. Abbildung 13-16). Dementsprechend wurde für Integrale und Mittelwerte die stündliche Ausgabe gewählt. Hinsichtlich kompletter Temperatur-, Wassergehalts- und Feuchtefelder wurde der Empfehlung des DELPHIN-Handbuchs [10] gefolgt und eine tägliche Ausgabe gewählt.

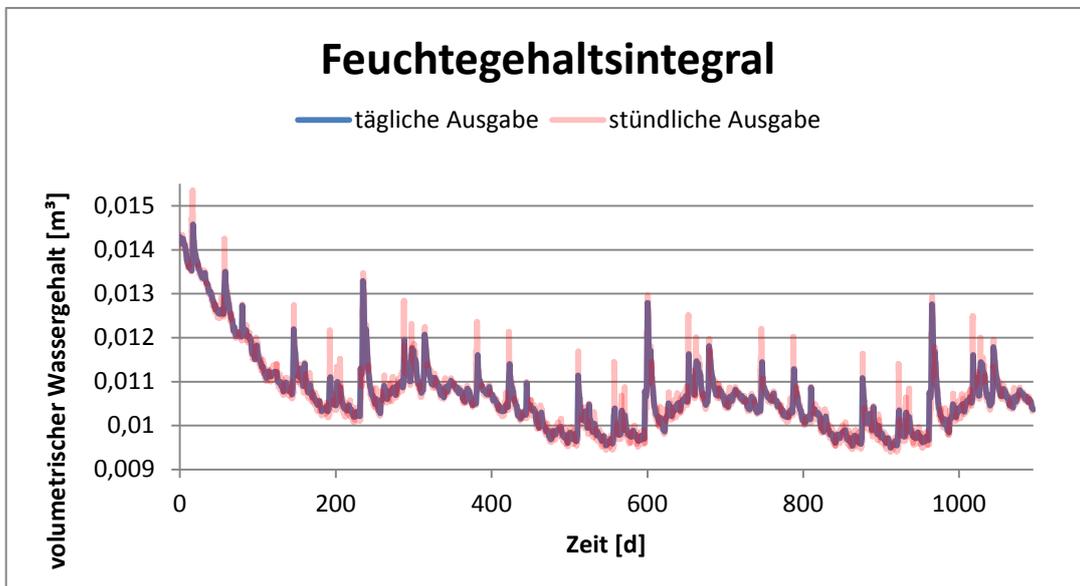


Abbildung 13-15: Feuchtegehaltsintegral der Konstruktion bei stündlicher und täglicher Ausgabe

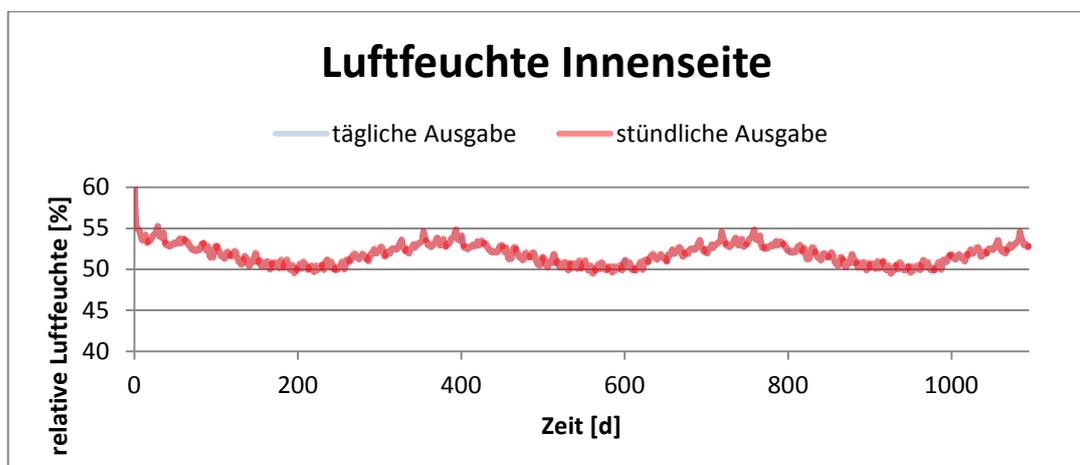


Abbildung 13-16: relative Luftfeuchte Innenoberfläche bei täglicher und stündlicher Ausgabe

Da sich die Konstruktionen der untersuchten Räume in Erdgeschoss und Obergeschoss (keine raumseitige Holzverkleidung) unterscheiden, wurde auch dieser Aspekt berücksichtigt.

Der volumetrische Wassergehaltswert im Strick unterscheidet sich hierbei um bis zu etwa 4%, wobei er im Erdgeschoss größer ist (s. Abbildung 13-17). Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Erdgeschoss aufgrund der Luftschicht zwischen Holzverkleidung und Strickoberfläche die Oberflächentemperatur des Stricks geringer ist als im OG, wo der Strick die Wandoberfläche darstellt, und somit die mögliche raumseitige Austrocknung geringer ist. Beispielsweise herrschen am Tag mit der größten prozentualen Abweichung, dem 25. März (Tag 2273 im 7. Jahr), im OG 20,6°C, im EG 14,5°C. Abgesehen vom Sommer, in dem sich die wie in Abbildung 13-17 zu sehen die Wassergehalte, aber auch die Temperaturen, in EG und OG deutlich angleichen, sind höhere Temperaturen an der Strickoberfläche im OG der Regelfall (Abbildung 13-18).

Die Wassergehaltswerte in der Holzfaserdämmplatte STEICOflex sind die meiste Zeit des Jahres im OG höher als im EG (s. Abbildung 13-19). Lediglich um den 12. September (2444. Tag des 7. Jahres) beträgt die Abweichung nahezu 0%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im OG keine kapillarbrechende Luftschicht vorhanden ist und somit von außen eindringende Feuchte ungehindert bis in die Holzfaserdämmplatte eindringen kann.

Die relativen Feuchten sowie die Temperaturen auf den raumseitigen Oberflächen unterscheiden sich kaum (s. Abbildung 13-20 sowie Abbildung 13-21).

Aus den zuvor aufgeführten Gründen werden verstärkt die Wandquerschnitte im Obergeschoss untersucht, zumal der Rechenaufwand hier etwas geringer ist und es sich um die Verkleidung im EG ohnehin um eine Konstruktion handelt, die nicht denkmalgeschützt ist sowie schon vom nächsten Bewohner leicht wieder entfernt werden könnte. Hinzu kommt, dass Luftschichten hinter nachträglichen Innendämmungen als kritisch zu betrachten sind [33]. So kann von innen nach außen diffundierende Feuchte innerhalb der Luftschicht wandern und sich an Wärmebrücken (z.B. Ecken) konzentrieren und niederschlagen. Daher sollten sie grundsätzlich entfernt oder mit einer saugfähigen Kerndämmung versehen werden.

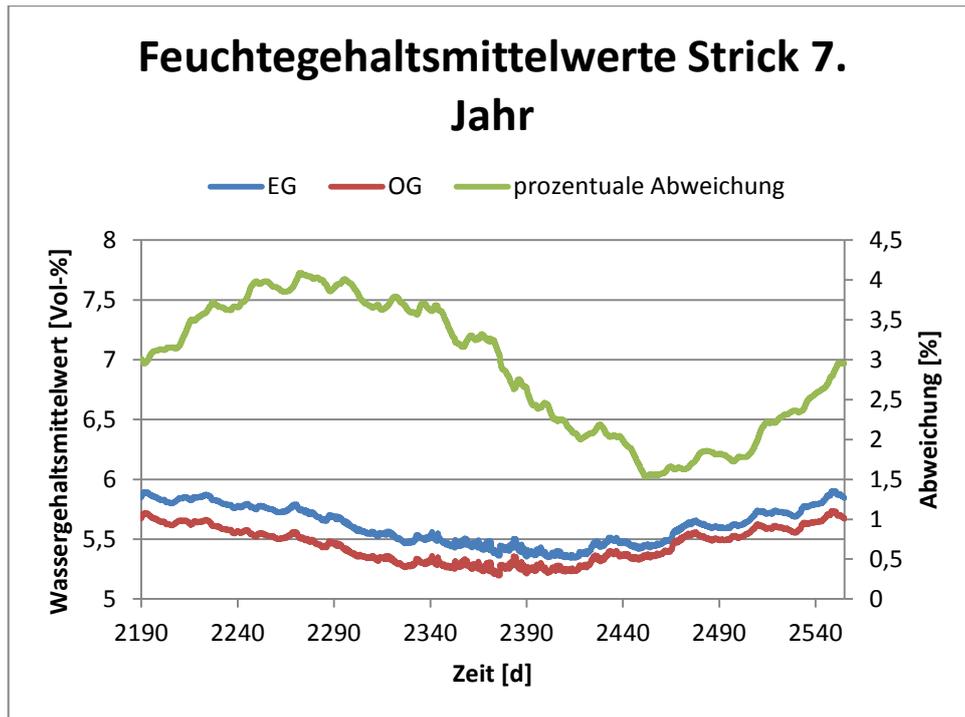


Abbildung 13-17: Feuchtegehaltsmittelwerte im Strick im Jahresverlauf (Jahr 7) in EG und OG mit prozentualer Abweichung

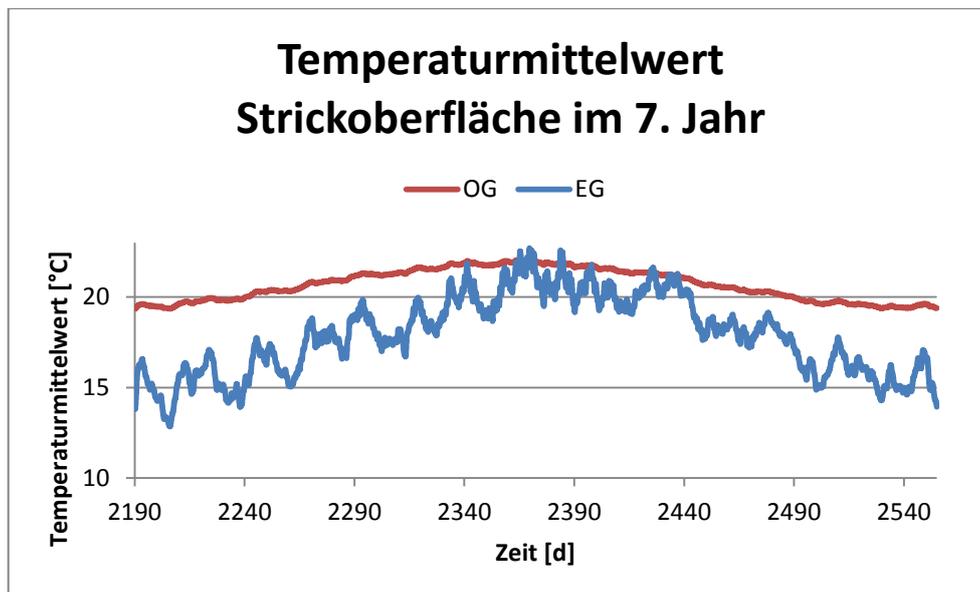


Abbildung 13-18: Temperaturmittelwerte im Strick im Jahresverlauf (Jahr 7) in EG und OG

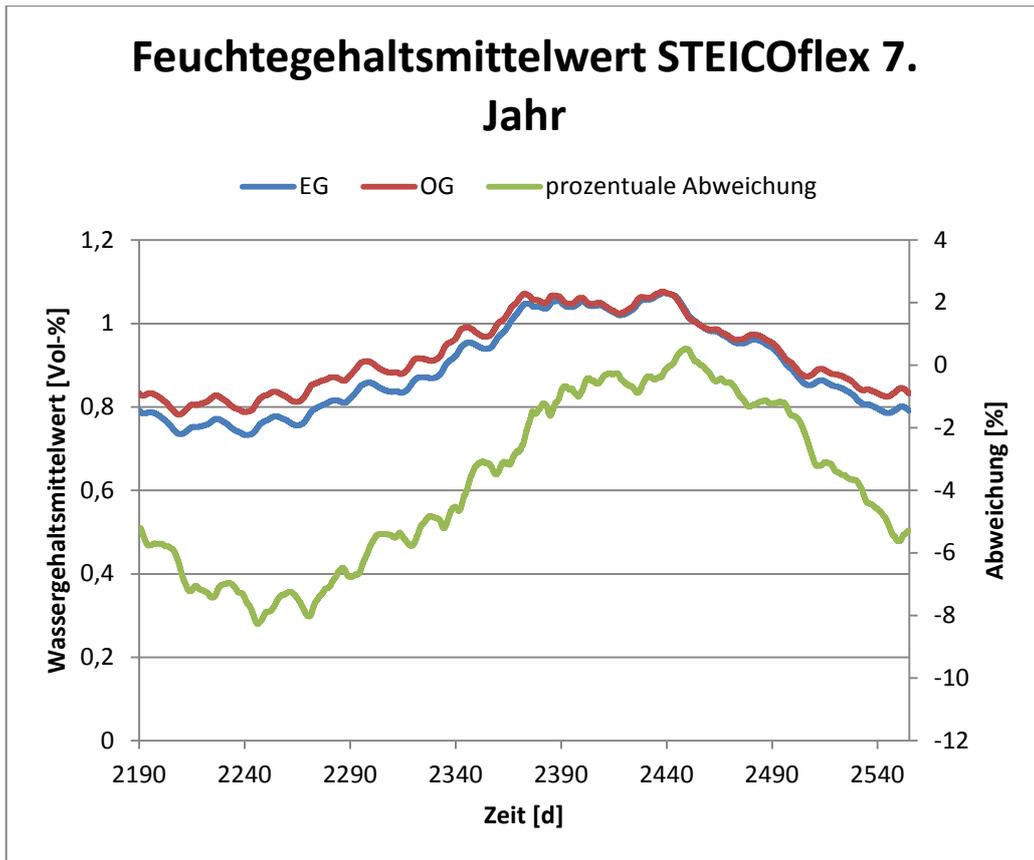


Abbildung 13-19: Feuchtegehaltsmittelwerte STEICOflex im Jahresverlauf (Jahr 7) in EG und OG sowie prozentuale Abweichung

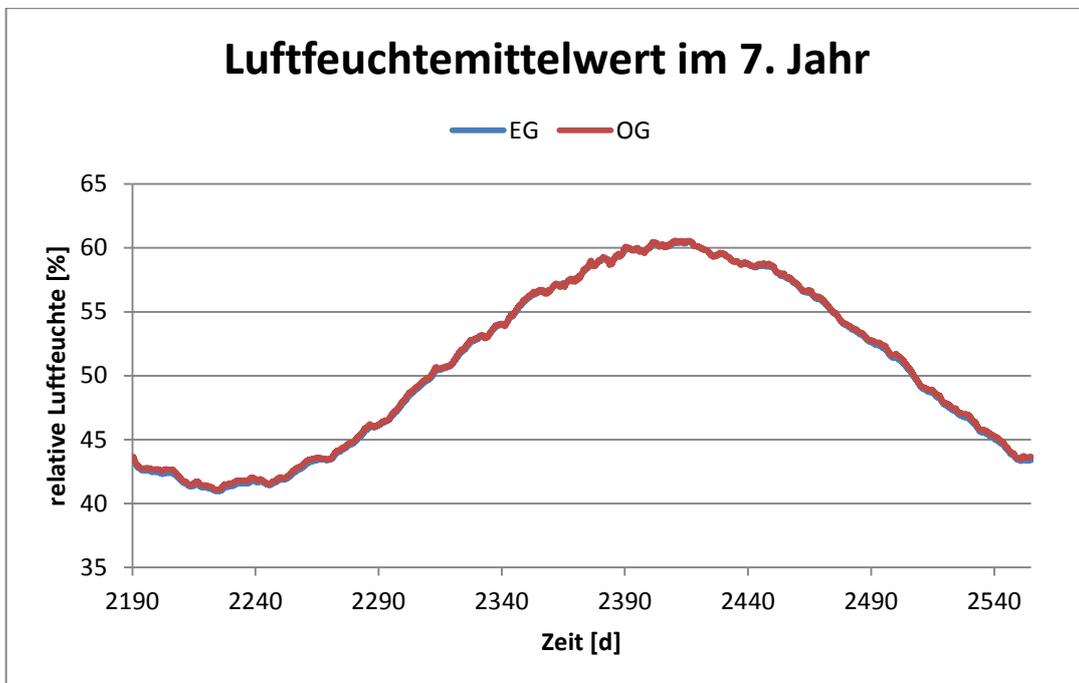


Abbildung 13-20: Luftfeuchtemittelwert Innenoberfläche im Jahresverlauf (Jahr 7) in EG und OG

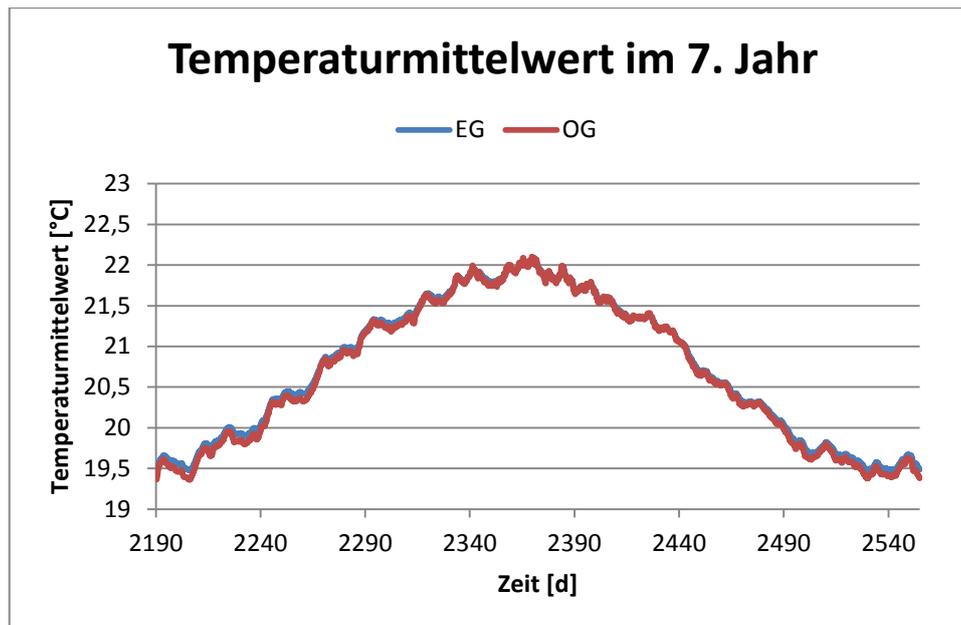


Abbildung 13-21: Temperaturmittelwert Innenoberfläche im Jahresverlauf (Jahr 7) in EG und OG

Zur Feststellung der detailliert zu untersuchenden Wandquerschnitte in Abhängigkeit von ihrer Himmelsrichtung, wurden die beiden innerhalb des untersuchten Gebäudebereiches der Witterung ausgesetzten Gebäudeseiten Nord und Ost unter Appenzeller Klimabedingungen verglichen.

Der Wandaufbau der Ostwand unterscheidet sich hierbei von dem im Norden, da anstatt der Schindeln die gestemmen Täfer den außenseitigen Fassadenabschluss bilden (s. Abbildung 13-22).

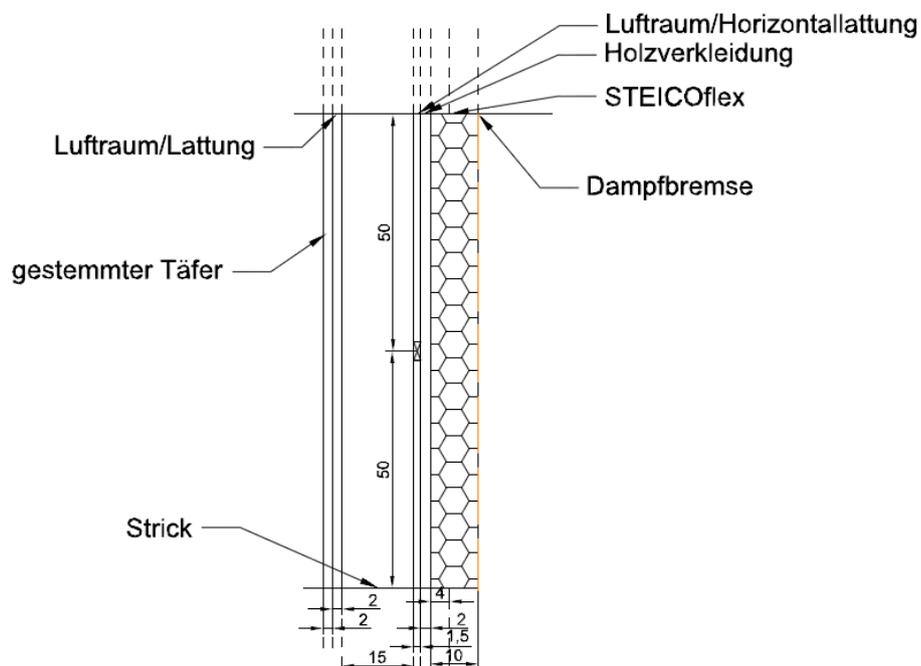


Abbildung 13-22: untersuchter Wandquerschnitt EG Ost nach Sanierung (Maße in cm)

Erwartungsgemäß unterscheiden sich hinsichtlich der Feuchtegehaltsintegrale die Zeitpunkte der Wassergehaltsspitzen aufgrund der unterschiedlichen Schlagregenbeanspruchung je nach Windrichtung.

Die Nordseite besitzt auch aufgrund der geringeren Strahlungsgewinne generell ein höheres Wassergehaltsniveau und auch das Maximum ist größer als im Osten (s. Abbildung 13-23). Dies deckt sich mit der Konstruktionsweise einer Verschindelung im Norden, da diese dem Wetterschutz dient und aufgrund der Beobachtungen vor Ort an den am stärksten feuchtebeanspruchten Fassadenbereichen angebracht wurden.

Die Temperaturen sowie relativen Feuchten an den Innenoberflächen unterscheiden sich dagegen nur marginal (s. Abbildung 13-24 sowie Abbildung 13-25).

Mit den Feuchtegehaltsmittelwerten im Strick verhält es sich analog zu den Feuchtegehaltsintegralen (s. Abbildung 13-26).

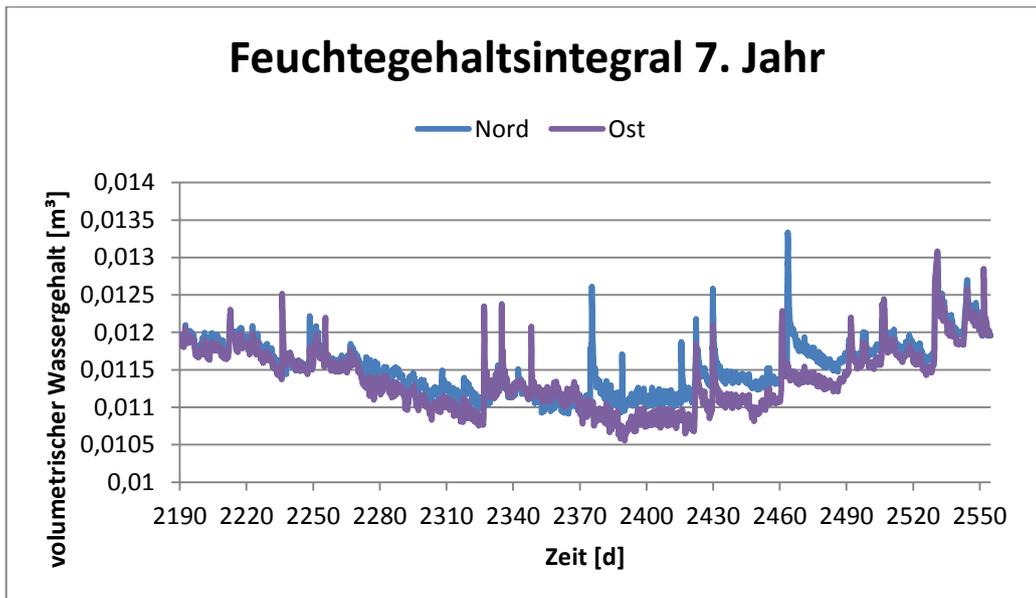


Abbildung 13-23: Feuchtegehaltsintegral im Jahresverlauf (Jahr 7) in Nord- sowie Ostwand

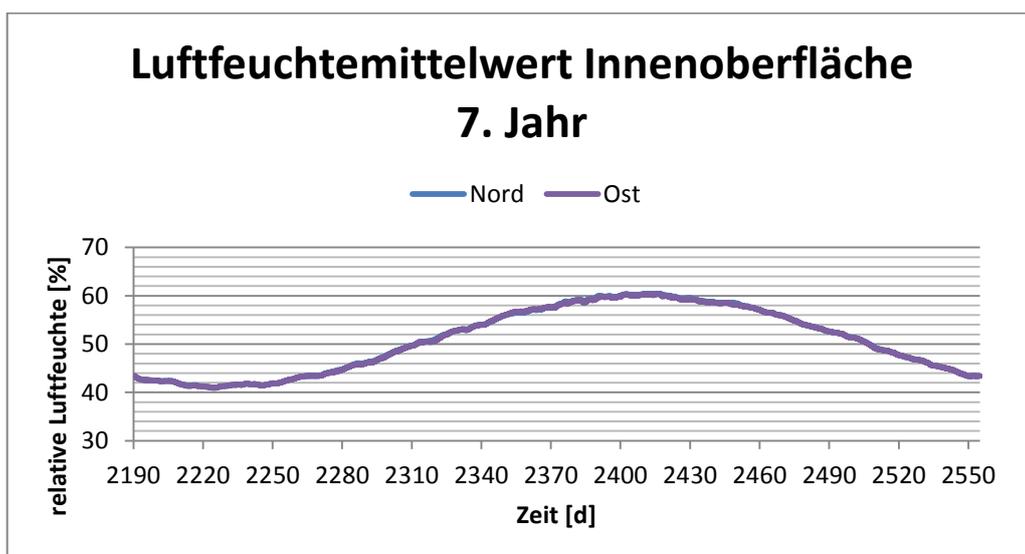


Abbildung 13-24: Luftfeuchtemittelwert Innenoberfläche im Jahresverlauf (Jahr 7) an Nord- sowie Ostwand

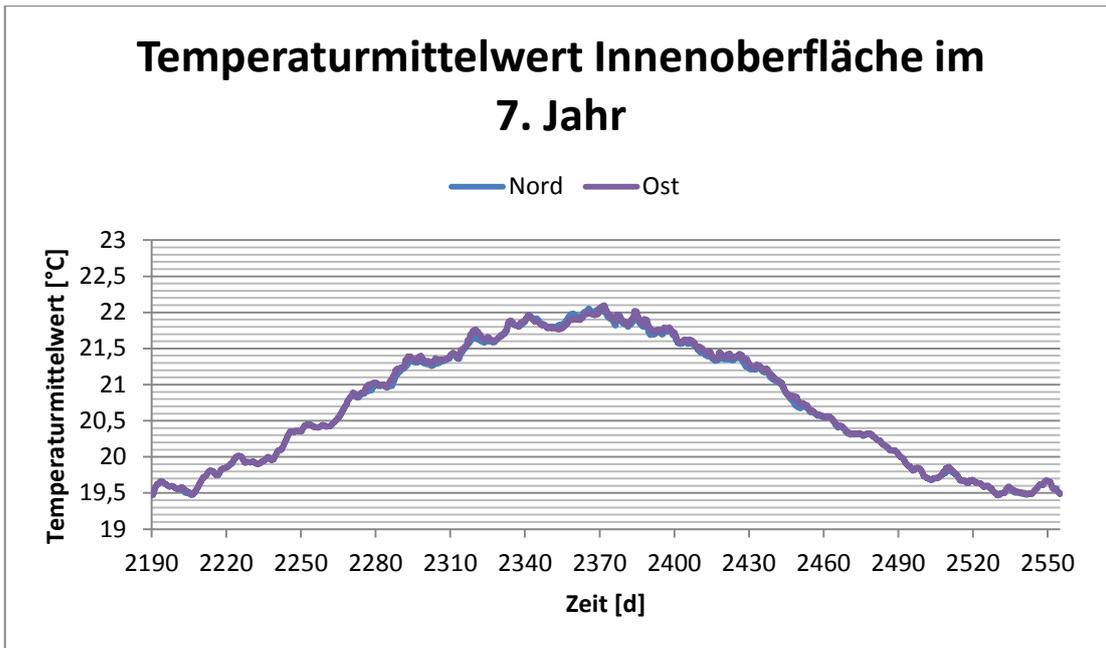


Abbildung 13-25: Temperaturmittelwert Innenoberfläche im Jahresverlauf (Jahr 7) an Nord- sowie Ostwand

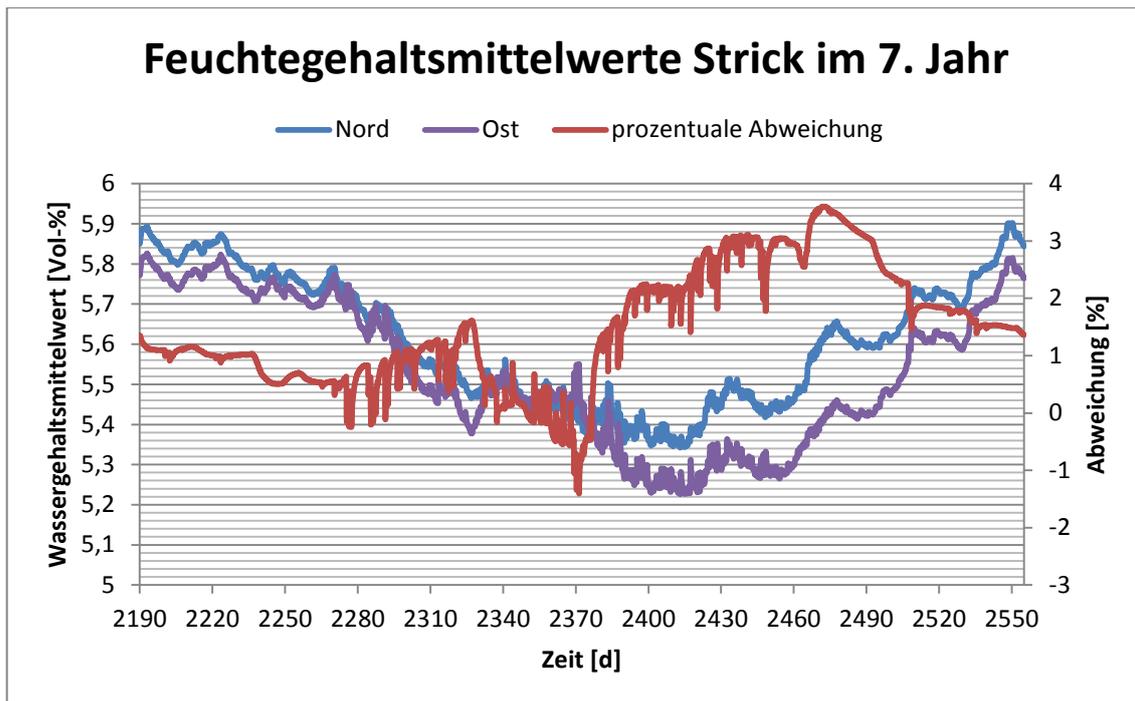


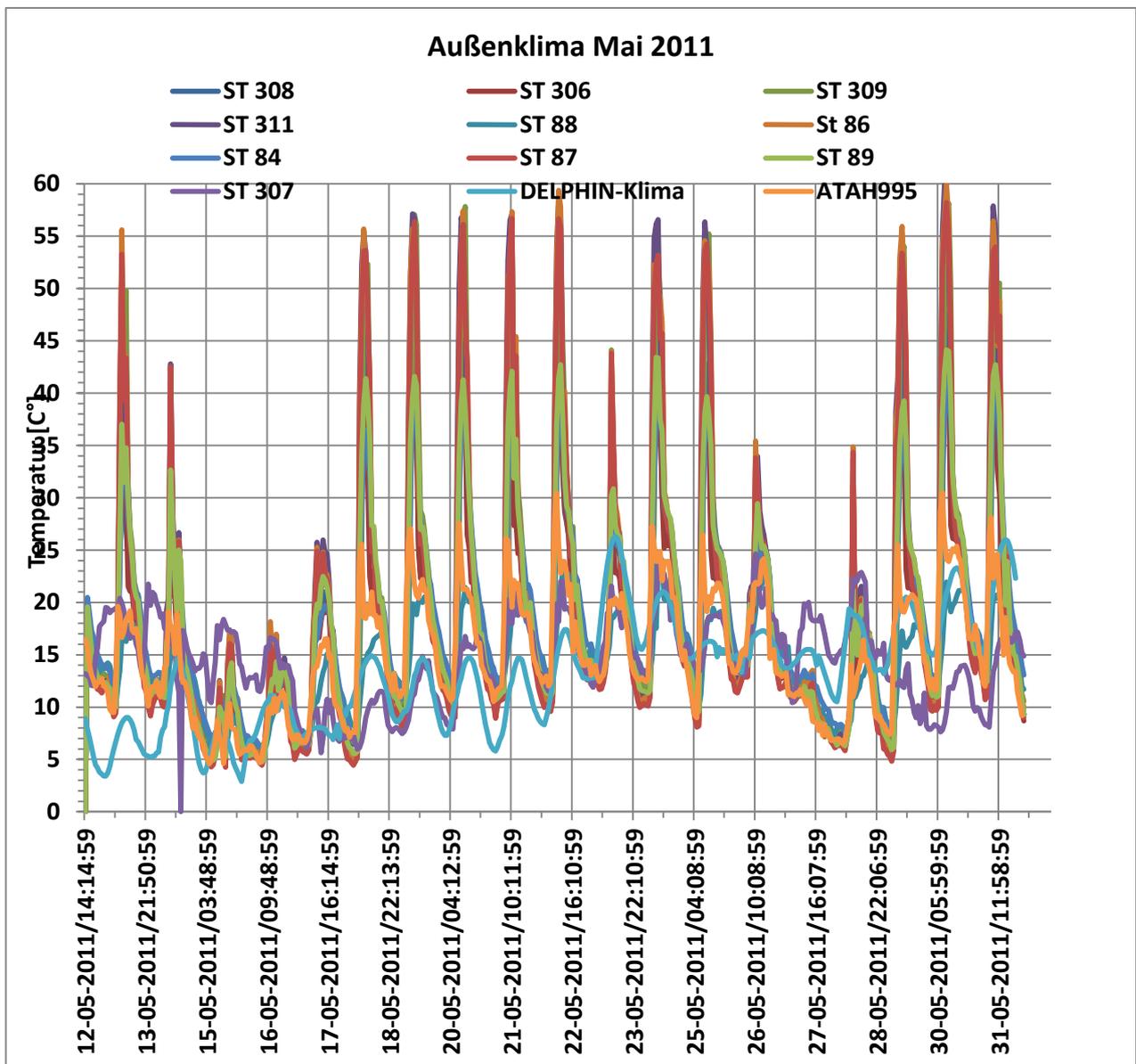
Abbildung 13-26: Feuchtegehaltswerte Strick im Jahresverlauf (Jahr 7) an Nord-sowie Ostwand und prozentuale Abweichung

13.5. Vergleich mit Messwerten

Es lagen zum Zeitpunkt der Bearbeitung Messwerte für die Monate Mai bis Dezember 2011 sowie Januar 2012 vor. Hierbei wurden sowohl Temperaturen als auch relative Luftfeuchten gemessen.

Diese Parameter für das Außenklima werden durch die Sensoren ATAH995, ATAH996 sowie ATAH997 aufgezeichnet. Der Sensor ATAH996 hat hierbei keine Werte für die relative Luftfeuchte aufgezeichnet. Für den Sensor ATAH997 sind nur Daten ab Dezember vorhanden. Somit liegen nur relativ zusammenhängende Werte für den Sensor ATAH 995 vor.

Unter Heranziehung der reinen Temperatursensoren ST84, ST86, ST87, ST88, ST89, ST306, ST307, ST308, und ST311 ergibt sich damit folgender Verlauf für den Monat Mai 2011. Des Weiteren ist hier zu Vergleichszwecken das künstliche Referenzklima abgebildet, das für alle thermisch-hygrischen Berechnungen verwendet wurde. Die hohen Temperaturspitzen sind wohl durch Aufheizingvorgänge infolge Strahlungseinwirkung bedingt.



Für den Jahresverlauf wurden daher nur die Sensoren ST88, ST307 sowie ATAH995 mit weniger ausgeprägten Spitzen ausgewählt und im Folgenden dargestellt. Hier sind dann im direkten Vergleich jedoch ebenfalls deutliche Spitzen in den Verläufen der Messwerte zu erkennen. Da die Messwerte des Sensors ATAH995 vor allen Dingen im Winter für die tatsächlichen Außentemperaturen am realistischsten erscheinen, wurde das Außenklima nach ATAH995 für die Vergleichsberechnungen angesetzt. Überraschend ist hierbei, dass bezüglich der Außentemperaturen die Übereinstimmungen mit dem künstlichen Referenzklima in weiten Bereichen doch sehr gut sind.

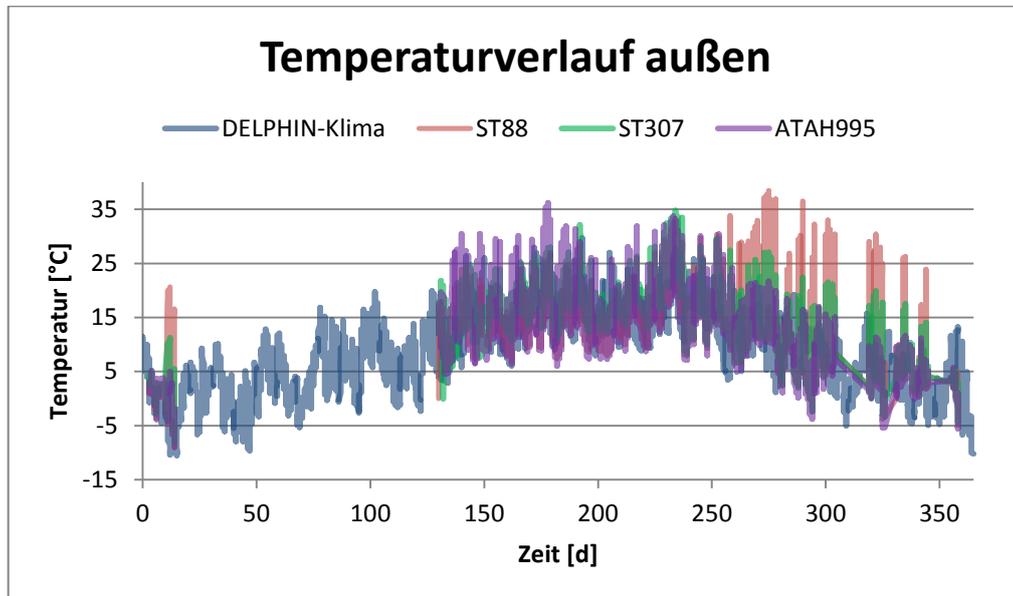


Abbildung 13-27: Temperaturverlauf außen: Messwerte und Referenzklima

Wegen Mangels an anderen Messwerten, wurden für die Außenluftfeuchte die Messwerte des Sensors ATAH995 angesetzt. Die Übereinstimmungen mit dem Referenzklima sind hier erwartungsgemäß gering. Unter anderem fallen Regenereignisse in der Realität naturgemäß nicht mit denen des Referenzklimas zusammen.

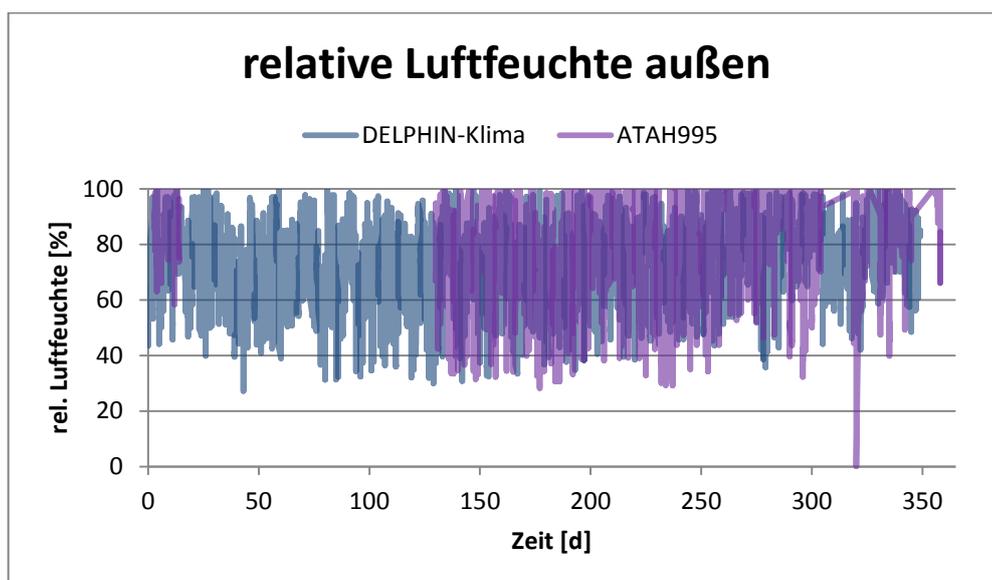


Abbildung 13-28: Verlauf der relativen Luftfeuchte außen: Messwerte und Referenzklima

Da die Berechnungen für den Raum 1.3 durchgeführt wurden, wurden die Messwerte für diesen Raum herangezogen. Das Raumklima wurde hierbei vom Sensor ATAH998 aufgezeichnet und es ergibt sich folgender Verlauf.

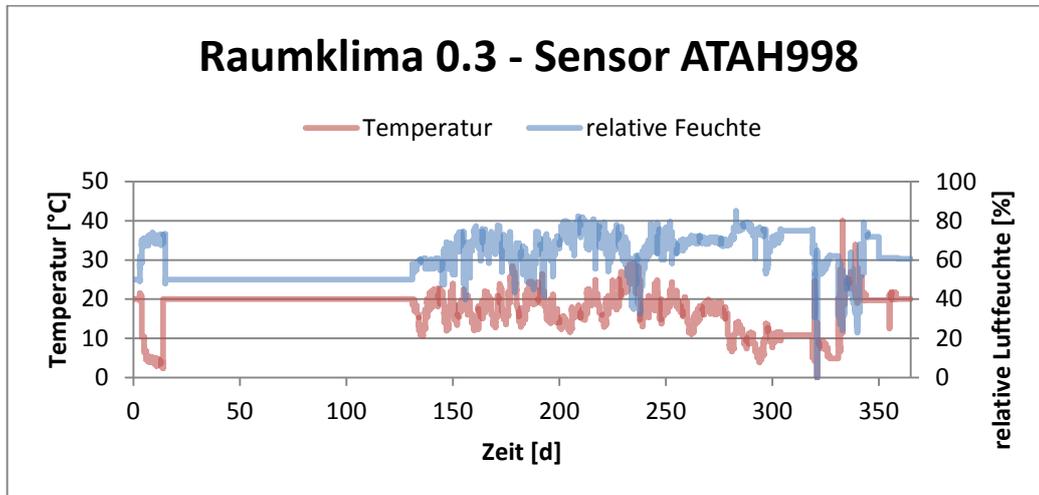


Abbildung 13-29: Jahresverlauf Raumklima 0.3 gemessen

Dieses Innenklima wurde für den Vergleich von Berechnung und Messwerten zugrunde gelegt. Für die fehlenden Messwerte wurde das Standardinnenraumklima nach WTA wie bereits erwähnt angesetzt.

Anhand des nordöstlichen Außeneckes des Raumes 1.3 wurde ein Vergleich der Temperaturverläufe dargestellt. Der entsprechende Sensor, welcher über den betreffenden Zeitraum ausreichend viele Daten aufwies, ist Nr. ST618. Für das Außenklima wurde der Sensor ATAH995 aus dargelegten Gründen angesetzt.

Folgendes Diagramm zeigt, dass zwischen Messwerten und den Rechenergebnissen im zweiten Jahr der Berechnung eine gute Übereinstimmung besteht.

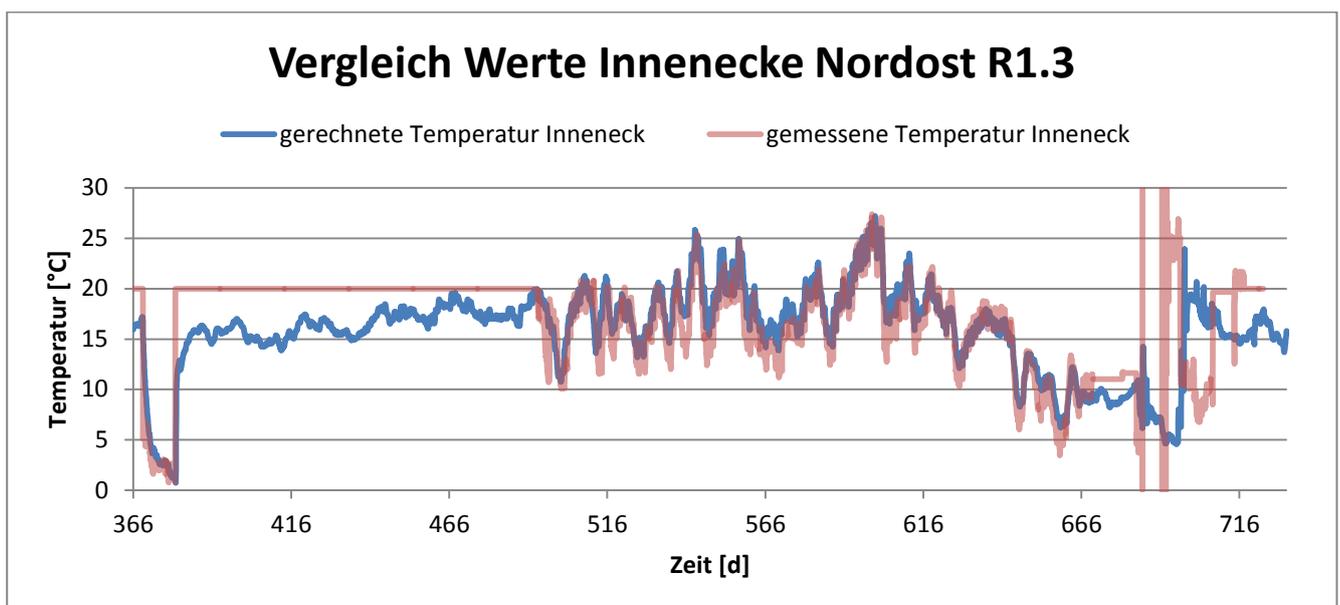


Abbildung 13-30: Vergleich Mess- und Rechenwerte

Für den Zeitraum nach der Sanierung gestaltete sich der Vergleich sehr schwierig. In der betrachteten Außenecke befinden sich zwei Sensoren, welche für einen Vergleich prinzipiell in Frage kommen. Der Sensor, welcher in etwa an der Innenecke des betrachteten Querschnittes liegt, ist Nr. ATAH1494. Er befindet sich wie Sensor ST618 auf der kalten Seite der Dämmung in der gleichen Zimmerecke. Die Temperaturen müssten hier daher eigentlich etwas niedriger als für Sensor ST618 liegen, da er sich im Einflussbereich der dreidimensionalen Wärmebrücke der oberen Wandecke befindet. Dies ist jedoch nur in Teilbereichen der Fall (s. Abbildung 13-31).

Da für den Monat Januar sehr wenige Messwerte existieren und zeitweise die Klimatisierung durch den Besitzer ausgeschaltet wurde, gingen nur die Messwerte für Dezember in die Betrachtung ein, wengleich für die Zeit zwischen 12.12. und 22.12. sowie ab 25.12. keine Messwerte existieren.

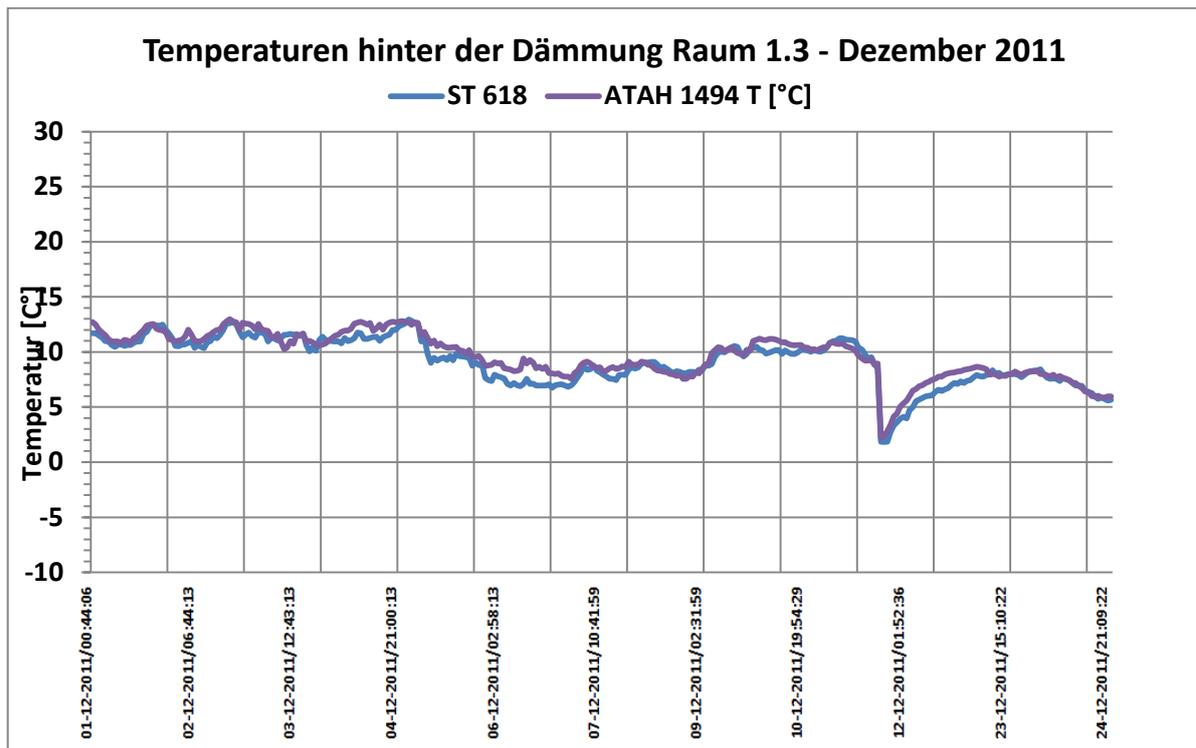


Abbildung 13-31: gemessene Temperaturen hinter der Dämmung im Dezember 2011

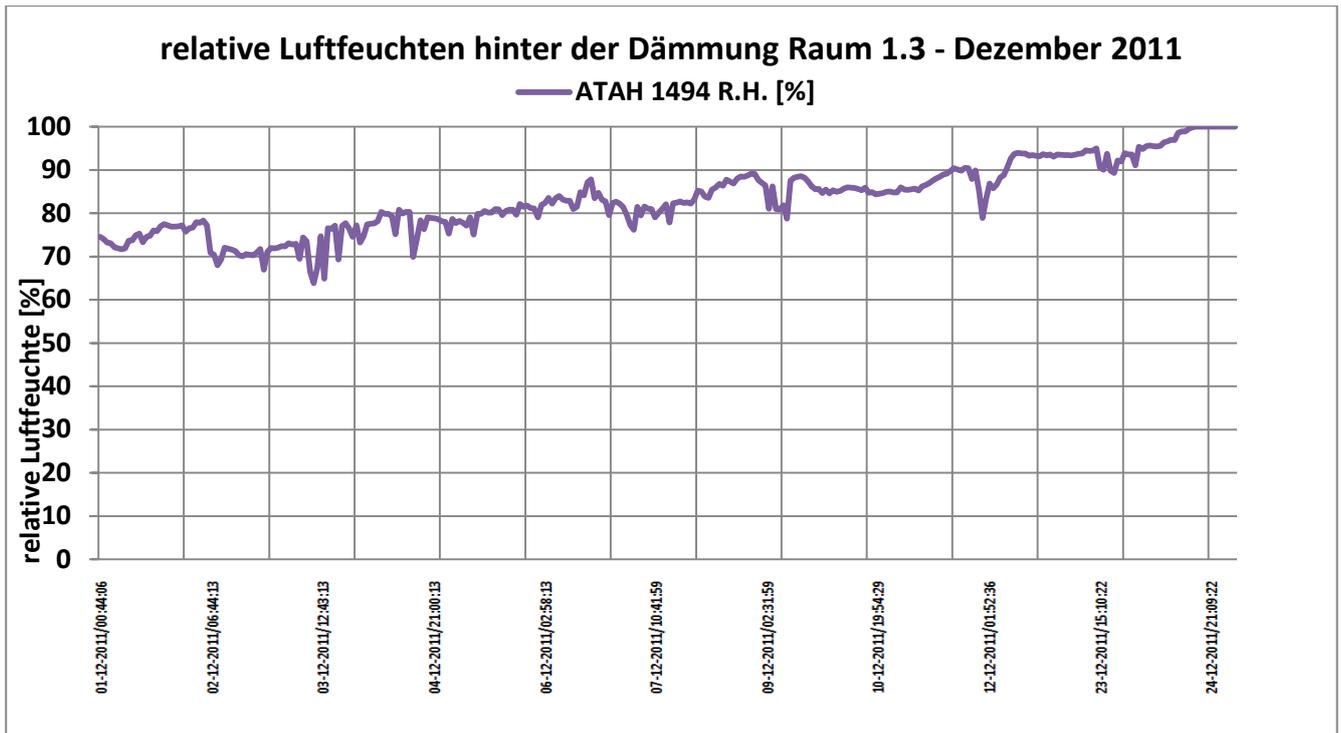


Abbildung 13-32: Messwerte der relativen Luftfeuchte auf der kalten Seite der Dämmung im Dezember 2011

Aufgrund der zum Zeitpunkt der Bearbeitung wie dargelegt geringen Anzahl an Messwerten ist hier kein sinnvoller Vergleich von Mess- und Rechenwerten möglich gewesen.

Für den längsten zusammenhängenden Zeitraum von Messwerten nach der Sanierung vom 01.12.2011 0:45 Uhr bis 12.12.2011 07:52 Uhr wurde zwar ein solcher Vergleich vorgenommen, dieser bestätigt jedoch nur diese Auffassung. Selbst für den Vergleich der Temperaturen, der für eine längerfristige Betrachtung wie zuvor aufgezeigt sehr gute Übereinstimmungen erreichte, weichen die Mess- von den Rechenwerten nun um bis zu 100% ab. Hier ist, sobald die Messwerte für einen längeren Zeitraum verfügbar sind, eine neue Betrachtung anzustreben.

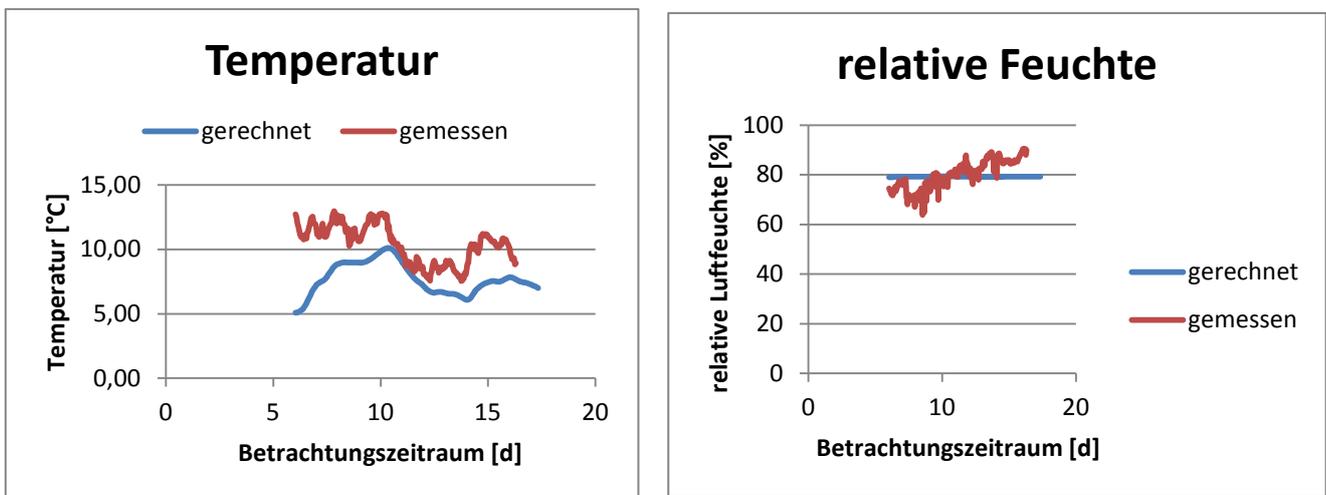


Abbildung 13-33: Vergleich berechnete und gemessene (Sensor ATAH1494) Werte

13.6. untersuchte Konstruktionen

Die im Kapitel zu PHPP beschriebenen alternativen Konstruktionen wurden nun einer hygrothermischen Simulation unterzogen.

Bei allen Konstruktionen ist auf einen hohlraumfreien Einbau zu achten, um der Tauwasserbildung infolge Konvektion vorzubeugen. Die in der Strickkonstruktion vorhandenen Unebenheiten (z.B. Fugen) sind kapillar leitfähig zu verfüllen.

13.6.1. Bestand

Wie bereits geschildert, lag hier eine 150mm starke, hölzerne Strickkonstruktion vor, die außenseitig ostseits mit gestemmtem Täfer und nordseits mit Schindeln bekleidet ist. Als Materialien sind daher lediglich Fichtenholz und Luft anzusetzen, welche der DELPHIN-Materialdatenbank entnommen wurden.

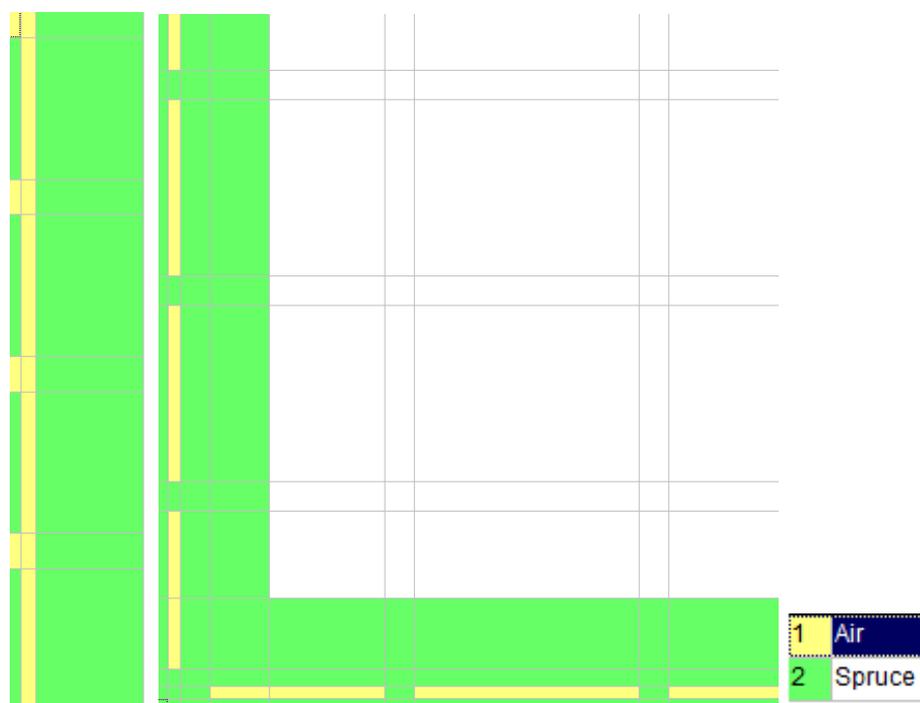


Abbildung 13-34: Modell des Bestandes in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.2. STEICOflex mit Dampfbremse

Hier wurde der Status nach der Sanierung simuliert.

Generell ist bei Konstruktionen, bei denen der Dämmstoff in eine Vorsatzschale eingebaut wird, besonders auf mögliche Hohlstellen (z.B. Anschlussstellen und Kreuzungspunkte der Holzrahmenkonstruktion, hinter den Pfosten usw.) und den abrutschsicheren Einbau der Dämmung zu achten, da es ansonsten zu Luftkonvektionen in diesen Bereichen kommen kann.

Die Holzfaserdämmplatten sind kapillar leitfähig, hygroskopisch und diffusionsoffen. [35]

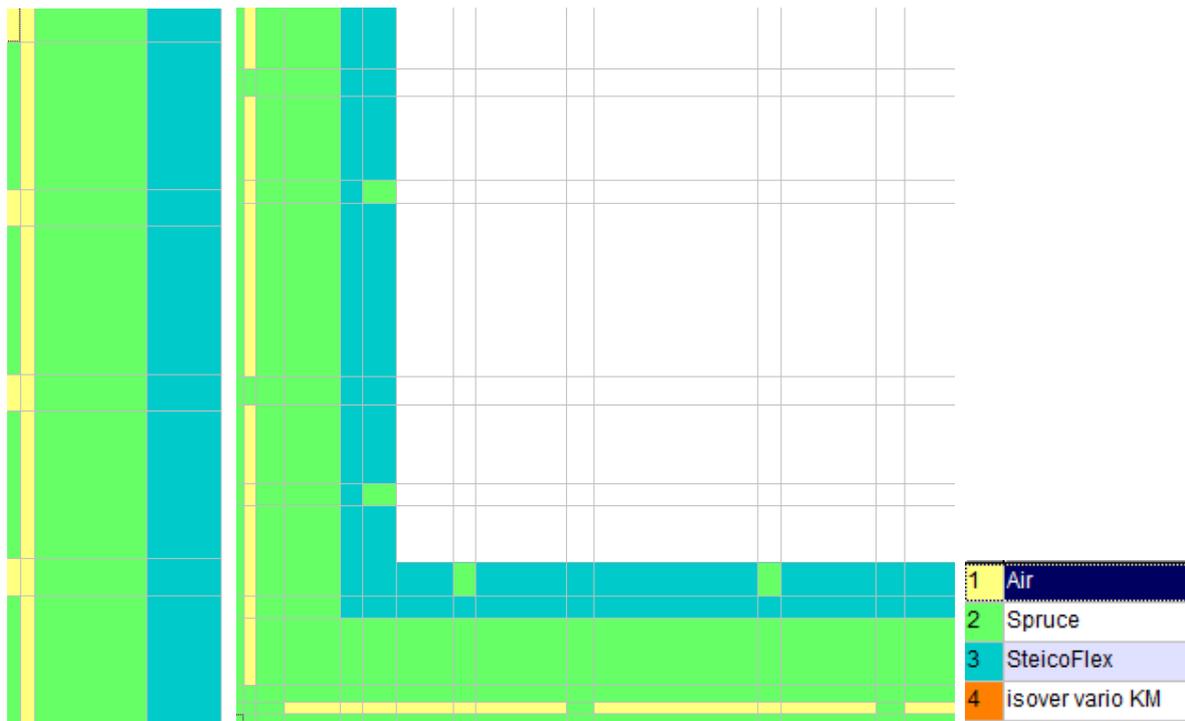


Abbildung 13-35: Modell der Sanierungsmaßnahme in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.3. STEICOflex mit OSB-Platte

Da Dampfbremsen in der Praxis aufgrund von Verlegefehlern häufig Schwachstellen darstellen, wurde als Alternative eine Konstruktionsweise ohne Dampfbremse überprüft. Hierbei kam eine OSB-Platte aus der Materialdatenbank zum Einsatz, da solche Platten selbst einen hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand besitzen ($\mu=400$) und leicht zu verbauen sind.

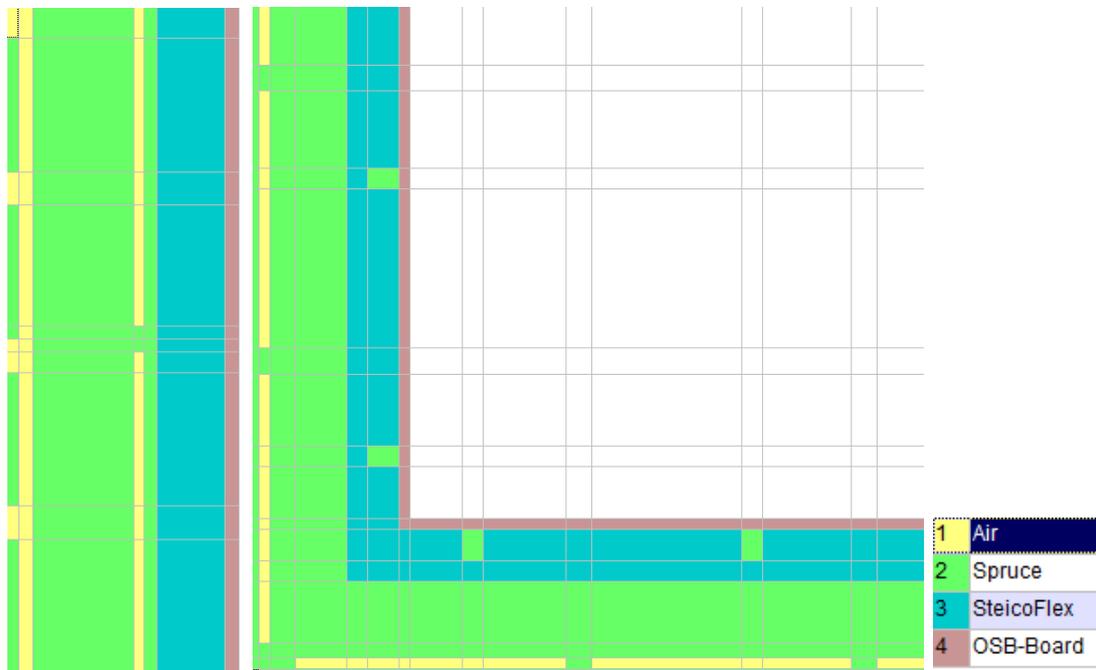


Abbildung 13-36: Modell STEICOflex-Dämmung mit OSB-Platte in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.4. Calcium-Silikat-Platte

Gemäß WTA-Empfehlung [24] für Innendämmungen wurde eine weitere Variante mit Calcium-Silikat-Platten (hier in einer der üblichen Stärken von 50mm) als Dämmung untersucht. Um eine vollflächig kapillare Ankopplung an den Bestand herzustellen, wird hier eine 20mm starke Ausgleichsschicht aus Leichtlehmörtel auf die Bestandskonstruktion aufgebracht. Die Calcium-Silikat-Platte selbst wird mechanisch in der Bestandskonstruktion befestigt – alternativ kann auch ein Aufkleben erfolgen. Als Raumabschluss kommt ein 20mm starker Kalkputz zum Einsatz.

Calcium-Silikat-Platten sind aufgrund ihres hohen pH-Wertes schimmelpilzungefährdet. Außerdem besitzen sie feuchtepuffernde Eigenschaften und sind diffusionsoffen. [38]

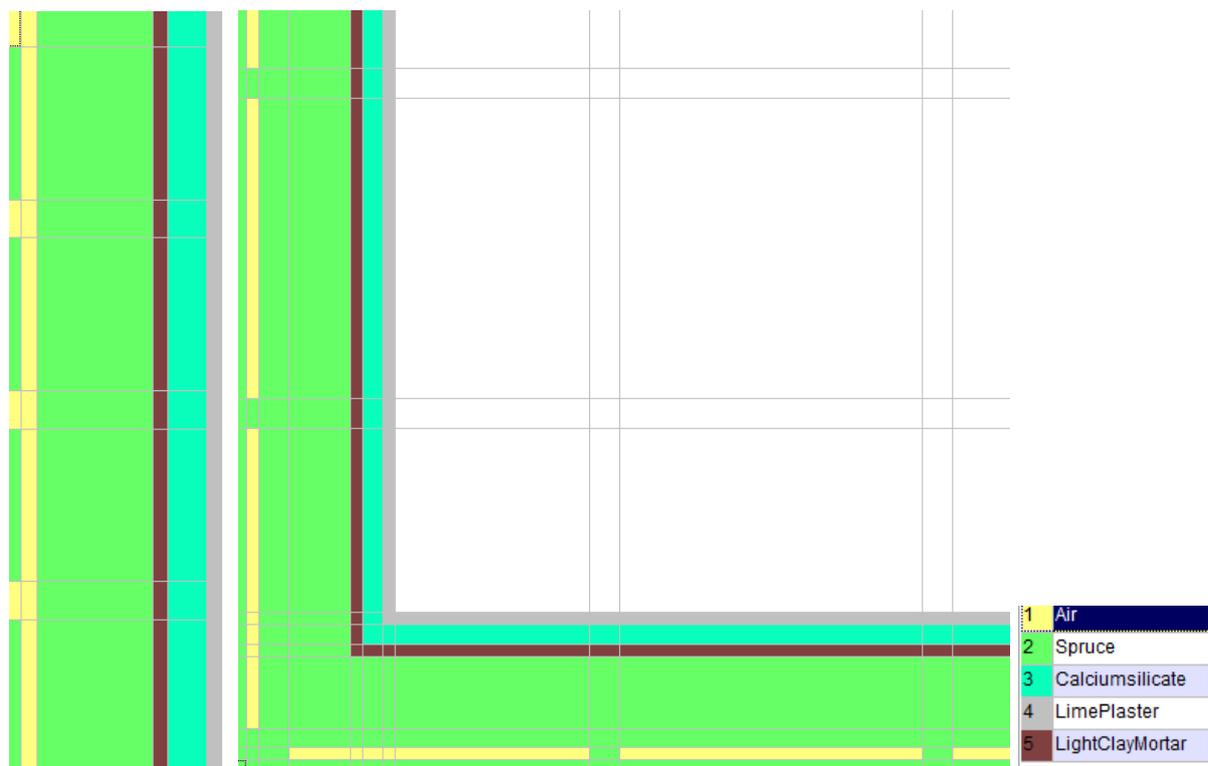


Abbildung 13-37: Modell Calcium-Silikat-Platte mit Ausgleichslehm und Kalkputz in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.5. Wärmedämmputz

Nach Aufbringen einer Gleitschicht (diffusionsoffenes Vlies) wird ein trasshaltiger Wärmedämmputz mit einer Gesamtstärke von 100mm aufgebracht. Dieser wird abschließend mit 20mm dickem Kalkputz versehen.

Wärmedämmputze sind kapillaraktiv und diffusionsoffen. [35]

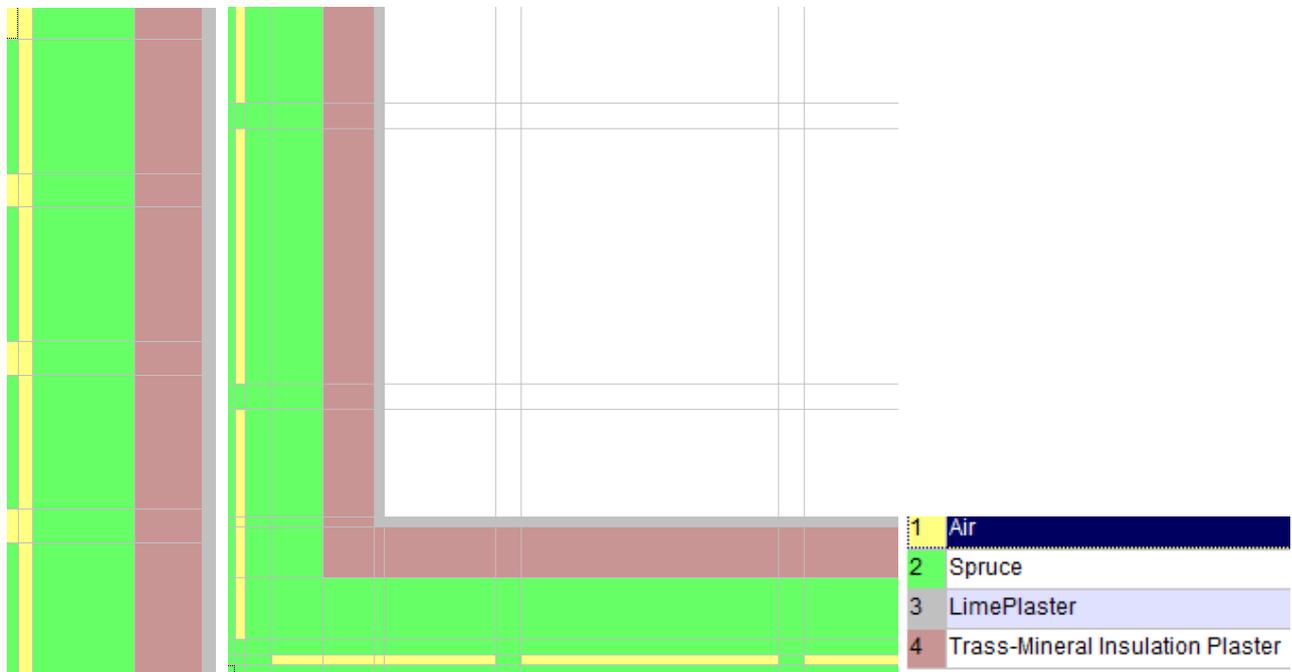


Abbildung 13-38: Modell Variante mit Wärmedämmputz und Kalkputz in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.6. Wärmedämmlehm

Hierbei wird korkhaltiger Wärmedämmlehm in eine als verlorene Schalung fungierende Holzkonstruktion eingestampft oder –gespritzt. Die Schalungsdicke wurde zu 20mm und die Dämmstärke zu 80mm gewählt. Raumseitig erfolgt auch hier der Abschluss mit 20mm dickem Kalkputz. Vorteil hierbei ist, dass bei windschiefen Wandkonstruktionen und unebenen Wandflächen keine Untergrundvorbehandlungen und Ankoppelmaterialien erforderlich sind. [31]

Wärmedämmlehm ist kapillaraktiv und diffusionsoffen. [35]

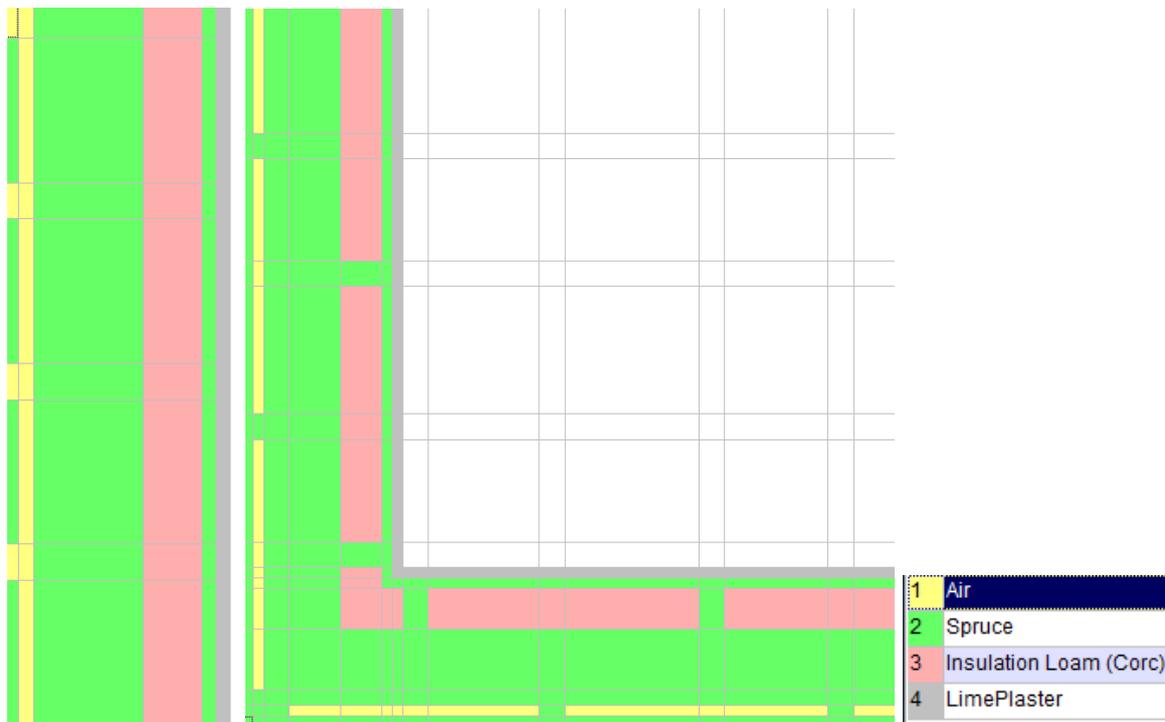


Abbildung 13-39: Modell der Variante mit Wärmedämmlehm in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.7.Zellulosedämmung

Ähnlich den Holzfaserdämmplatten werden hierbei Dämmplatten aus Zellulosefasern in eine hölzerne Vorsatzschale in einer Stärke von 60mm eingebaut. Anschließend erfolgt der Einbau einer feuchteadaptiven Dampfbremse auf die wiederum eine 12,5mm starke Gipskartonplatte aufgebracht wird. Alternativ kann auch eine geschlossene Konstruktion gewählt werden, in welche lose Zellulosefasern eingeblasen werden.

Zellulosefaserdämmungen sind diffusionsoffen, kapillarleitend und feuchteresistent. Aufgrund ihrer hohen Sorptionsfähigkeit kommt ihnen eine klimaregulierende Wirkung zu. [39]

Gipskartonplatten sind imstande, relativ große Mengen Feuchte aufzunehmen, welche sie bei entsprechenden klimatischen Verhältnissen dann wieder abgeben. Dennoch sind hohe Feuchtelasten aufgrund ihrer bedingten Wasserlöslichkeit zu vermeiden. Ein Einbau im Bereich von Nasszellen etc. ist daher problematisch.

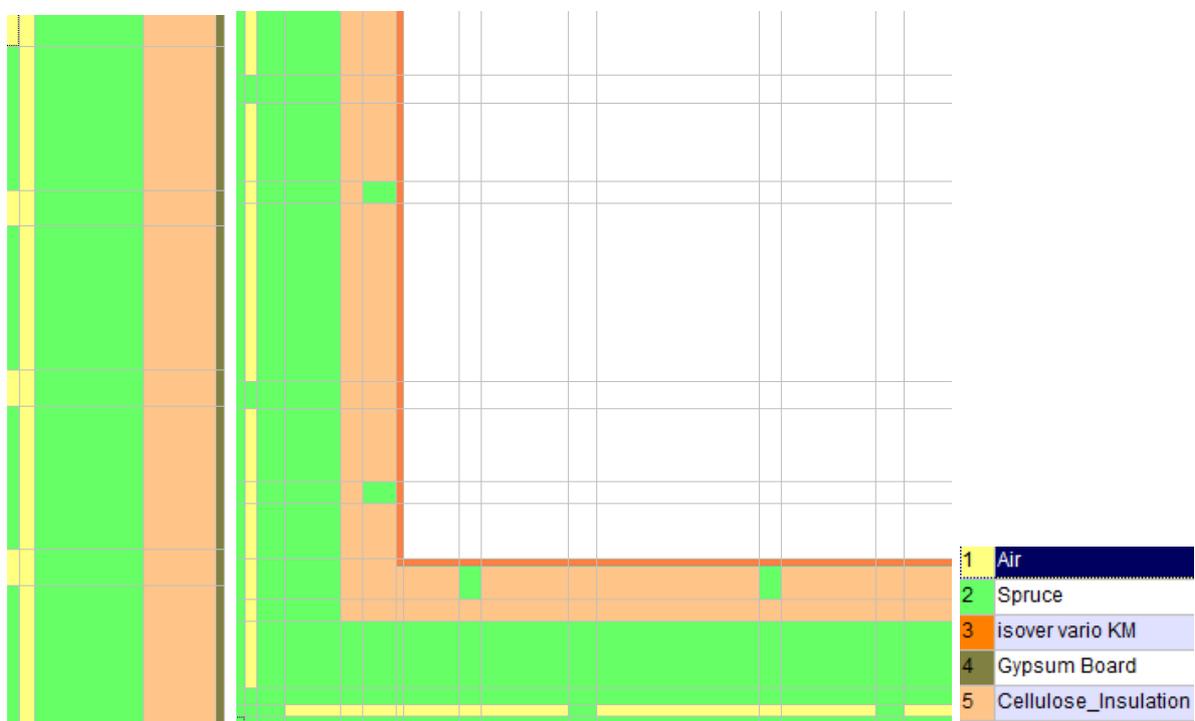


Abbildung 13-40: Modell der Variante mit Zellulosedämmung in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.8.EPS-Platten

Platten aus Polystyrol (EPS, XPS) sind nicht diffusionsoffen und besitzen keine kapillare Leitfähigkeit. [40]

Hierbei werden 50mm starke Dämmplatten aus expandiertem Polystyrol mittels einer 5mm starken Ansetzbinderschicht angebracht und raumseitig mit 12,5mm dicken Gipskartonplatten versehen. Gegebenenfalls sind vor dem Binderauftrag Maßnahmen erforderlich um eine ausreichend ebene Oberfläche im Bestand herzustellen.

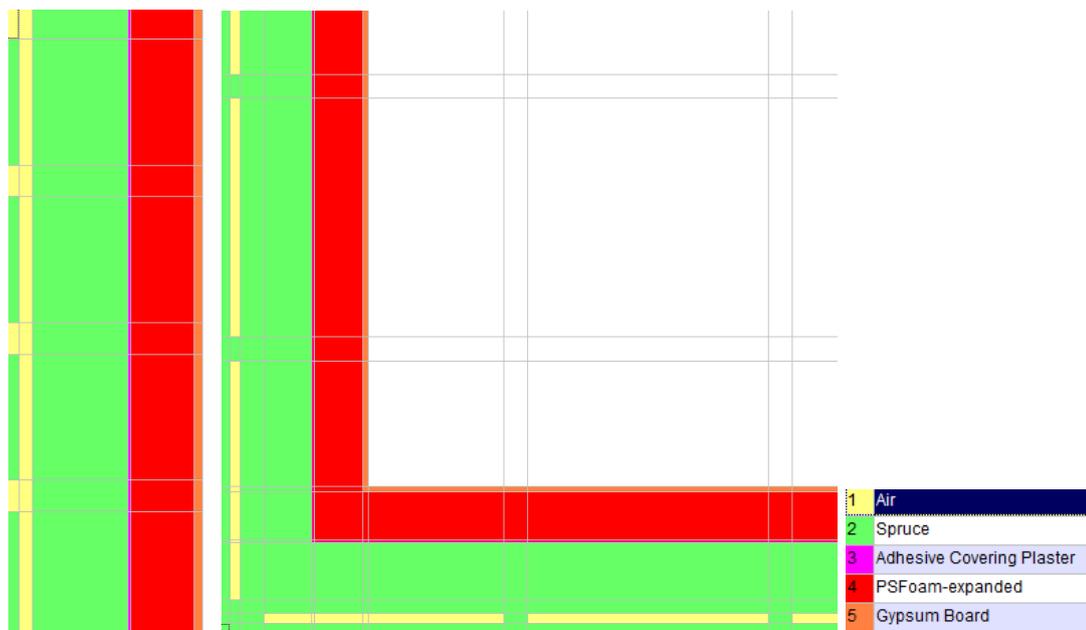


Abbildung 13-41: Modell der EPS-Dämmung in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.9.XPS-Platten

Der Einbau der 40mm starken Dämmplatten aus extrudiertem Polystyrol erfolgt analog zu den EPS-Platten.

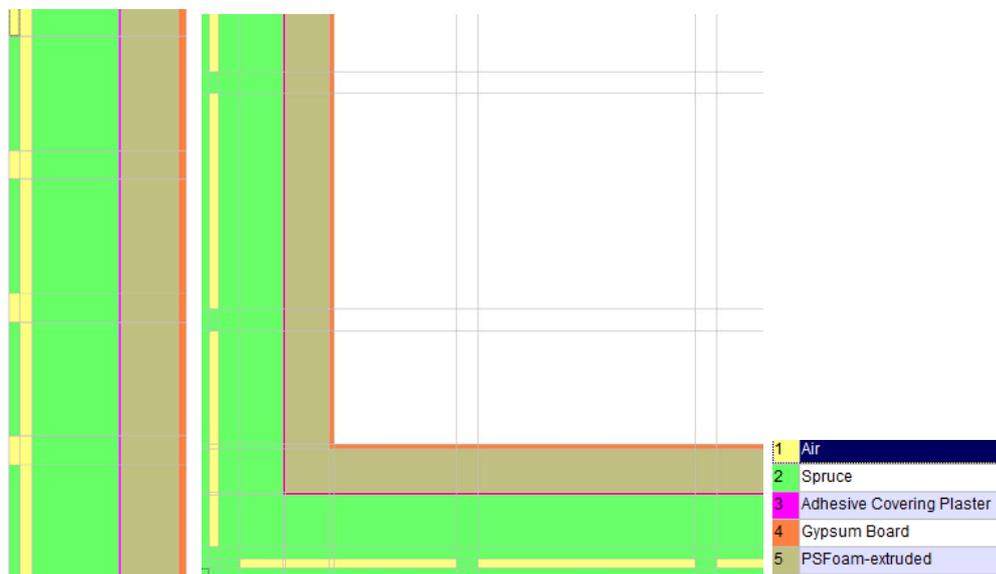


Abbildung 13-42: Modell der XPS-Dämmung in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.6.10. Mineralwolle

Auch hier ist eine hölzerne Vorsatzschale zur Aufnahme der Mineralwolle vorzusehen. Diese wird in einer Stärke von 50mm eingebracht und mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse versehen. Den Abschluss bildet auch hier eine 12,5mm starke Gipskartonplatte.

Mineralwolle ist nicht kapillar leitfähig, nicht hygroskopisch und diffusionsoffen. [35]

Diese Eigenschaften machen den Einsatz einer raumseitigen Dampfbremse erforderlich, da eingedrungene Feuchte nicht gespeichert und verteilt werden kann, sondern die Gefahr der Tauwasserbildung an der kalten Seite der Innendämmung besteht.

Da sie nicht aus organischem Material besteht, ist sie für biologischen Zerfall unempfindlich. Des Weiteren ist sie materialbedingt gegen Schimmelpilz beständig. Dennoch ist Feuchte hier problematisch, da sie nur auf dem wenig effektiven Weg der Diffusion abtransportiert werden kann und das Wärmedämmvermögen des feuchten Baustoffes stark sinkt. Feuchtgewordene Mineralwolle ist daher in der Regel nicht mehr brauchbar. [40]

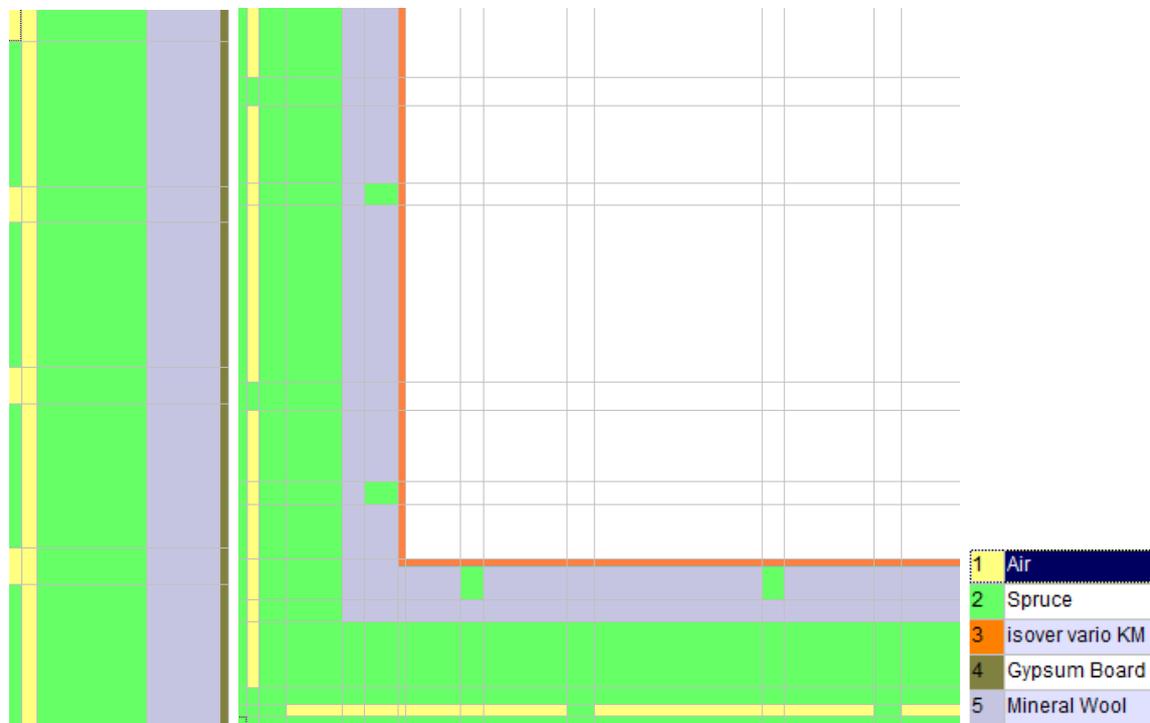


Abbildung 13-43: Modell der Mineralwollgedämmkonstruktion in DELPHIN; ungestörter Wandquerschnitt links, 2D-Detail und verwendete Materialien rechts

13.7. Materialkennwerte

Die thermisch-hygrischen Kennwerte wurden der Material-Datenbank von DELPHIN entnommen. Diese entstammen teilweise der Literatur und teilweise Laborversuchen am Institut für Bauklimatik der TU Dresden.

Für die im Rahmen der Sanierung verwendeten Materialien wurden die Materialien aus der Datenbank entsprechend abgeändert, da ausführliche Materialkennwerte auch auf Nachfrage bei den Herstellern nicht verfügbar waren. Die STEICOflex-Holzfaserdämmung ist demnach ein modifiziertes „Wood fibre insulation board“, bei welchem die Rohdichte, die Wärmeleitfähigkeit und der Dampfdiffusionswiderstand den Werten entsprechend der Produktdatenblätter bzw. der Internetseite angepasst wurden. Hinsichtlich der Dampfbremse isover vario KM wurde der Wert für den Dampfdiffusionswiderstand beim Material „Vapour retarder (open)“ angepasst.

Im Folgenden sind die wichtigsten Kennwerte der verwendeten Materialien dargestellt. Die Angaben für die Dampfdiffusionswiderstände beziehen sich auf relative Feuchten unterhalb 50%; also Bereichen in denen von reiner Dampfdiffusion ohne kapillaren Flüssigwassertransport ausgegangen wird. Die Veränderlichkeit von μ wird über die hinterlegten Materialfunktionen in Abhängigkeit vom Wassergehalt berücksichtigt. Die Porosität berücksichtigt keine geschlossenen Poren.

Der O_{80} -Wert drückt die hygroscopische Feuchte bei einer Luftfeuchte von 80% aus und kann somit als Maß für die Feuchtepufferungsfähigkeit eines Materials herangezogen werden. Es zeigt sich hier deutlich, welche Materialien als hygroscopisch betrachtet werden können.

Zu beachten ist des Weiteren, dass für die Vollholzkonstruktionen das Material „Spruce across grain“ auszuwählen ist, da Wärmedurchgang und Feuchtetransport aufgrund der Einbaulagen am Objekt quer zur Faser stattfinden.

Tabelle 13.3: wichtigste Materialkennwerte der verwendeten Materialien

Material	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]	Porosität [%]	μ [-]	a_w [kg/m ² s ^{0,5}]	O_{80} [%]
Fichte	528	2000	70	236	0,058	0,075
STEICOflex	50	2100	98	2	0,070	0,018
isover vario KM	1000	1400	1	83333,3	wasserdicht	0,001
Calcium-Silikat	270	1158	91	3,9	1,114	0,005
Kalkputz	1700	1000	32	12	0,045	k.A.
Wärmedämmputz	611	1000	76	6,9	0,189	0,060
Wärmedämmlehm	368	1000	30	7,7	0,055	0,012
Zellulosedämmung	55	2544	93	2,1	0,560	0,007
Gipskarton	850	850	65	10	0,277	0,007
EPS	34	1300	94	dampfdicht	wasserdicht	0,001
XPS	30	1300	96	dampfdicht	wasserdicht	0,001
Ansetzbinder	1100	850	12	500	0,002	0,010

Mineralwolle	30	840	92	1	wasserdicht	0,003
OSB-Platte	630	2200	22	400	0,002	k.A.
Leichtlehmputz	900	1000	47	30	0,004	0,016

Mit diesen Materialkennwerten ergeben sich folgende Dampfdiffusionswiderstände für die Innendämmungen ($s_{d,i}$), welche sich für die Wandaufbauten ab der Strickkonstruktion mit den einzelnen Schichtdicken und deren Diffusionswiderstände ergeben:

$$s_{d,i} = \sum s_{d,n}$$

Die Empfehlung nach WTA-Merkblatt 8-1 [34] liegt für Innendämmungen bei Fachwerken in der Bandbreite von 0,5 bis 2,0m. Während sich die Konstruktionen mit Wärmedämmputz und Calcium-Silikat-Platte in diesem Rahmen bewegen, liegen die übrigen teils deutlich darüber, was aber analog zur Erläuterung hinsichtlich des inneren Wärmedurchlasswiderstandes nicht berücksichtigt wird.

Für die Nachweisfreiheit von Innendämmungen generell gibt DIN 4108-3 die diffusionsäquivalente Schichtdicke mit $s_{d,i} \geq 0,5\text{m}$ und für Fachwerk im Speziellen $1,0\text{m} \leq s_{d,i} \leq 2,0\text{m}$ an.

Tabelle 13.4: diffusionsäquivalente Schichtdicken der Innendämmungsvarianten

Variante	$s_{d,i}$ [m]
STEICOflex mit Dampfbremse	5,20 („Winter“)/0,40 („Sommer“)
STEICOflex mit OSB-Platte	9,00
Calcium-Silikat	1,04
Wärmedämmputz	0,93
Wärmedämmlehm	5,58
Zellulosedämmung	5,25
EPS-Platten	dampfdicht
XPS-Platten	dampfdicht

Im Anhang sind außerdem die Funktionen für die Feuchtespeicherung und die Flüssigwasserleitfähigkeit dargestellt, aus denen ebenfalls typische Materialeigenschaften ablesbar sind. Beispielsweise verfügt die kapillaraktive Calcium-Silikat-Platte über fast das gesamte Spektrum der Wassergehalte über eine hohe Leitfähigkeit. Ähnliche Werte erreicht allenfalls noch die Zellulosedämmung.

Anhand der Feuchtespeicherfunktionen lässt sich das Sorptionsvermögen eines Stoffes ablesen. Ausgesprochen sorptionsfähige Stoffe haben hier bereits bei kleinen Porenradien (hohe Kapillardrücke) relative hohe Wassergehalte und es ist ein relativ breiter Bereich von Porenradien an der Sorption beteiligt.

13.8. Ergebnisse

Zunächst wurden Berechnungen am ungestörten Wandquerschnitt ohne geometrische Wärmebrücken durchgeführt, da diese weniger zeitintensiv sind. Anhand dieser waren bereits Beurteilungen der einzelnen Konstruktionen sowie Vergleiche untereinander möglich. Außerdem konnte die Vorgehensweise für die Berechnung eines 2D-Details in Form der linearen Wärmebrücke am Nordosteck des Gebäudes etwa hinsichtlich des zu untersuchenden Zeitraumes geplant werden. Diese Gebäudeecke wurde ausgesucht, da sie als einzige im sanierten Bereich von zwei Seiten (Nord und Ost) beregnet wird und zu den Wärmebrücken mit den geringsten Oberflächentemperaturen zählt.

Die Berechnungsdauern variierten trotz identischer Gittervergrößerungsfaktoren von 1,30 und zunächst gleichen Solver-Einstellungen (Vergleichbarkeit) stark. Zum Einsatz kam hierbei ein PC mit Intel Core 2 Quad-Prozessoren á 2,5 GHz mit 8GB Arbeitsspeicher unter einem Windows 7 64Bit-Betriebssystem. Da die Berechnungen bei den Konstruktionen mit Dampfbremse trotz Variation der verwendeten Dampfbremse (unveränderte Dampfbremse aus Material-Datenbank und isover vario KM) teilweise mit den Solver-Standardereinstellungen „hängen“ blieben, wurde gemäß der Empfehlungen des DELPHIN-Handbuches [10] die relativen Toleranzen auf bis zu 10^{-7} verkleinert, was zwar in einer deutlichen Verlängerung der Berechnungszeiten resultierte, das Problem jedoch beseitigte.

Während die Berechnungsdauer für einen ungestörten Wandquerschnitt bei der Bestandswand um die acht Stunden für einen Berechnungszeitraum von vier Jahren betrug, steigerte sich dies besonders für die Konstruktionsvarianten mit Dampfbremsen auf mehr als das Dreifache. 2D-Details erforderten weit mehr Berechnungszeit. Da bei den meisten eindimensionalen Konstruktionen ab dem vierten Jahr keine wesentliche Änderung der hygrischen Kenngrößen mehr eintrat (Temperaturkenngrößen nähern sich ohnehin schnell einem eingeschwungenen Zustand an) und die Feuchtelasten mit den Jahren ab- und nicht zunahm, wurde für die zweidimensionalen Berechnungen eine Dauer von vier Jahren angesetzt, was in Berechnungszeiten von knapp zehn Stunden (Bestand) bis auf über 250 Stunden (Mineralwolle mit Dampfbremse) trotz Ausnutzung von Symmetrien und der damit verbundenen Reduzierung der Abmessungen auf die zweifache Wandstärke ab der Innenecke gemäß der Empfehlung der DELPHIN-Tutorials resultierte. Die Konstruktionen mit Dampfbremsen erforderten generell mehr Rechenzeit.

Eine parallele Berechnung verschiedener Konstruktionen durch den Start mehrerer Solver aus DELPHIN heraus ist zwar möglich, führte aber mittelfristig zur Geschwindigkeitsreduzierung bei den einzelnen Berechnungen.

Etwaige Versäumnisse hinsichtlich relevanter Ausgaben oder Korrekturen am Modell sind daher mit erheblichen Verzögerungen verbunden. Trotzdem ist die verwendete, mehrfach validierte und praxisbewährte Software ein sehr gutes Werkzeug, um den zeitlichen Verlauf der hygro-thermischen Kenngrößen einer Konstruktion über mehrere Jahre hinweg abzuschätzen, ohne aufwendige oder über lange Zeiten laufende Versuche fahren zu müssen. Voraussetzung sind freilich zuverlässig ermittelte oder sinnvoll angenommene Ausgangsdaten.

13.8.1. ungestörter Wandquerschnitt

Feuchtegehaltsintegrale

Hinsichtlich der Feuchtegehaltsintegrale ist die bedingte Vergleichbarkeit zu beachten. Konstruktionen mit einem höheren Feuchtespeichervermögen speichern unter gleichen Randbedingungen auch mehr Feuchte. Beispielsweise ist dieser Gesamtfeuchtegehalt bei der Bestandskonstruktion schon alleine aufgrund ihres geringeren Durchmessers kleiner als bei vorgesezter Dämmkonstruktion

Dennoch ist eine Ausgabe der Feuchtegehaltsintegrale sinnvoll, da so ihr Verlauf im Vergleich der Konstruktionen beurteilt werden kann und eine Aussage möglich ist, wie schnell sich eingeschwungene Zustände einstellen können – also Zustände, bei denen sich die hygrisch-thermischen Kenngrößen im Jahresvergleich praktisch nicht mehr ändern und beispielsweise Einbaufeuchten (Wärmedämmlehm, Klebemörtel etc.) nicht mehr wirksam sind [31].

Die Temperaturverläufe schwingen hierbei relativ schnell ein. Hinsichtlich der feuchtetechnischen Kenngrößen stellt sich lediglich bei den Varianten mit Polystyrolämmung im betrachteten Zeitraum von sieben Jahren ein eingeschwungener Zustand ein. Bei den üblichen Konstruktionen ist die Tendenz weiterhin abnehmend, die Größe der Abnahme sinkt jedoch ab dem vierten Jahr teils deutlich, weshalb dieses Jahr als Referenz für die weitere Beurteilung festgelegt wurde.

Ein häufig befürchtetes „Aufschaukeln“ mit stetig fortschreitender Feuchtezunahme ist daher bei keiner der untersuchten Konstruktionen zu beobachten.

Die Feuchtegehaltsspitzen sind hierbei in den Sommermonaten zu beobachten, wenn die Niederschlagsmengen der einzelnen Regenereignisse am größten sind.

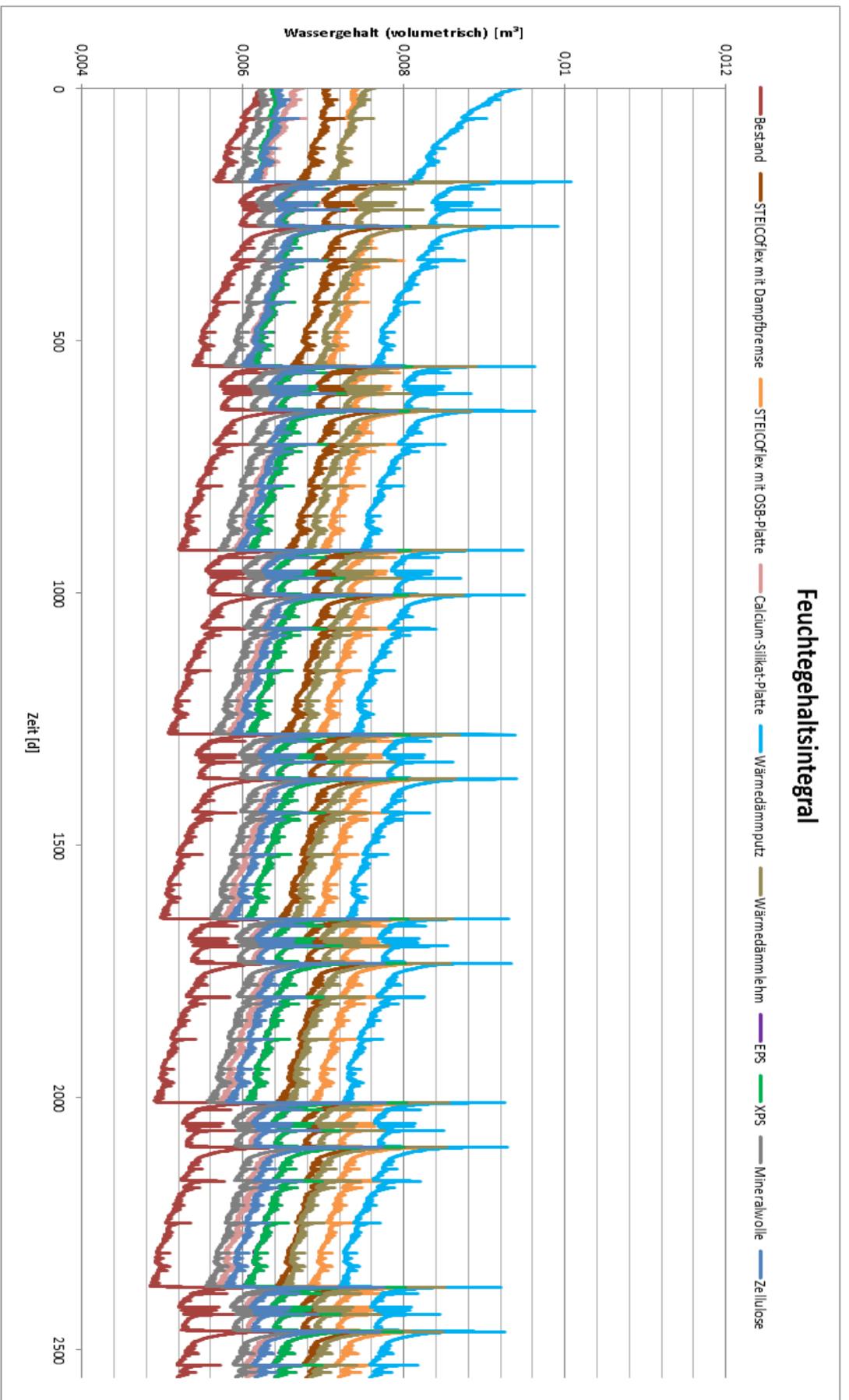


Abbildung 13-44: Feuchtegehaltsintegrale der Konstruktionen im Verlauf von sieben Jahren

Temperatur Innenoberfläche

Die Temperaturen an den Innenoberflächen werden offensichtlich ab einem bestimmten Dämmstandard nur wenig von der Konstruktionsvariante beeinflusst. So liegen die Oberflächentemperaturen für die Konstruktionen mit STEICOflex-Dämmung und den geringsten U-Werten an den kältesten Wintertagen etwa 0,3K über denen der übrigen Varianten mit annähernd gleichen U-Werten.

Positiv wirken sich die Dämmungen im Vergleich zum Bestand aus. Die Oberflächentemperaturen im Winter sind höher und an heißen Sommertagen geringer. Außerdem sind die Temperaturschwankungen aufgrund der erhöhten Wärmespeicherkapazitäten deutlich reduziert. All dies wirkt sich positiv auf den Nutzungskomfort aus.

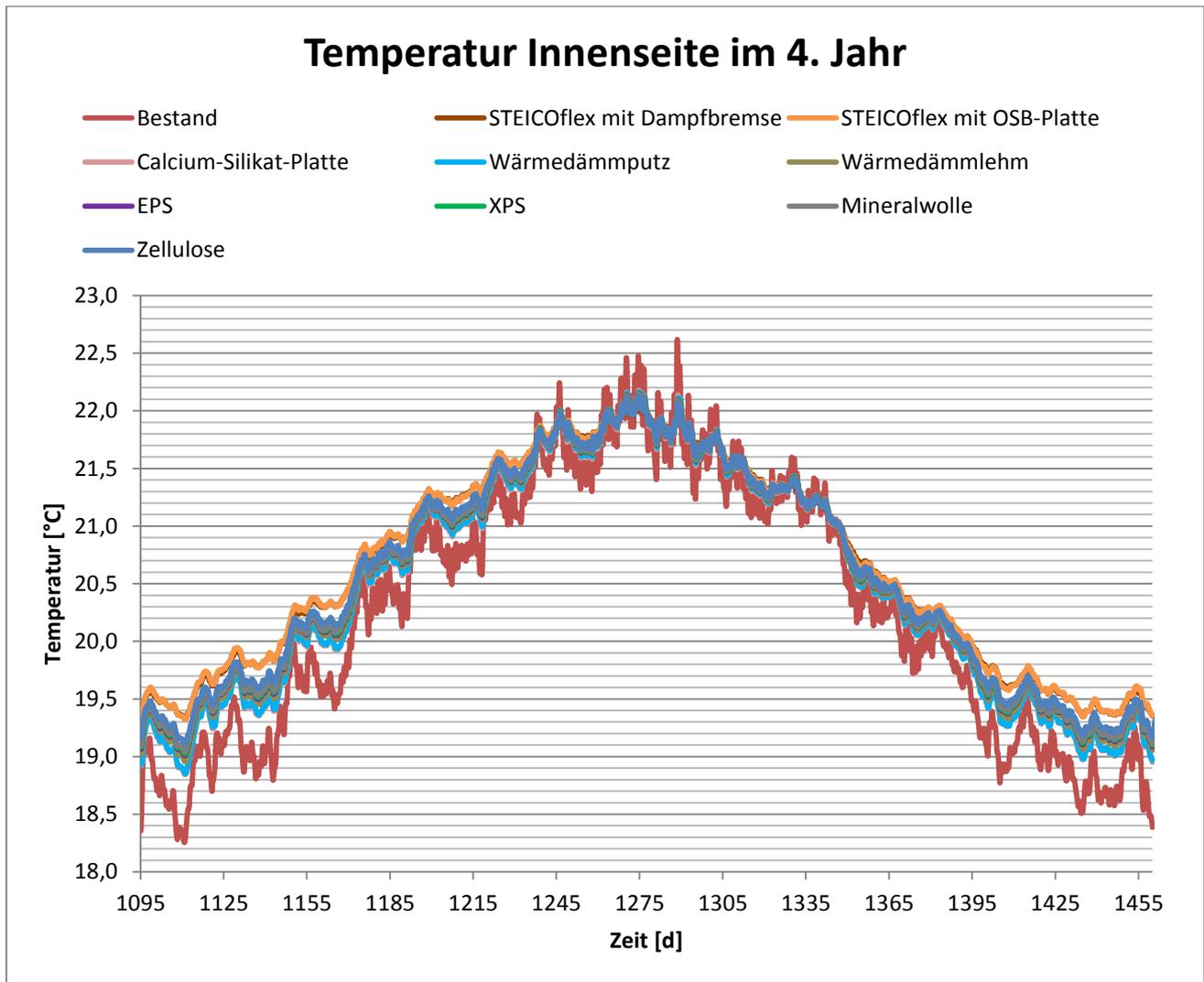


Abbildung 13-45: Temperaturverlauf Bauteiloberfläche im vierten Jahr

Relative Luftfeuchte Innenoberfläche

Für die relativen Luftfeuchten verhält es sich aufgrund des Zusammenhanges der beiden Größen analog.

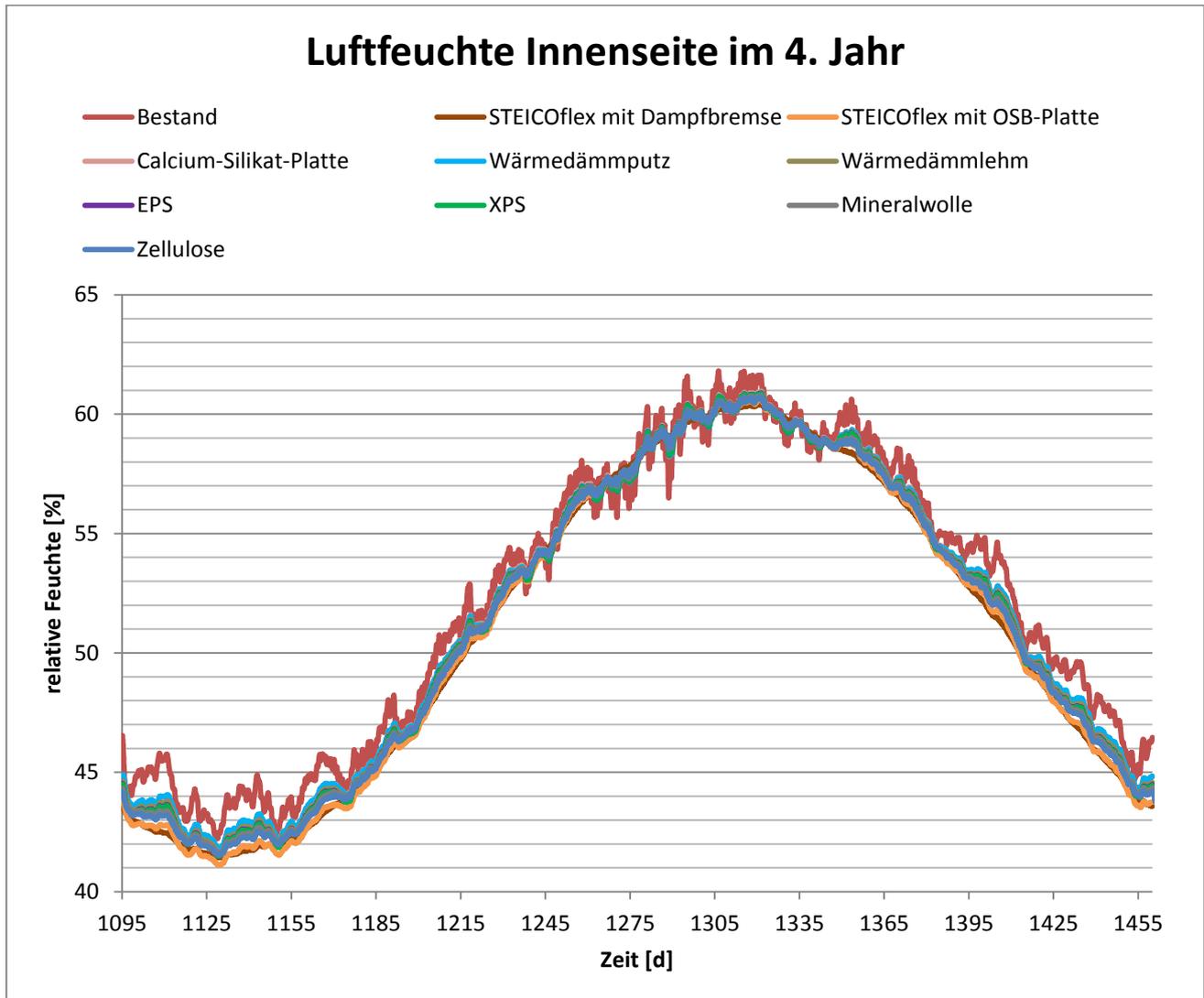


Abbildung 13-46: relative Luftfeuchten an der Bauteiloberfläche im vierten Jahr

Feuchtegehalte

Zur Beurteilung des Risikos des biologischen Befalls der Holzkonstruktionen, wurde das Kriterium nach DIN 68800-1 herangezogen, wonach für die Vermeidung eines Pilzbefalls eine Holzfeuchte von weniger als 20 Masseprozent (M.-%) zulässig ist. Dieser Wert scheint jedoch zumindest diskutabel, da er beispielsweise im WTA-Merkblatt 1-2 [41] als nicht den Beobachtungen in der Praxis entsprechend bezeichnet wird und man hier einen Wert im Bereich des Fasersättigungsbereiches von 30 M.-% ansetzt. In den Diagrammen werden daher beide Grenzwerte eingetragen.

Da bei DELPHIN nur die Ausgabe volumenbezogener Wassergehalte möglich ist, musste hierzu anhand der Rohdichte die maximal zulässige Feuchte wie folgt in Volumenprozent (V.-%) umgerechnet werden:

$$\text{kritischer Feuchtegehalt [M.-%]: } M = \rho \cdot \frac{20\%}{100} \text{ bzw. } \frac{30\%}{100}$$

$$\text{kritischer Feuchtegehalt [V.-%]: } V = \frac{M}{1000} \cdot 100$$

Somit ergibt sich beispielsweise für das verwendete Vollholz (Fichte) für eine Rohdichte von $530 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ nach dem 20%-Kriterium ein maximaler volumenbezogener Feuchtegehalt von 10,6 V.-% bzw. 15,9 V.-% für das Kriterium nach WTA.

Beide Feuchtegehalte werden in der tragenden Strickkonstruktion zu jeder Zeit unterschritten. Selbst die Konstruktion mit den höchsten Feuchtegehalten erreicht mit knapp 8 V.-% Wassergehalt nur 75% des 20%-Kriteriums.

Der Verlauf des Feuchtegehaltes ist in Abbildung 13-47 sowie Abbildung 13-48 dargestellt. Der maximale Feuchtegehalt befindet sich somit hier im Bereich der regenreichen Sommertage. Dennoch überraschen die moderaten Feuchtegehalte aufgrund der sehr hohen Schlagregenbelastung, was der vorliegenden Konstruktion mit konstruktivem Regenschutz und außenseitiger Luftschicht zu verdanken ist.

Die Bestandskonstruktion erzielt insgesamt die niedrigsten Feuchtegehalte. Dies ist wohl auch darauf zurückzuführen, dass ohne Dämmung die Temperaturen im Strick im Jahresverlauf hier am höchsten und die relativen Luftfeuchten damit am niedrigsten sind. Insgesamt sind die Unterschiede jedoch sehr gering und betragen zwischen der Sanierungsvariante mit dem höchsten Feuchtegehalt und der mit der niedrigsten nicht einmal 1 V.-%. Dass die beiden Varianten mit STEICOflex-Dämmung zunächst die höchsten Feuchtegehalte aufweisen ist hier auch dem im Vergleich zu den anderen Varianten niedrigen U-Wert geschuldet [vgl. 30], welcher sich in etwas niedrigeren Temperaturen im Strick und damit einer Verschlechterung der Trocknungsbedingungen manifestiert.

Im Verlauf des Jahres nehmen die Feuchtegehalte durchweg ab. Die Auswirkungen hoher Diffusionswiderstände bzw. dampfdichter Konstruktionen wird bei der Variante mit OSB-Platte und denen mit Polystyrolämmung deutlich. Im Vergleich zu Varianten mit feuchtevariablen Dampfbremse findet hier im Sommer aufgrund der Regenereignisse und der mangelnden Austrocknungsmöglichkeiten nach innen nur eine geringe Abnahme des Feuchtegehaltes statt. So befinden sich die Feuchtegehalte in den Varianten mit Polystyrolämmungen etwa ab Mitte des Jahres oberhalb der durchgeführten Sanierungsvariante.

Betrachtet man den Verlauf über vier Jahre, so wird erkennbar, dass sich in den Varianten mit STEICOflex-Dämmung (geringeres Trocknungspotentials aufgrund Dämmstärke) und Polystyrol recht schnell ein eingeschwungener Zustand mit im Jahresvergleich gleichbleibenden Feuchtegehalten ein-

stellt, während alle übrigen Varianten mehr oder weniger stark ausgeprägte weitere Abnahmen über die Jahre zu verzeichnen haben. Kommt es nun zu einem unplanmäßigen Feuchteintritt, so können diese Varianten im Gegensatz zu den erstgenannten diesen im Laufe der Zeit wieder abbauen und besitzen somit gewisse Reserven.

Dass die OSB-Platte am schlechtesten abschneidet ist folglich auf die beiden Faktoren eines geringeren Trocknungspotentials aufgrund der Dämmstärke sowie dem sehr dampfdichten raumseitigen Oberflächenabschluss geschuldet.

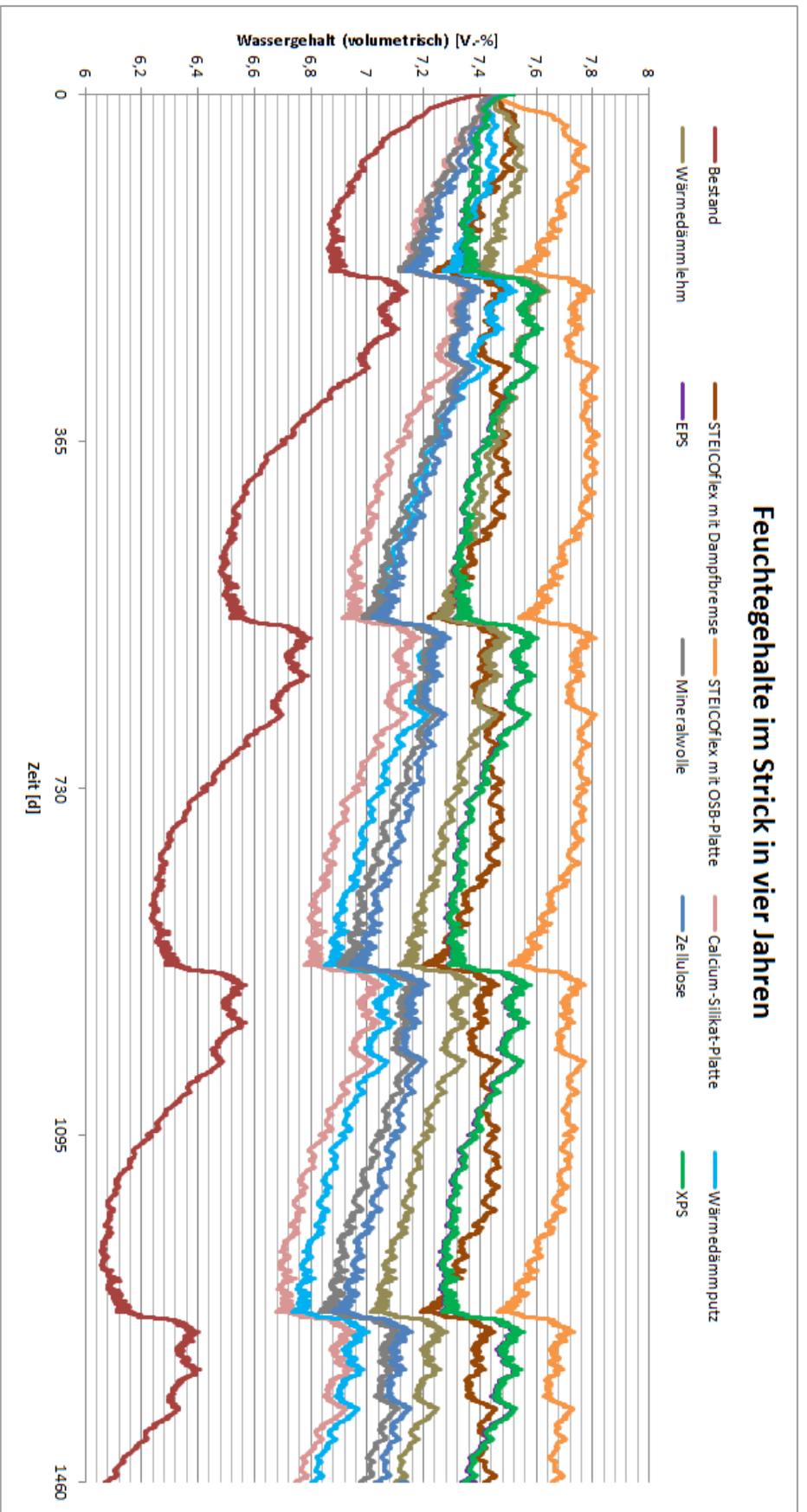


Abbildung 13-47: Feuchtegehalt in der Strickkonstruktion im Verlauf von vier Jahren

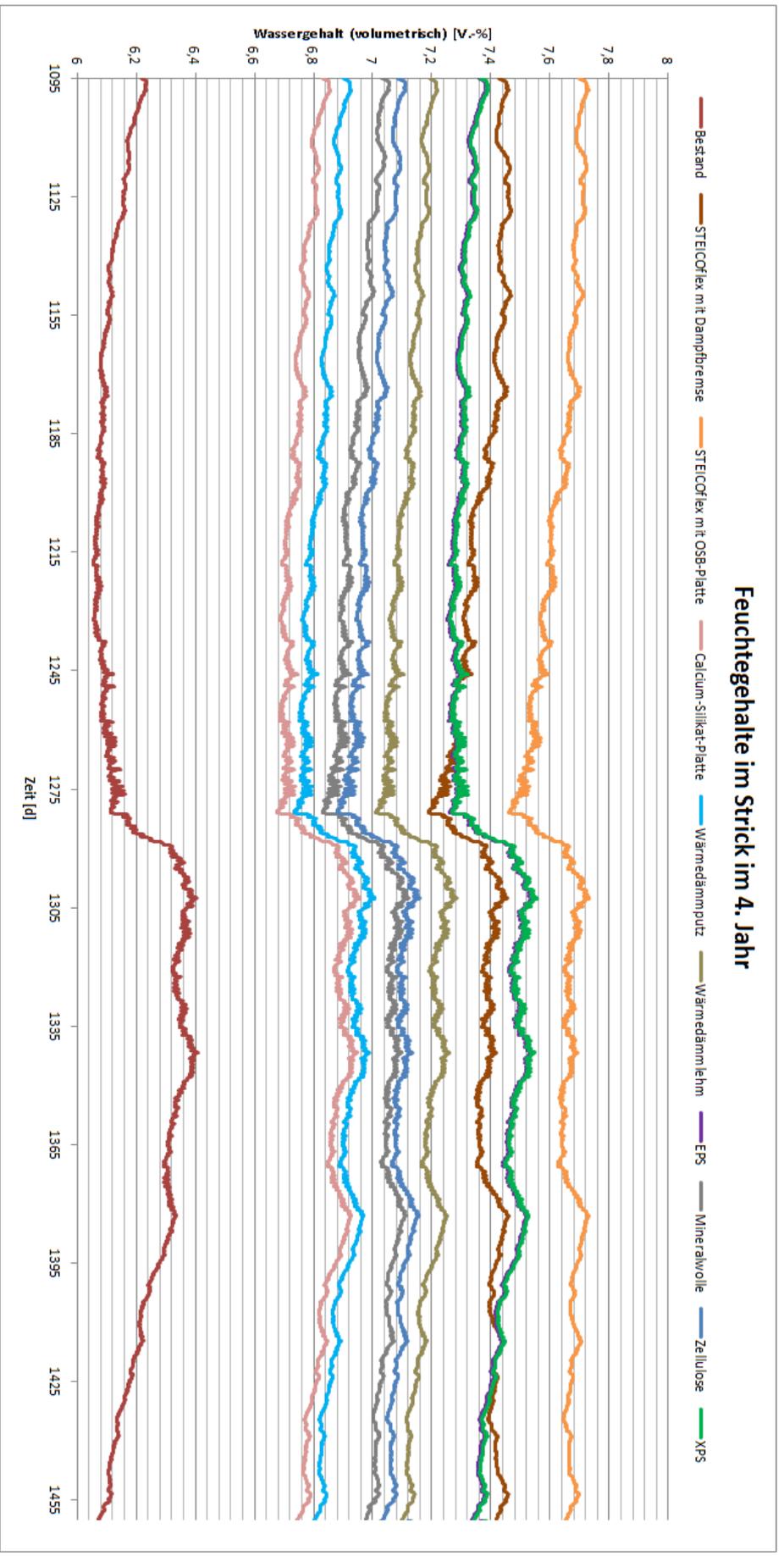


Abbildung 13-48: Feuchtegehalt in der Strickkonstruktion im Jahresverlauf

Für die in zwei Varianten untersuchte Holzfaserdämmplatten STEICOflex betragen die maximalen Feuchtegehalte für eine Dichte von $50 \frac{kg}{m^3}$ beim 20%-Kriterium 1,0 V.-% bzw. für das 30%-Kriterium 1,5V.-%.

Beide Werte werden bei den vorliegenden Randbedingungen teilweise überschritten (vgl. Abbildung 13-49 und Abbildung 13-50). Aufgrund der mangelnden Feuchtevariabilität der OSB-Platte und damit einem höheren $s_{d,i}$ -Wert ist das Feuchteniveau im Sommer in dieser Konstruktion etwas höher.

Im Sommer reduziert sich der Feuchtegehalt aufgrund der möglichen Austrocknung nach innen und außen etwas, was bei beiden Konstruktionen zu Werten unter 1,5 V.-% führt.

Die Konstruktionen sind daher hinsichtlich eines Befalls mit holzschädigenden Pilzen als eher kritisch zu bezeichnen.

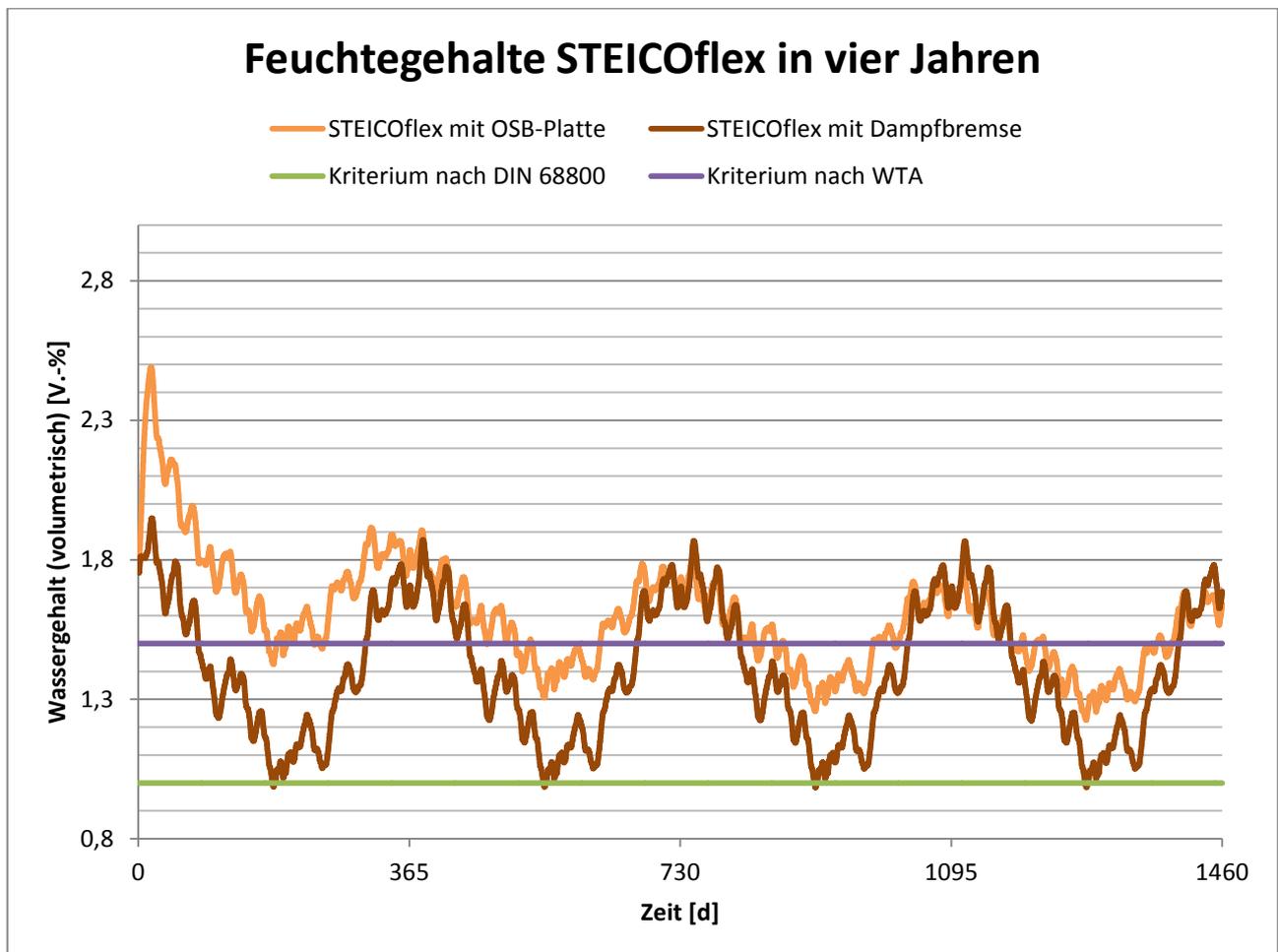


Abbildung 13-49: Feuchtegehalte der STEICOflex im Verlauf von vier Jahren

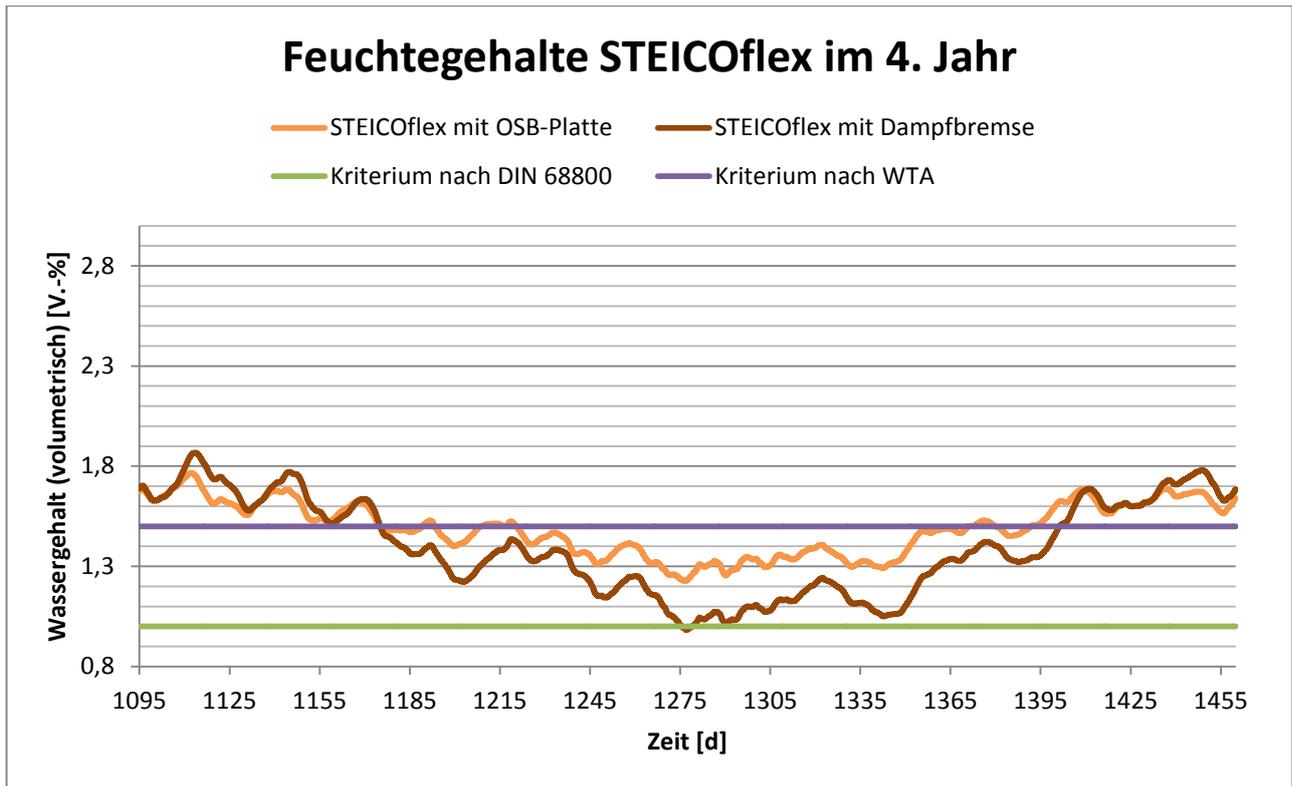


Abbildung 13-50: Feuchtegehalte STEICOflex im vierten Jahr

Bei der Variante mit Wärmedämmlehm wurde der Feuchtegehalt in der verwendeten und verbleibenden Sparschalung ermittelt. Dieser wird offensichtlich, da er auf der „warmen“ Seite der Konstruktion liegt, in erster Linie vom Raumklima beeinflusst. Für den maximalen Feuchtegehalt können die gleichen Kriterien wie für die Strickkonstruktion angesetzt werden. Somit sind die Feuchtegehalte unkritisch.

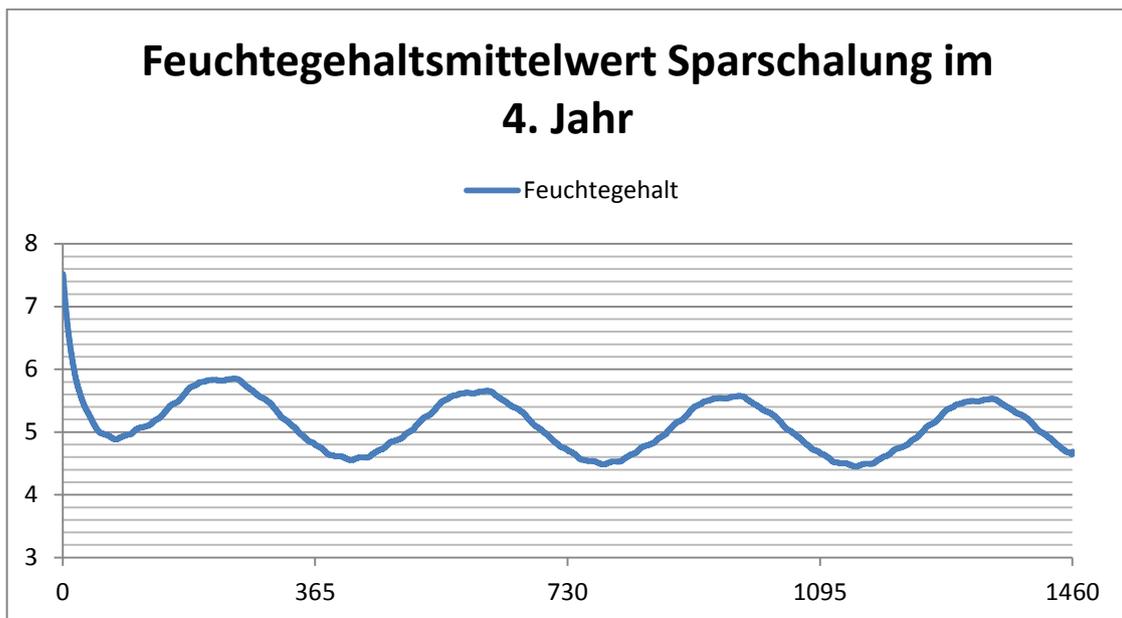


Abbildung 13-51: Feuchtegehalt Sparschalung im Verlauf von vier Jahren

Anhand der als am kritischsten ermittelten Variante der STEICOflex-Dämmung mit OSB-Platte, soll der Verlauf des Feuchtegehaltes im vierten Jahr innerhalb des Wandquerschnittes dargestellt werden.

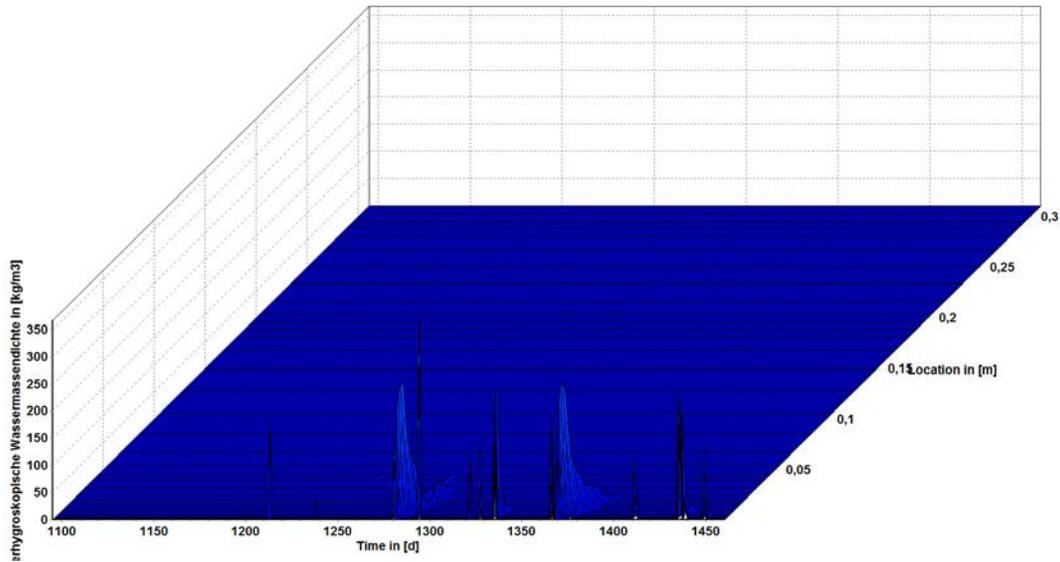


Abbildung 13-52: Überhygroskopische Feuchtemasse im vierten Jahr (STEICOflex mit OSB-Platte)

Selbst bei dieser Konstruktion kommt es nur in der Verschleißschicht der vorgesetzten Fassade zu überhygroskopischen Feuchtemassen (Abbildung 13-52). Die übrige Konstruktion ist durchgängig tauwasserfrei. Auch in keiner der anderen untersuchten Varianten tritt in der eigentlichen Konstruktion Tauwasser auf.

Bei Betrachtung des Jahresgangs des Wassergehaltes über den Bauteilquerschnitt sind ebenfalls besonders in der Fassade hohe Feuchtegehalte vorhanden. Zum Strick hin nimmt der Wassergehalt ab und steigt langsam bis zur Dämmebene an, innerhalb derer er dann wieder abnimmt (Abbildung 13-53).

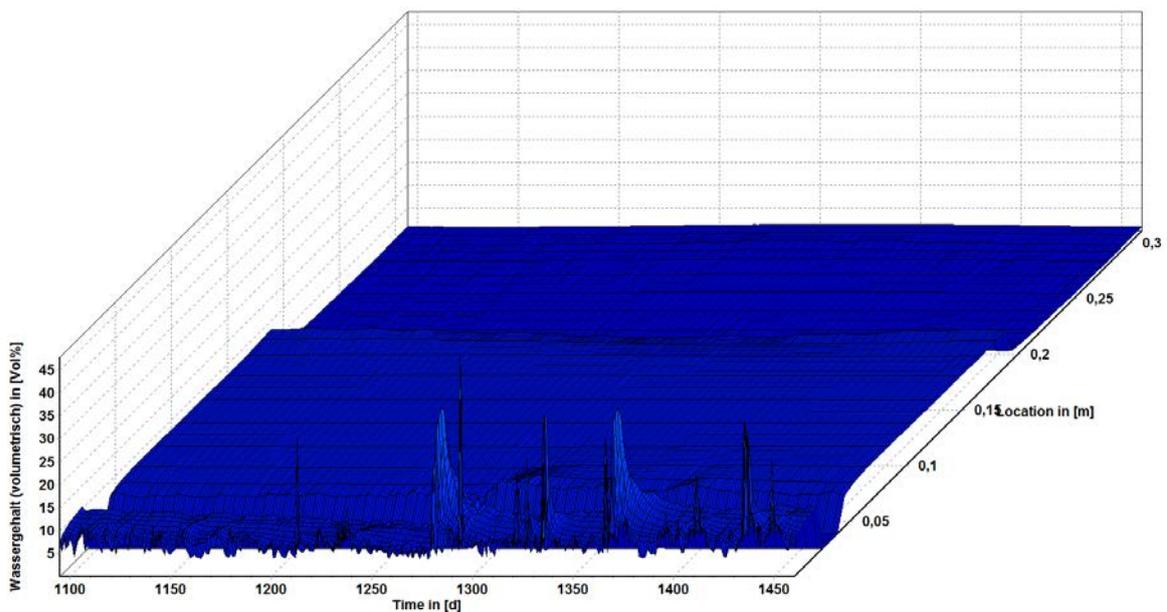


Abbildung 13-53: Wassergehalte im vierten Jahr (STEICOflex mit OSB-Platte)

Luftfeuchte hinter Dämmung

Wie im Kapitel zu den Innendämmungen dargelegt, sind besonders Bereiche auf der „kalten“ Seite der Dämmung, hier also an der Oberfläche der tragenden Strickkonstruktion, kritisch. Da die Feuchtegehalte der Konstruktion bereits beurteilt wurden, wurde hier die Luftfeuchte am Übergang Strick zu Dämmung untersucht. An solchen Übergängen kann es beispielsweise zur Bildung von Schimmelpilzen kommen [22], weshalb das bekannte Schimmelpilzkriterium von max. 80% relativer Luftfeuchte hier ein geeignetes Mittel zur Konstruktionsbeurteilung zu sein scheint und auch in der Literatur angewandt wird (z.B. [25]).

Zu erwähnen ist hierbei, dass bei hohlraumfreier Anbringung der Dämmung mit Verhinderung der Hinterströmung auch Luftfeuchten jenseits der 80% als unkritisch angesehen werden, da das benannte Kriterium grundsätzlich nur für Wohnraumoberflächen definiert wurde [42]. Das Kriterium liegt also auf der sicheren Seite hinsichtlich des Schimmelpilzwachstums. Als feuchtetechnisch kritischen Wert geben [42] eine relative Porenluftfeuchte von rund 85% an, welche bei den untersuchten Varianten nur kurzfristig im Frühjahr durch die Holzfaserdämmung mit OSB-Beplankung erreicht wird.

Da die relative Feuchte an der Strickoberfläche im Bestand mit der Raumbooberfläche zusammenfällt und diese bereits betrachtet wurde, fehlt die Bestandskonstruktion im folgenden Diagramm (Abbildung 13-54).

Aus bereits geschilderten Gründen ist auch hier die Konstruktion mit den Holzfaserdämmplatten am kritischsten, da die Temperatur in der Altkonstruktion am stärksten herabgesetzt wird. Der Vorteil einer feuchtevariablen Dampfbremse wird am deutlichsten, wenn man die Konstruktionen mit Dampfbremse (STEICOflex, Mineralwolle, Zellulose) mit den diffusionsdichten Konstruktionen der Varianten mit Polystyrolämmung (EPS, XPS) vergleicht.

Letztere besitzen über das gesamte Jahr ein nahezu gleiches Feuchteniveau, obwohl im Sommer, wie bei alle anderen Konstruktionen zu erkennen ist, aufgrund der höheren Temperaturen die relative Feuchte geringer ist. Bei den dampfdichten Konstruktionen ist es nun so, dass im Sommer, wenn sich Temperaturgradient und Dampfdruckgefälle teils umkehren, keine Dampfdiffusion nach innen stattfinden kann und sich somit der Wasserdampf am Übergang Strick zu Polystyrolämmung sammelt. Diese zusätzlichen Feuchtemengen gleichen nun offensichtlich gerade das prinzipiell niedrigere Feuchteniveau des Sommers aus, weshalb es zu keiner Absenkung der relativen Feuchte kommt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen auch [42], die für eine polystyrolkaschierte Gipskartonplatte einen kaum veränderlichen Jahresverlauf der relativen Feuchte auf der kalten Seite der Dämmung feststellten.

Zwar überschreiten die Feuchten bei den untersuchten Randbedingungen im Fall der Polystyrolämmungen nicht die angesetzten Grenzwerte, jedoch bieten sie auch keine Reserven, falls es kurzfristig zu höheren als bei den durchgeführten Berechnungen angesetzten Feuchtelasten kommt. Unter günstigen Verhältnissen kann hier im Gegensatz zu den anderen Konstruktionen keine Feuchte an die Raumluft abgegeben werden und somit keine Entlastung erfolgen.

Gut erkennbar ist bei den Konstruktionen mit Polystyrolämmung, welchen Stellenwert der Feuchteintrag von außen einnimmt, da die Konstruktion aufgrund der Dampfdichtheit den Diffusionsstrom von der Raumluft aus komplett unterbindet.

Die niedrigsten Luftfeuchten im Winter wurden für die Calcium-Silikat-Platte ermittelt, welche grundsätzlich den Verläufen der anderen Varianten folgt. Das besonders günstige Verhalten von Calcium-

Silikat-Platten aufgrund ihrer sehr guten Kapillaraktivität wird auch in der Literatur häufig beschrieben. Beispielsweise hat [43] im Zusammenhang mit der hygrothermischen Bauteilsimulation mittels DELPHIN Innendämmungen mit Zelluloseplatten, Mineraldämmplatten und Calcium-Silikat-Platten an einer Bestandsziegelwand untersucht und kam zu dem Ergebnis, dass bei den vorliegenden Randbedingungen lediglich letztere kein Aufschaukeln des Wassergehaltes bewirkten.

Unterboten werden die niedrigen Luftfeuchten der Calcium-Silikat-Platten nur teilweise noch durch Mineralwolle, Zellulose und den Wärmedämmputz, wobei letzterer außerdem den gleichförmigsten Verlauf mit weniger stark ausgeprägten Hoch- und Tiefpunkten ähnlich der Calcium-Silikat-Platte aufweist.

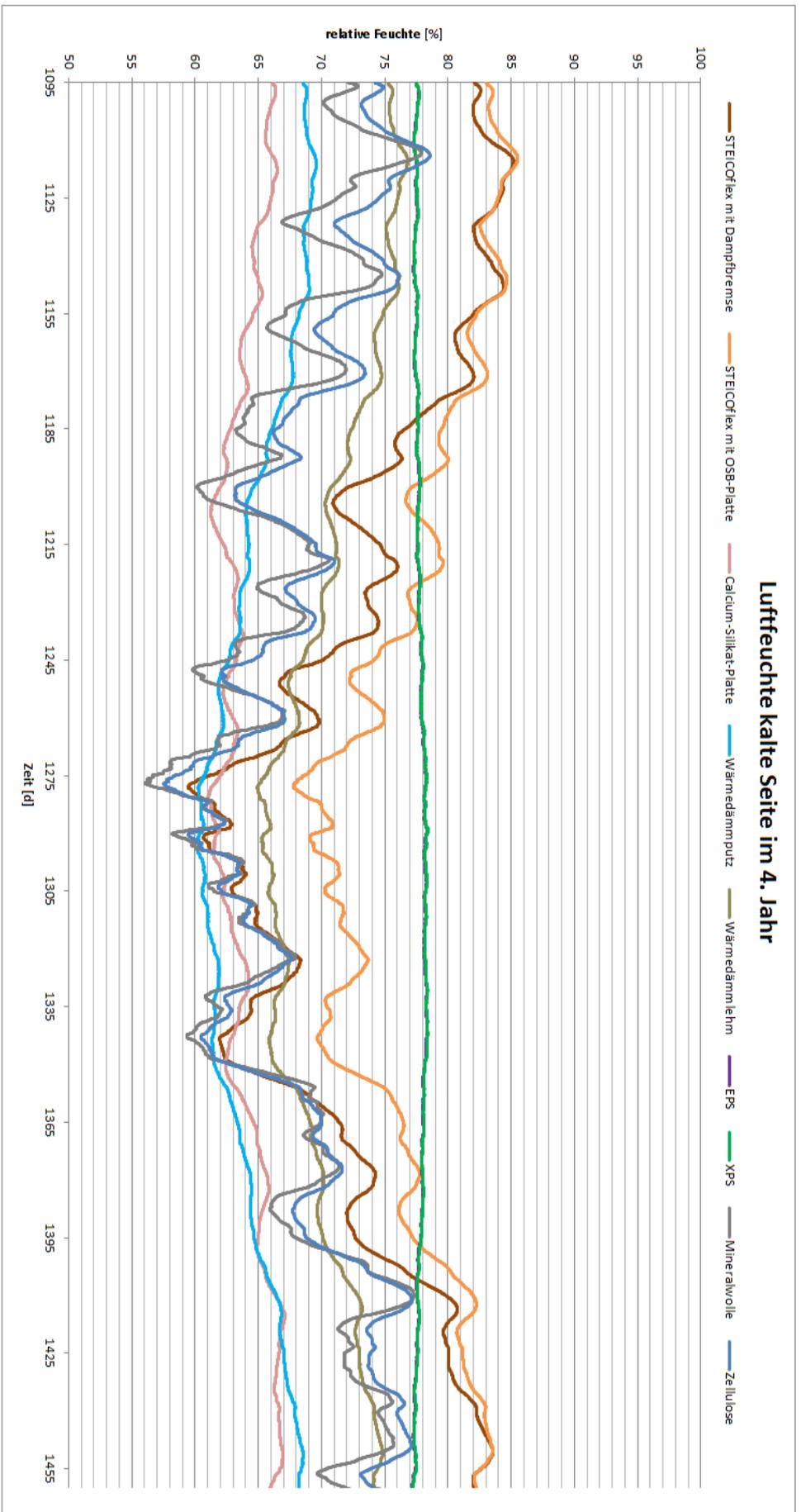


Abbildung 13-54: relative Feuchte Strickoberfläche im Jahresverlauf

Weitere Beurteilungen

Die Ergebnisse decken sich auch mit Veröffentlichungen zum Thema Innendämmung. So wurden in [44] vergleichende, rechnerische Untersuchungen mit WUFI zum Verhalten von Mineralwolleinnendämmungen mit Dampfbremse sowie Zellulosedämmungen durchgeführt. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass beide Varianten ein ähnliches hygrothermisches Verhalten zeigen, die Zellulose aufgrund ihrer Sorptionsfähigkeit jedoch besser geeignet ist, um Feuchtespitzen durch Niederschläge abzufedern. Letztere Aussage stützt sich dabei auf Simulationen mit und ohne Schlagregenbelastung.

Auch im vorliegenden Fall wird ein ähnliches hygrisch-thermisches Verhalten beider Varianten anhand der Feuchtegehaltsverläufe und den relativen Feuchten in den untersuchten Bereichen deutlich. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen [40] in ihren rechnerischen Untersuchungen (ebenfalls mit WUFI) zum Vergleich von Mineralwolle- und Zellulosefaserzwischenparrendämmungen. Demnach ist das Wassergehaltsniveau bei Zellulosedämmungen aufgrund deren Sorptionseigenschaften etwas höher. Hinsichtlich eines Schimmelpilzrisikos wurden in [40] Isoplethensysteme angesetzt, welche die Sporenauskeimzeiten in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte und Temperatur darstellen. Hier schneidet die Mineralwolle im Vergleich zu Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (DNR) nicht besser ab (Abbildung 13-55).

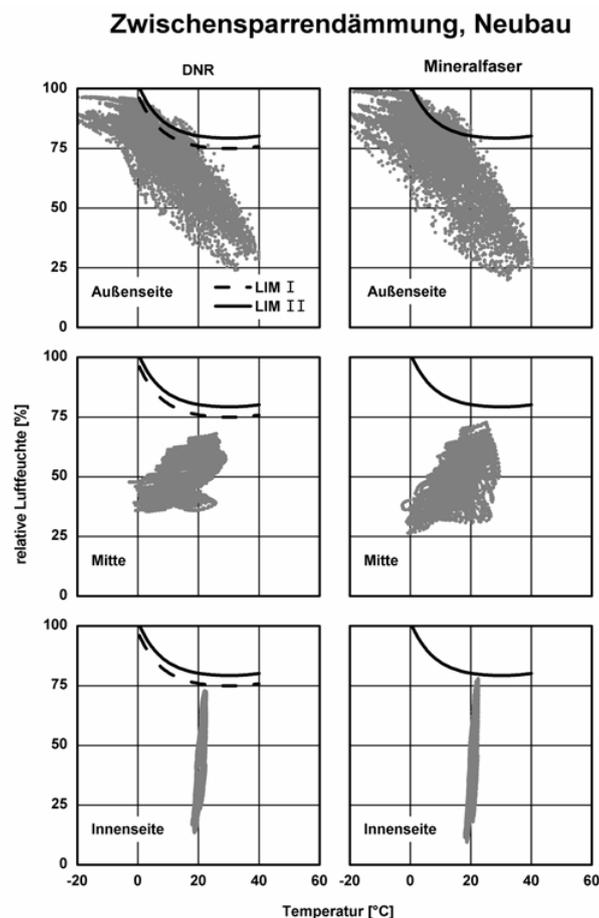


Abbildung 13-55: Klimatische Zustände für nachwachsende Rohstoffe und Mineralwolle an Dämmstoffaußenseite (oben), in -mitte (mittig) und -innenseite mit den Wachstumsgrenzen von Schimmelpilzen nach Substratgruppe I und II (LIM I/II); aus [40]

13.8.2. 2D-Detail

Im Anschluss an die ungestörten Wandquerschnitte wurde die nordöstlichste Hausecke im 1. OG untersucht. Grundsätzlich zeigen sich hier Bauverhaltensweisen analog zum ungestörten Wandquerschnitt. Lediglich die Feuchtegehalte in der Strickkonstruktion zeigen in einzelnen Varianten andere Tendenzen, weshalb diese sowie die im Bereich von Wärmebrücken besonders beachtenswerten Temperaturen und Luftfeuchten in den Eckbereichen einer gesonderten Betrachtung unterzogen wurden.

Temperatur Innenecke

Erwartungsgemäß zeigen sich hier niedrigere Temperaturen als am ungestörten Wandquerschnitt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sind auch hier sehr gering und ohne Bedeutung.

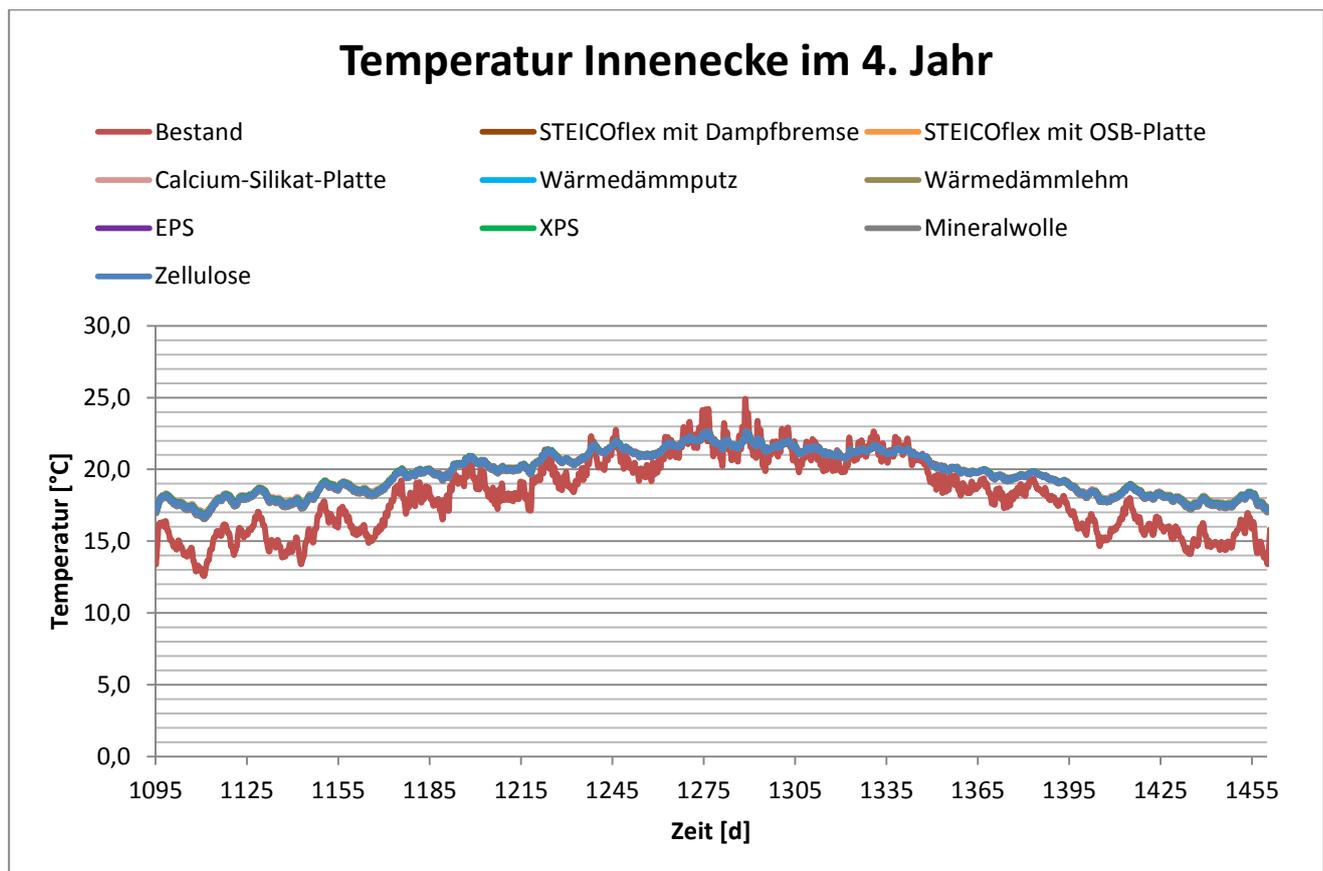


Abbildung 13-56: Temperaturverlauf Innenecke innerhalb eines Jahres

Luftfeuchte Innenecke

Wie schon im ungestörten Wandquerschnitt dargelegt, erfolgt auch hier der Luftfeuchteverlauf analog zum Temperaturverlauf. Die Luftfeuchten sind im Vergleich zum ungestörten Wandquerschnitt etwas erhöht, befinden sich aber auf einem unkritischen Niveau. Erwartungsgemäß sind im Bestand die höchsten Luftfeuchten vorzufinden.

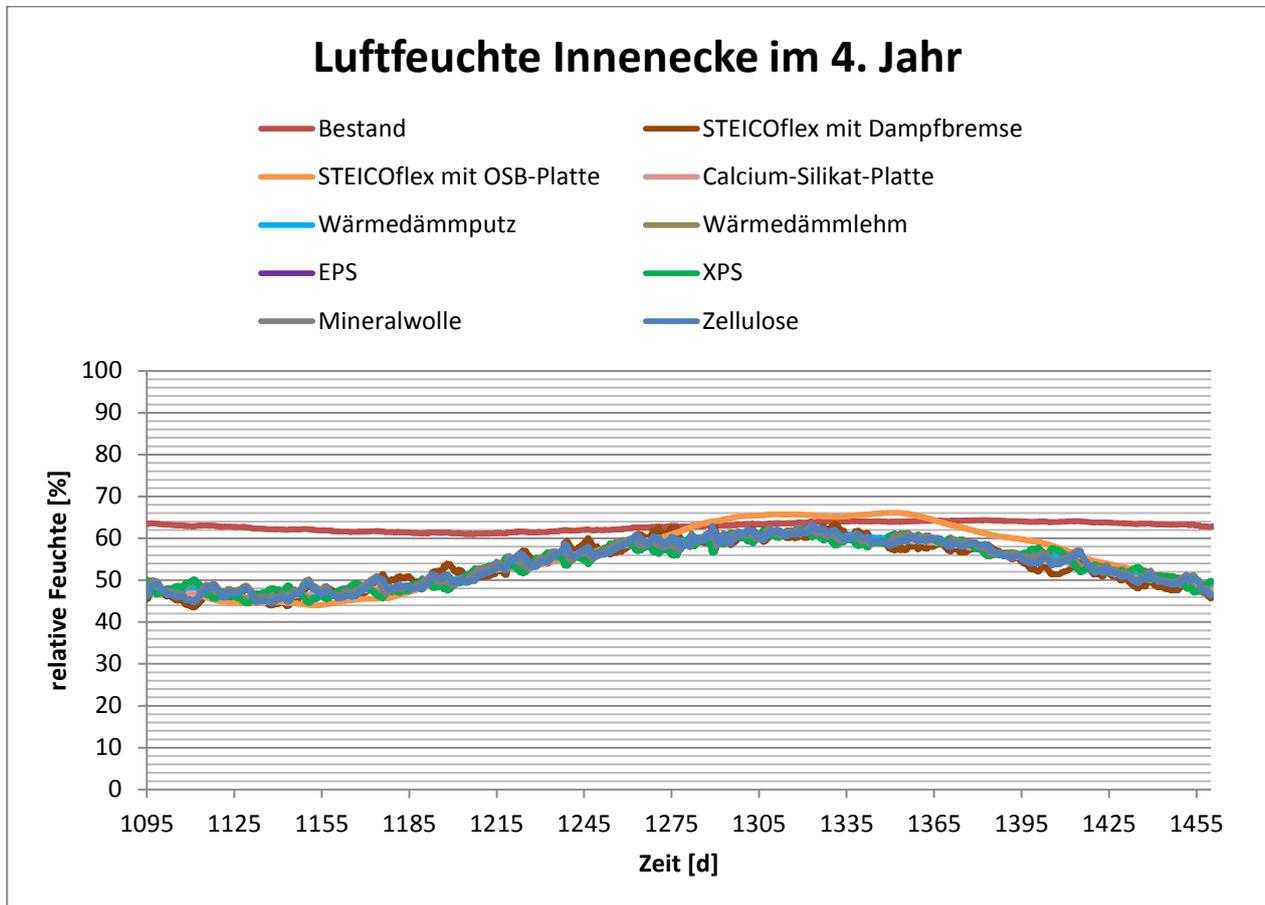


Abbildung 13-57: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Innenecke innerhalb eines Jahres

Feuchtegehalte

Für die bereits als kritisch beurteilten Konstruktionen verschärft sich die Lage nochmals. Zwar sind die Feuchtegehalte nicht wesentlich höher und nach wie vor nicht in schadensträchtigen Bereichen, jedoch kommt es bei den Varianten mit der STEICOflex-Dämmung sowie den dampfdichten Polystyrol-dämmungen zu einem geringen, aber kontinuierlichen Anstieg über die Jahre. Daher wurde die Berechnungsdauer in diesen Fällen auf sieben Jahre erhöht. Doch auch nach dieser Zeit nehmen die Feuchtegehalte im Strick weiterhin zu.

Zurückzuführen ist dies auf das durch die niedrigeren Temperaturen in der alten Konstruktion nochmals reduzierte Trocknungsvermögen aufgrund der geometrischen Wärmebrücke.

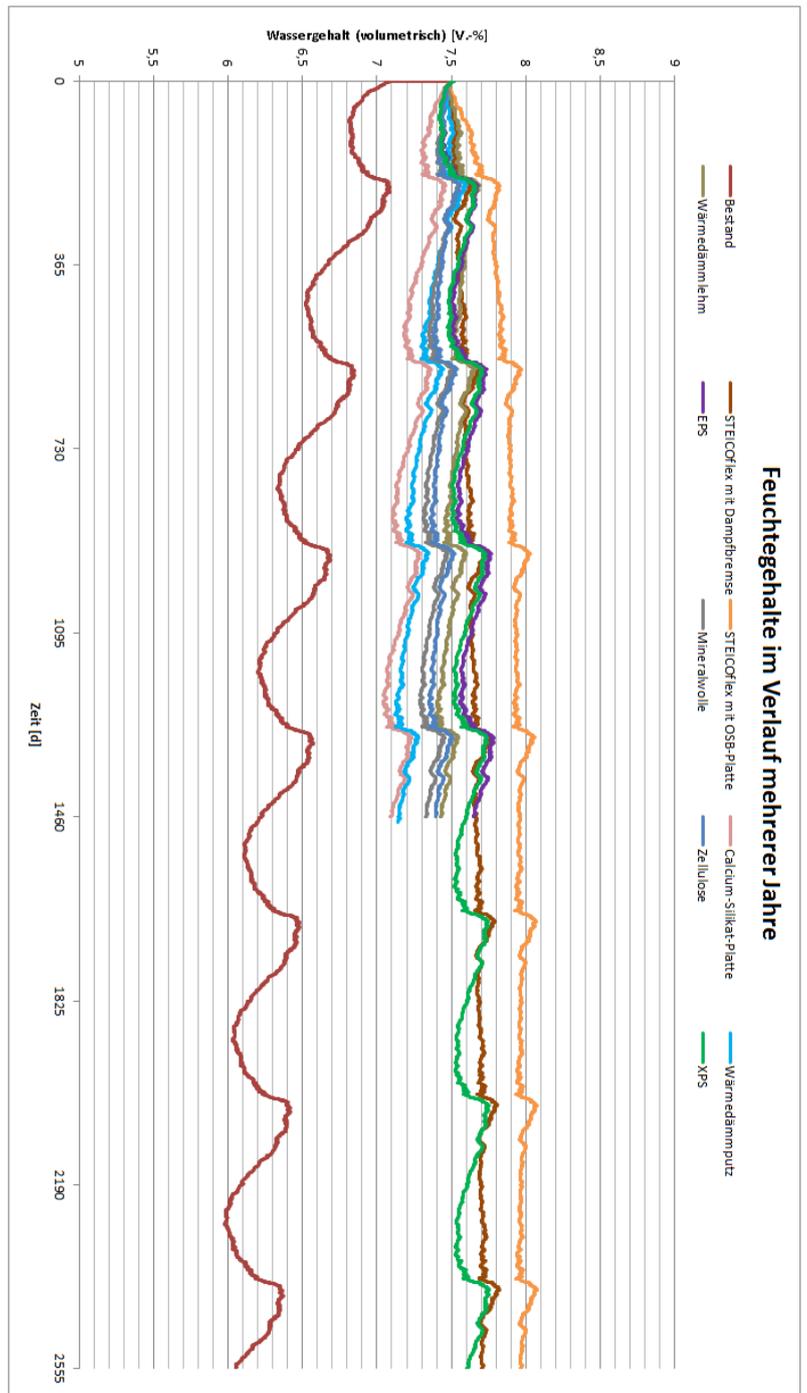


Abbildung 13-58: Feuchtegehalt in der Strickkonstruktion im Verlauf von bis zu sieben Jahren

Luftfeuchte hinter der Dämmung

Für den Tag mit der höchsten Luftfeuchte im Eckbereich hinter der Dämmung (19. Januar) ist hier exemplarisch die kritischste Variante (STEICOflex mit OSB-Platte) dargestellt.

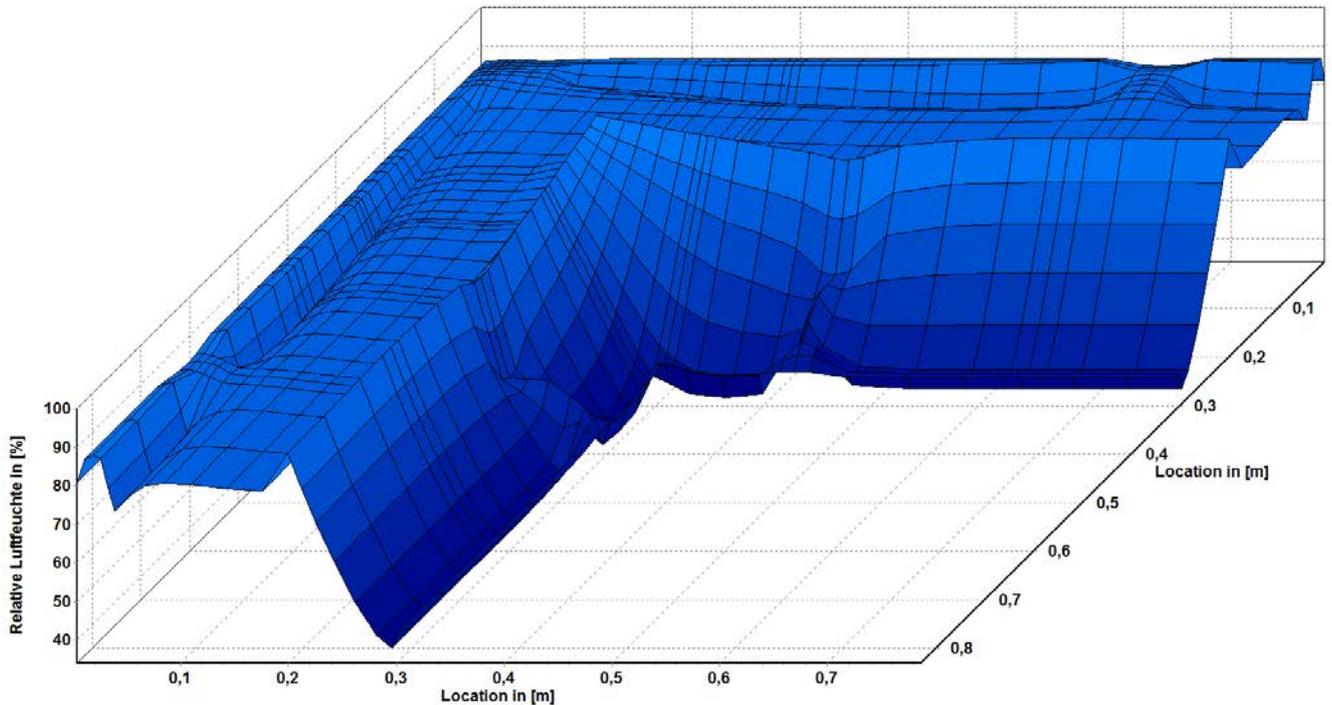


Abbildung 13-59: Luftfeuchtefeld am 19.Januar (STEICOflex mit OSB-Platte)

Für diesen Tag ergibt sich an besagter Stelle eine relative Luftfeuchte von 96% und ist damit deutlich über dem angesetzten Grenzwert. Für die Variante mit Dampfbremse statt OSB beträgt sie 90%, für die Polystyrolämmungen 88% und selbst die unkritischste Variante der Calcium-Silikat-Dämmung erreicht gerade noch 80%.

Der günstigste Tag (30. Juni) zeigt, dass sich die Konstruktionen jedoch im Jahresverlauf entspannen. So beträgt an gleicher Stelle die relative Luftfeuchte der Konstruktion mit STEICOflex-Dämmung und OSB-Platte noch 75%, für die Variante mit Dampfbremse 66%, die Polystyrolämmungen 80% und für jene mit Calcium-Silikat-Dämmung 70%, was gut mit den Beobachtungen am ungestörten Wandquerschnitt übereinstimmt.

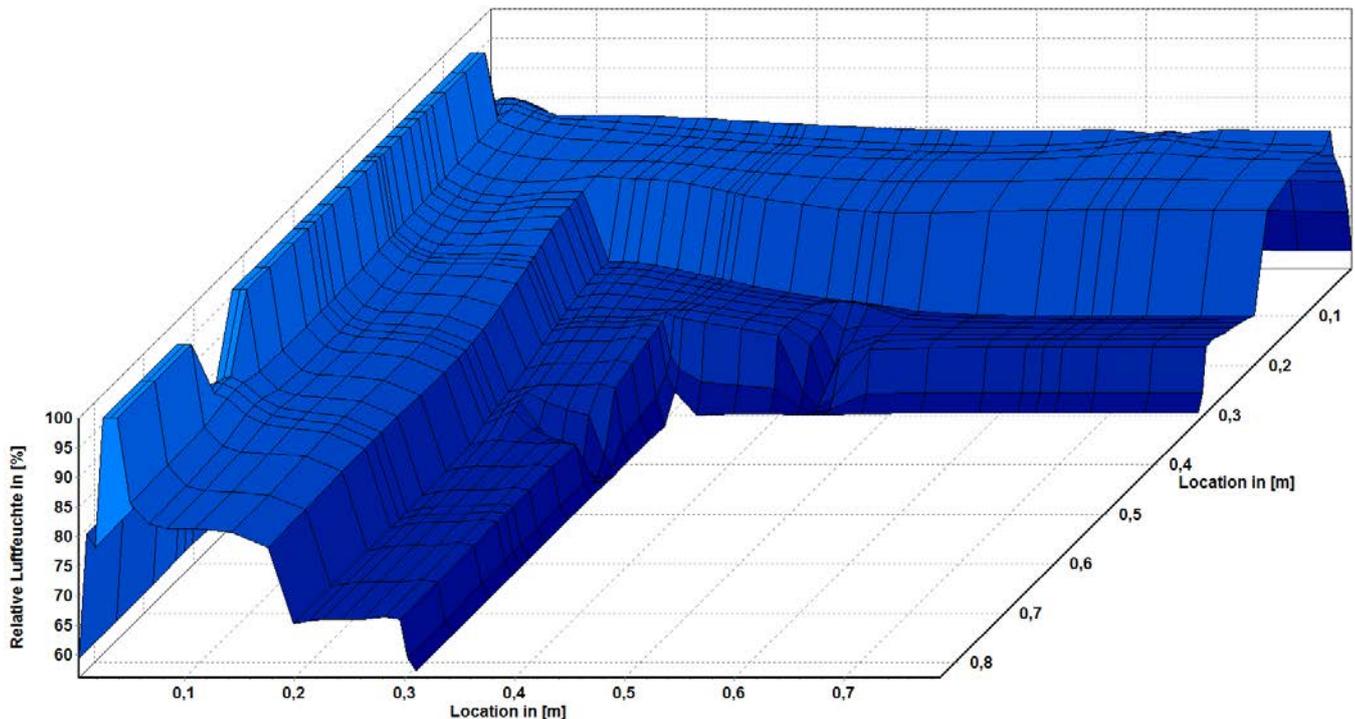


Abbildung 13-60: Luftfeuchtefeld am 30. Juni (STEICOflex mit OSB-Platte)

13.9. Zusammenfassung

Die hygrothermischen Simulationen haben die anhand der verwendeten Materialien erwarteten Zusammenhänge aufgezeigt.

Für die ungestörten Wandquerschnitte ergeben sich zunächst noch keine zu erwartenden Schäden an der Bausubstanz. Lediglich das Schimmelpilzkriterium wird bei den beiden Varianten mit STEICOflex-Dämmung in den Wintermonaten einige Zeit überschritten, was, wie im entsprechenden Zusammenhang dargelegt wurde, jedoch keine zwangsläufigen Beeinträchtigungen nach sich ziehen muss. Auch nehmen die Feuchtegehalte im Verlauf der Jahre, zwar teils langsam, aber dennoch stetig ab und überhygroskopische Feuchte entsteht nur in der Verschleißschicht der Fassadenverkleidung.

Dass die Betrachtung eindimensionaler Konstruktionsbereiche jedoch nicht immer ausreichend ist, zeigte die Auswertung der nordöstlichen Hausecke. Aufgrund der mehrfach geschilderten Herabsetzung der Temperaturen in der Bestandskonstruktion durch Innendämmungen ist das Trocknungsvermögen im Jahresverlauf deutlich reduziert. Es kommt hierbei für einzelne Konstruktionen zu einer stetigen Zunahme der Feuchtegehalte im Jahresvergleich. Teils ist dies auf die ungünstige Konstellation einer dampfdichten, raumseitigen Ebene, teils auf hohe Dämmstärken zurückzuführen. Auch die Luftfeuchten in der Ecke auf der kalten Seite der Dämmung nehmen im Bereich der Wärmebrücke sehr hohe Werte an, welche jedoch (außer bei den dampfdichten Varianten mit Polystyrolämmungen) bis zum Sommer wieder abgebaut werden.

14. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Spannungsfeld zwischen der Steigerung der Energieeffizienz und möglichen Bauschäden am Beispiel eines Appenzeller Strickbaus aufgezeigt werden, wobei die Erkenntnisse prinzipiell auch auf andere Holzblockbauten übertragbar sind.

Aufgrund denkmalschutzrechtlicher Einschränkungen können hier häufig nur Innendämmungen zum Einsatz kommen, welche die dargelegten Probleme mit sich bringen. Besonders aus feuchteschutztechnischer Sicht ist hier keine Steigerung des Wärmeschutzes in dem Maße möglich, wie es heutigen Standards entspricht, da mit steigenden Dämmstärken, wie durch die hygrothermischen Simulationen gezeigt wurde, verstärkt hygriische Belastungen der Bausubstanz über als kritisch eingestufte Zustände hinaus einhergehen. Neben den Auswirkungen auf die Wärmedämmung beeinflussen derlei Einschränkungen auch die so wichtige Herstellung einer luftdichten Gebäudehülle, was besonders im vorliegenden Fall deutlich wurde. Dementsprechend fallen die energetischen Einsparungen eher moderat aus.

Sollen derart historische Bauten langfristig bewahrt werden, müssen Kompromisse zwischen Denkmalschutz und Nutzung gefunden werden, im Rahmen derer dann gegebenenfalls weitere Maßnahmen denkbar sind, wie sie während dieses Forschungsvorhabens nicht umgesetzt werden konnten.

Aufbauend auf dieser Arbeit kann die Entwicklung und Beurteilung von umfangreicheren Sanierungsmaßnahmen der Fenster zur weiteren Minimierung der Wärmeverluste erfolgen, die über das Maß des bisher realisierten hinausgehen. Des Weiteren können sinnvolle Konzepte hinsichtlich haustechnischer Anlagen herausgearbeitet werden.

Im Hinblick auf den geplanten Rückbau sollten Konstruktionsdetails und Schäden möglichst detailliert aufgenommen, ausgewertet und mit den Annahmen und Ergebnissen dieser Arbeit abgeglichen werden. Ebenfalls sollte eine weitere Implementierung der Messwerte zur Optimierung der gewählten Modelle erfolgen, da besonders für den Zustand nach der Sanierung noch nicht genügend Messwerte vorhanden waren.

15. Literatur

- [1] Klöckner, K.: Der Blockbau. Callwey-Verlag, München 1982
- [2] Phleps, H.: Holzbaukunst – Der Blockbau. Bruder-Verlag, Karlsruhe 1942
- [3] Issel, H.: Der Holzbau. Reprint-Verlag, Leipzig 2004
- [4] Institut für Denkmalpflege und Bauforschung der ETH Zürich und Kantonale Denkmalpflege Appenzell Ausserrhoden: Appenzeller Strickbau: Untersuchungen zum ländlichen Gebäudebestand in Appenzell Ausserrhoden. Vdf Hochschulverlag, Zürich 2011
- [6] Künzel, H.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994
- [7] Passivhaus Institut: Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten. Darmstadt 2009
- [8] Willems, W./Häupl, P./Homann, M./Jenisch, R./Richter, E./Stohrer, M.: Lehrbuch der Bauphysik – Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2008
- [9] Willems, W./Dinter, S./Schild, K.: Handbuch Bauphysik – Teil 1: Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2006
- [10] Nicolai, A./Grunewald, J.: DELPHIN Reference Manual. Institut für Bauklimatik TU Dresden 2006
- [11] Vollenschaar, D./Müller, H.F.O./Gerhardt, U./Großkurth, K.P./Engelfried, R./Simon, Gerhard.: Wendehorst Baustoffkunde. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2004
- [12] Borsch-Laaks, R.: Jenseits von Glaser. In: die neue quadriga, 05/2003 & 06/2003
- [13] Bundesverband für angewandte Thermografie e.V.: VATH-Richtlinie Bauthermografie. Tabarz 2011
- [14] InfraTec GmbH: Einführung in Theorie und Praxis der Infrarot-Thermografie. Dresden 2004
- [15] Leimer, H.-P.: Wärmeschutz. Vorlesungsskript FH Hildesheim/Holzminde/Göttingen 2003
- [16] Czichos, H.: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften: D Werkstoffe – Wärmeleitfähigkeit von Werkstoffen. Springer-Verlag, Heidelberg 2000
- [18] STEICO SE: STEICOflex Produktdatenblatt. Feldkirchen, 2011
- [19] Willems, W./Schild, K.: Wärmeschutz. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden 2011
- [20] Verband der Bausachverständigen Norddeutschlands: Topthema Schimmelpilz. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2003
- [21] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart 2001
- [22] Borsch-Laaks, R.: Innendämmung – Wo ist das Risiko? In: WTA-Journal 1/06
- [23] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V.: Technische Richtlinie zur Innendämmung von Außenwänden mit Innendämm-Systemen. Baden-Baden 2012

-
- [24] WTA-Merkblatt 8-5:2008-05: Fachwerkinstandsetzung nach WTA V – Innendämmungen
- [25] Künzel, H.: Energetische Altbausanierung durch Innendämmung. In: WTA-Journal 4/04
- [26] Cammerer, J./Ackermann, T./Spitzner, M.: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Verbindungen und Anschlüssen bei Luftdichtheitsschichten mittels Klebmassen und Klebebändern. In: Bauphysik 30 (2008), Heft 5
- [27] Plagge, R.: Bauphysikalische Grundlagen in der energetischen Sanierung. Keimfarben Symposium Denkmal, Institut für Bauklimatik TU Dresden 2008
- [28] Künzel, H.: Problemlösungen für schwierige bauphysikalische Sanierungen – Variable Dampfbremsen, Fallbeispiele. Fraunhofer Institut für Bauphysik Stuttgart
- [29] Flury-Rova, M.: Weiterstricken am Strickbau. In: Heimatschutz Patrimoine 4/2011
- [30] Sedlbauer, K./Krus, M.: Möglichkeiten der Innendämmung beim Fachwerkbau. Fraunhofer Institut für Bauphysik Stuttgart
- [31] Ansorge, D.: Historische Holzbauwerke und Fachwerk – Teil 1: Schwerpunkt Wärme- und Feuchteschutz. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2008
- [32] Geburtig, G.: Innendämmung im Bestand. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2010
- [33] Künzel, H.: Bauphysik und Denkmalpflege. Fraunhofer-IRB-Verlag, Stuttgart 2009
- [34] WTA-Merkblatt 8-1:2008-07: Fachwerkinstandsetzung nach WTA I – Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkgebäude
- [35] Siskovic, S.: Auswahl und Bewertung geeigneter Innendämmsystem im Bestand. Diplomarbeit TU Wien 2007
- [36] WTA-Merkblatt 6-2-01: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse
- [37] Betzler, K.: Numerische Lösung partieller Differentialgleichungen. Skript Universität Osnabrück 2005
- [38] Feddek, P.: Neue Wege in der Innendämmung. Selbstverlag, Eggenstein-Leopoldshafen 2000
- [39] Brandhorst, J./Spitzendorfer, J./Gildhorn, K.: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, Berlin 2006
- [40] Sedlbauer, K./Krus, M.: Vorteile und Einsatzgrenzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen. Fraunhofer Institut für Bauphysik Stuttgart
- [41] WTA-Merkblatt 1-2-05: Der echte Hausschwamm
- [42] Borsch-Laaks, R.: Innendämmung mit oder ohne Dampfbremse? In: die neue quadriga, 03/2009
- [43] Holle, H.-J.: Innendämmung bei erhaltenswerten Fassaden – ein baukonstruktives Projektbeispiel. In: Bauphysik 31 (2009), Heft 4
- [44] Schafaczek, B./Zirkelbach, D.: Feuchtetechnische Beurteilung von Innendämmsystemen mit Faserdämmstoffen. In: wksb 67/2012

16. Normen und Verordnungen

DIN 4108-2:2003-07	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
DIN 4108-3:2001-07	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen – Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
DIN 4108-7:2011-01	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden – Anforderungen – Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele
DIN 4108-10:2008-06	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe
DIN 68800-1:2011-10	Holzschutz – Teil 1: Allgemeines
DIN EN 13187:1999-05	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Nachweis von Wärmebrücken in Gebäudehüllen – Infrarot-Verfahren
DIN EN 13829:2001-02	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren
DIN EN ISO 6949:2008-04	Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren
DIN EN ISO 10077-1:2010-05	Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 1: Allgemeines
DIN EN ISO 10077-2:2008-08	Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Anschlüssen – Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten – Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen
DIN EN ISO 10211:2008-04	Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen
DIN EN ISO 10456:2010-05	Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte
DIN EN ISO 13788:2001-11	Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinnern – Berechnungsverfahren
DIN EN ISO 13790:2008-09	Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung
DIN EN ISO 14683:2008-04	Wärmebrücken im Hochbau – Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient – Vereinfachte Verfahren und Anhaltswerte

DIN V 4108-4:2007-06	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
DIN V 4108-6:2003-06	Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs
E DIN 4108-4:2012-01	Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte
EnEV 2009	Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden