Forschungsinstitut für Wärmeschutz – FIW

Bauaufsichtlich anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle von Baustoffen und Bauteilen

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Wärme- und Feuchteschutzes

Institutsleitung

Prof. Dr. Andreas Holm

Fraunhofer-Institut für Bauphysik – IBP

Forschung, Entwicklung, Demonstration und Beratung auf den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe, Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme

Anwendungsbereiche, Chancen und Grenzen

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme

Anwendungsbereiche, Chancen und Grenzen

Forschung für energieeffiziente Gebäude und Quartiere
im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Förderkennzeichen: 03ET1248A/ 03ET1248B

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren:
Max Engelhardt
Florian Kagerer
Carolin Kokolsky
Christine Maderspacher
Holger Simon
Christoph Sprengard

Florian Antretter
Dr. Cornelia Fitz
Prof. Dr. Martin Krus
Prof. Dr. Hartwig Künzel
Tobias Schöner
Dr. Daniel Zirkelbach

München/ Holzkirchen, 02.04.2019

Forschungsinstitut für Wärmeschutz

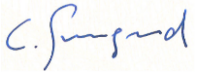
Lochhamer Schlag 4
82166 Gräfelfing
Telefon +49 (0) 89/85800-00
Telefax +49 (0) 89/85800-40
www.fiw-muenchen.de

Institutsleitung



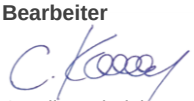
Prof. Dr. Andreas Holm

Abteilungsleitung



Christoph Sprengard

Bearbeiter



Carolin Kokolsky

Fraunhofer-Institut für Bauphysik

Fraunhoferstraße 10
83626 Valley
Telefon +49 (0) 8024/643-0
Telefax +49 (0) 8024/643-366
www.ibp.fraunhofer.de

Abteilungsleitung



Prof. Dr. Ing. H.M. Künzel

Bearbeiter



Florian Antretter

Bearbeiter



Dr. Cornelia Fitz

Bearbeiter



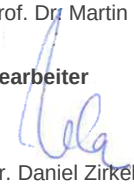
Prof. Dr. Martin Krus

Bearbeiter



Tobias Schöner

Bearbeiter



Dr. Daniel Zirkelbach

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis III

1 Einleitung 1

1.1 Hintergrund 2
1.2 Aufgabenstellung 4
1.3 Abbildungsverzeichnis 4
1.4 Literaturverzeichnis 4

2 Charakterisierung und Gruppierung von Innendämmsystemen 6

2.1 Markrecherche, Einteilung und Auswahl 6
2.1.1 Unterscheidung nach Materialgruppen 6
2.1.2 Unterscheidung nach Materialeigenschaften 11
2.1.2.1 Wärmeschutz 12
2.1.2.2 Feuchteschutz 15
2.1.3 Auswahl von Materialien für die eingehende Untersuchung 19
2.1.4 Zusammenfassung und Fazit 21
2.2 Thermische Eigenschaften 22
2.2.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Dämmstoffe unter stationären und instationären Temperaturbedingungen 23
2.2.1.1 Grundlagen zur Feuchteaufnahme von porösen Stoffen 23
2.2.1.2 Der Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit 25
2.2.1.3 Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit 27
2.2.1.4 Feuchte Dämmstoffe und Innendämmung 31
2.2.2 Methoden 33
2.2.2.1 Materialien 34
2.2.2.2 Konstruktionen 34
2.2.2.3 Varianten 36
2.2.3 Untersuchungen zu baupraktischen Feuchtegehalten 39
2.2.3.1 Auswertung der relativen Feuchtegehalte 40
2.2.3.2 Auswertung des Wassergehalts 42
2.2.4 Quantifizierung des Feuchteeinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit 44
2.2.4.1 Material 1 – Mineralische Dämmplatte 46
2.2.4.2 Material 2 – Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren 48
2.2.4.3 Material 3 – Holzfaserdämmplatte Nassverfahren 52
2.2.5 Zusammenfassung und Fazit 56
2.3 Hygrische Eigenschaften 58
2.3.1 Messverfahren 60
2.3.1.1 Rohdichte 60
2.3.1.2 Reindichte 60
2.3.1.3 Sorptionsisotherme 62

2.3.1.4 Freie Wassersättigung 63
2.3.1.5 Wasserdampfdurchlässigkeit 63
2.3.1.6 Wasseraufnahmekoeffizient 64
2.3.1.7 Trocknungsversuch 65
2.3.1.8 Kapillartransportkoeffizienten 66
2.3.1.9 KAPI-Test 68
2.3.2 Messergebnisse 69
2.3.3 Klassifizierung der kapillaren Rückleitungseigenschaften 76
2.4 Ökologische Analyse 78
2.4.1 Grundlagen der Lebenszyklusanalyse 79
2.4.1.1 Absicht und Zielsetzungen 79
2.4.1.2 Normung und Ablauf 80
2.4.2 Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten 82
2.4.2.1 Normung 82
2.4.2.2 Deklarierte Umweltparameter 83
2.4.2.3 Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes 83
2.4.2.4 Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen 84
2.4.3 Untersuchungsrahmen 87
2.4.3.1 Datensammlung 87
2.4.3.2 Systemgrenzen 88
2.4.3.3 Wahl der Wirkungskategorien 88
2.4.4 Ökologische Eigenschaften von Innendämmmaterialien 88
2.4.4.1 Funktionseinheit 88
2.4.4.2 Untersuchungsumfang 89
2.4.4.3 Auswertung innerhalb der Produktgruppen 89
2.4.5 Ökologische Qualität von Innendämmsystemen im Vergleich 92
2.4.5.1 Funktionseinheit Referenzwand 92
2.4.5.2 Mengenermittlung 93
2.4.5.3 Datengrundlage 93
2.4.5.4 Ergebnisse der Ökobilanzierung 96
2.4.6 Zusammenfassung und Fazit 105
2.5 Abbildungsverzeichnis 106
2.6 Tabellenverzeichnis 108
2.7 Literaturverzeichnis 109

3 Energetische und feuchtetechnische Bemessung durch hygrothermische Simulation 112

3.1 Hintergrund 112
3.2 Auswahl repräsentativer Bestandskonstruktionen 112
3.2.1 Vollziegelwand 114
3.2.2 Zweischaliges Mauerwerk 114
3.2.3 Hochlochziegel-Mauerwerk (HLZ) 115
3.2.4 Betonhohlblock-Mauerwerk 116
3.3 Schlagregenbelastung und Schlagregenschutz 117

3.3.1 Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassaden 117
3.3.1.1 Stand der Forschung....118
3.3.1.2 Eigene Freilandmessungen 121
3.3.2 Bestimmung des Schlagregenschutzes von Fassaden 132
3.3.2.1 Grundlagen 132
3.3.2.2 Übersicht gebräuchlicher In-Situ-Messverfahren....135
3.3.2.3 Vergleich der Messverfahren 139
3.3.2.4 Erkenntnisse für die in-situ Erfassung des Schlagregenschutzes....157
3.4 Untersuchte Innendämmsysteme 158
3.4.1 Holzfaser-Dämmplatten 158
3.4.2 Hanffaser-Dämmplatte....160
3.4.3 Kork-Lehm-Dämmplatte....161
3.4.4 Aerogel-Hochleistungsdämmputz 162
3.4.5 Hochleistungsdämmputz....163
3.4.6 Mineral-Dämmplatte....164
3.4.7 Organische Aerogel-Dämmplatte....165
3.4.8 Mineralische Aerogel-Dämmplatte....166
3.4.9 EPS-Innendämmung als Verbund-Dämmplatte und als verputztes System 167
3.5 Freilandversuche 168
3.5.1 Aufbau von Wandelementen....169
3.5.2 Durchführung der Messungen 174
3.5.3 Messergebnisse 175
3.5.4 Validierung – Nachberechnung der Freilandversuche....187
3.5.5 Zusammenfassung und Fazit....191
3.6 Durchgeführte Untersuchungen und Randbedingungen....192
3.6.1 Außenklima 192
3.6.2 Raumklima 195
3.6.3 Farbgebung der Oberfläche....196
3.6.4 Dampfbremse und Deckschichten an der Innenseite 197
3.7 Auswahl und Definition der Bewertungskriterien 197
3.7.1 Maximale Tauwassermenge in hydrophoben Faserdämmstoffen....200
3.7.2 Schimmelpilzrisiko auf der Innenoberfläche 200
3.7.3 Feuchte im Bereich der Grenzschicht zum Bestandsmauerwerk 201
3.7.4 Erhöhung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks 201
3.7.5 Wachstum von holzzerstörenden Pilzen im Dämmstoff 202
3.7.6 Anstieg des Feuchteniveaus durch das Innendämmsystem 202
3.7.7 Zusammenfassendes Bewertungsschema....202
3.8 Ergebnisse und Bewertung der Feuchteverhältnisse....204
3.8.1 Numerische Qualitätsprüfung der erzielten Berechnungsergebnisse 204
3.8.2 Holzfaser-Dämmplatten 208
3.8.2.1 Nicht hydrophobierte Holzfaserdämmung....210

3.8.2.2 Hydrophobierte Holzfaserdämmung 211
3.8.2.3 Vergleich der beiden Holzfaserdämmstoffe 212
3.8.3 Hanffaser Dämmplatte 215
3.8.4 Kork-Lehm-Dämmplatte 218
3.8.5 Aerogel-Hochleistungsdämmputz 221
3.8.6 Hochleistungsdämmputz 223
3.8.7 Mineral-Dämmplatte 225
3.8.7.1 Mineral-Dämmplatte mit Dünnbettmörtel als Kleberschicht 226
3.8.7.2 Mineral-Dämmplatte mit Leichtmörtel als Kleberschicht 227
3.8.8 Organische Aerogel-Dämmplatte 228
3.8.9 Mineralische Aerogel-Dämmplatte 231
3.8.10 EPS-Innendämmung als Verbund-Dämmplatte und als verputztes System 233
3.8.10.1 Verbundplatte mit grauem EPS 234
3.8.10.2 Konventionelle weiße EPS-Dämmung mit Innenputz 235
3.9 Zusammenfassung und Ausblick 237
3.10 Abbildungsverzeichnis 239
3.11 Tabellenverzeichnis 244
3.12 Literaturverzeichnis 244

A.3 Energetische und feuchtetechnische Bemessung durch hygrothermische Simulation 249

A.3.1 Ergebnis-Heatmaps: Nicht hydrophobierte Holzfaser 250
A.3.2 Ergebnis-Heatmaps: Hydrophobierte Holzfaserdämmung 256
A.3.3 Hanffaser-Dämmplatte 262
A.3.4 Kork-Lehm-Dämmplatte 269
A.3.5 Aerogel-Hochleistungsdämmputz 275
A.3.6 Hochleistungsdämmputz 281
A.3.7 Mineral-Dämmplatte 287
A.3.8 Organische Aerogel-Dämmplatte 294
A.3.9 Mineralische Aerogel-Dämmplatte 299
A.3.10 EPS-Innendämmung als Verbund-Dämmplatte und als verputztes System 305

4 Berechnungen und deren Validierung von 2- und 3-dimensionalen Wärmebrücken bei Anschlussdetails mit Innendämmung 312

4.1 Einführung 312
4.1.1 Hintergrund und Problemstellung 312
4.1.2 Zielsetzung 312
4.1.3 Vorgehen 313
4.2 Grundlagen 313
4.2.1 Wärmebrücken 313
4.2.2 Arten von Wärmebrücken 314
4.2.3 Kennwerte von Wärmebrücken 315
4.2.3.1 Oberflächentemperaturen 315

4.2.3.2 Temperaturfaktor f_{Rsi} 316
4.2.3.3 Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ 317
4.2.4 Besonderheiten bei Innendämmung 317
4.2.5 Regelungen 319
4.2.5.1 Anforderungen und Berücksichtigung nach EnEV 319
4.2.5.2 Anforderungen nach DIN 4108-2 320
4.2.6 Feuchteschutz 321
4.2.6.1 Tauwasserschutz 321
4.2.6.2 Schimmelkriterium 322
4.3 Untersuchungsumfang und Randbedingungen 324
4.3.1 Berechnungsgrundlagen 324
4.3.2 Parametervariation 325
4.3.2.1 Wärmeleitfähigkeit Bestandskonstruktionen 325
4.3.2.2 Dämmstärke und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung 325
4.3.3 Materialkennwerte 326
4.3.4 Klimatische Randbedingungen 327
4.3.4.1 Stationäre Randbedingungen 328
4.3.4.2 Instationäre Randbedingungen 328
4.3.4.3 Erdberührte Bauteile 329
4.3.5 Untersuchte Anschlussdetails 330
4.4 Berechnungsmethoden und Hilfsmittel 338
4.4.1 Verwendete Programme 338
4.4.1.1 Inventor Professional 338
4.4.1.2 Comsol Multiphysics 338
4.4.1.3 WUFI-Bio 338
4.4.2 Schimmelpilzprognose 339
4.4.2.1 Isoplethenmodell 339
4.4.2.2 Herangehensweise zur vereinfachten Hochrechnung auf die Jahresprognose 340
4.5 Durchführung der Berechnungen 343
4.5.1 Vorgehen 343
4.5.2 Berechnungsprogramm 344
4.5.3 Ergebnisse stationäre Berechnungen 346
4.5.4 Ergebnisse instationäre Berechnungen 349
4.6 Auswertungen 350
4.6.1 Ermittlung Temperaturfaktoren f_{Rsi} 350
4.6.2 Auf Basis der in Kapitel 1.5.3 dargestellten Ergebnisse, wurden die Temperaturfaktoren ermittelt. Zusammenhang zwischen Ergebnissen von 2-dimensionalen und 3-dimensionalen Modellen 350
4.6.2.1 Graphische Auswertung 350
4.6.2.2 Untersuchung Einflussfaktoren 353
4.6.3 Entwicklung eines Regressionsmodells 357
4.6.4 Schimmelpilzprognose 359
4.6.4.1 Ergebnisauszug für Detail 3 359

4.6.4.2 Ergebniszusammenfassung für alle Details 362
4.7 Ergebnisse und Validierung 365
4.8 Messtechnische Validierung der 3- dimensionalen Berechnungen 372
4.8.1 Vorgehen 372
4.8.2 Bau der Prüfkörper 373
4.8.2.1 Einbindende Decke 373
4.8.2.2 Einbindende Innenwand 374
4.8.2.3 Anbringen der Thermoelemente und Messplatten 375
4.8.3 Durchführung der Messungen und Berechnungen 377
4.8.3.1 Messkonzept 377
4.8.3.2 Funktionsweise Hotbox 377
4.8.3.3 Numerische Berechnungen 378
4.8.4 Auswertung stationäre Betrachtung 379
4.8.4.1 Vergleich Oberflächentemperaturen 380
4.8.4.2 Messtechnische Bestimmung des Wärmebrückenkoeffizienten Ψ und Vergleich mit numerischer Berechnung 377
4.9 Zusammenfassung 385
4.9.1 Modellentwicklung zur Vorhersage 385
4.9.2 Instationäre Berechnungen und Schimmelpilzprognose 386
4.9.3 Messtechnische Validierung 387
4.10 Abbildungsverzeichnis 388
4.11 Tabellenverzeichnis 390
4.12 Literaturverzeichnis 391

5 Energetische Betrachtung von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb unter Komfortbedingungen 393

5.1 Modellentwicklung 394
5.1.1 Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch 395
5.1.1.1 Grundlagen 395
5.1.1.2 Erste Validierungsschritte 397
5.1.1.3 Modellumsetzung 399
5.1.2 Modell zu Bauteilintegrierten Heizsystemen 401
5.1.2.1 Grundlagen 401
5.1.2.2 Modellumsetzung 403
5.1.2.3 Beispielhafte Modellauswirkung 403
5.2 Simulationsbasierte Vorstudie zur Auswahl der Messungen 404
5.2.1 Wahl der Dämmvarianten 404
5.2.2 Wahl der Heizsysteme 407
5.2.3 Wahl der Betriebsmodi 407
5.3 Messtechnische Erfassung des Energieeinsparpotentials bei innen gedämmten Gebäuden mit intermittierendem Betrieb 410
5.3.1 Experimentelles Design – Versuchstraum für Innendämmungen 410
5.3.2 Modellbeschreibung WUFI® Plus 415

5.3.3 Limitationen beim Vergleich von WUFI® Plus Modell und Messungen....416
5.3.4 Validierung des Modells zu bauteilintegrierten Heizsystemen....417
5.3.4.1 Validierungsfall 1 – Ungedämmt mit Fußbodenheizung....418
5.3.4.2 Validierungsfall 2 – Innendämmung 4cm und Wandheizung....420
5.3.5 Validierung des Modells zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen....422
5.3.5.1 Vorgehen....422
5.3.5.2 Definition des Erfolgskriteriums....424
5.3.5.3 Validierungsfall 1- Ungedämmt mit Fußbodenheizung....424
5.3.5.4 Validierungsfall 2- Innendämmung 4cm und Wandheizung....429
5.3.6 Zusammenfassung und Diskussion....433
5.4 Simulationsbasierte Parameterstudie....435
5.4.1 Definition der Parameter....435
5.4.1.1 Konstante Parameter....435
5.4.1.2 Nutzungsszenarien....438
5.4.1.3 Entwicklung der Belegungsprofile....438
5.4.1.4 Entwicklung der inneren Wärmelastprofile....440
5.4.1.5 Entwicklung der inneren Feuchtelastprofile....444
5.4.1.6 Dämmvarianten....446
5.4.1.7 Heizsysteme....447
5.4.1.8 Betriebsvarianten....447
5.4.2 Definition der Bewertungskriterien....448
5.4.2.1 Schadensfreiheit....448
5.4.2.2 Thermische Behaglichkeit im Sommer....449
5.4.2.3 Thermische Behaglichkeit im Winter....450
5.4.2.4 Energiesparpotential....452
5.4.3 Auswertung der Parameterstudie....452
5.4.3.1 Schadensfreiheit....452
5.4.3.2 Thermische Behaglichkeit im Sommer....455
5.4.3.3 Thermische Behaglichkeit im Winter....455
5.4.3.4 Energiesparpotential....463
5.4.3.5 Kombinierte Betrachtung von Energieeinsparung und Komfort....466
5.4.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten....469
5.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse....472
5.4.6 Skalierung der Ergebnisse....473
5.4.6.1 Ermittlung der relevanten Gebäudefläche....474
5.4.6.2 Ermittlung des Energieverbrauchs und Einsparpotentials....476
5.4.6.3 Vergleich und Diskussion....477
5.5 Zusammenfassung und Ausblick....478
5.6 Abbildungsverzeichnis....482
5.7 Tabellenverzeichnis....485
5.8 Literaturverzeichnis....486

A.5 Energetische Betrachtung von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb unter Komfortbedingungen 489

A.5.1 Testraum für Innendämmungen – Ansichten und Messpositionen 489
A.5.2 Validierungsfall 1B – Oberflächentemperaturen und konvektive Wärmeströme der einzelnen Messpositionen 493
A.5.3 Validierungsfall 2B – Oberflächentemperaturen und konvektive Wärmeströme der einzelnen Messpositionen 498
A.5.4 Bestandskonstruktionen Parameterstudie 503
A.5.5 Auswertung der Parameterstudie: Kombinierte Betrachtung von thermischer Behaglichkeit und Energiesparpotential - tabellarische Darstellung 506
A.5.6 Auswertung der Parameterstudie: Kombinierte Betrachtung von thermischer Behaglichkeit und Energiesparpotential - grafische Darstellung 517

6 Dissemination 523

6.1 In Lehre und Forschung 523
6.2 Für Hersteller, Fachplaner und Anwender 523

7 Zusammenfassung 526

7.1 Charakterisierung von Innendämmstoffen 526
7.1.1 Marktrecherche, Einteilung und Auswahl 527
7.1.2 Thermische Eigenschaften 527
7.1.3 Hygrische Eigenschaften 528
7.1.4 Ökologische Analyse 528
7.2 Energetische und feuchtetechnische Bemessung 529
7.2.1 Feuchteverhalten der untersuchten Innendämmung 529
7.2.2 Schlagregenbelastung und Schlagregenschutz 530
7.3 Anschlussdetails und Wärmebrücken 531
7.4 Intermittierender Betrieb 533
7.5 Weiterer Forschungsbedarf 534
7.6 Literaturverzeichnis 535

1 Einleitung

Der steigende Primärenergieverbrauch und damit der enorme Verbrauch fossiler Ressourcen haben dazu geführt, dass der weltweite CO_2-Ausstoß alarmierende Werte erreicht hat. Dies verstärkt den natürlichen Treibhauseffekt in der Erdatmosphäre, was das globale Klima beeinflusst. Im aktuellen IPCC-Sonderbericht von Oktober 2018 (IPCC 2018)heißt es, dass menschliche Aktivitäten Schätzungen zufolge bereits eine globale Erwärmung von 1,0 °C gegenüber den vorindustriellen Werten verursacht haben. Nimmt die globale Erwärmung weiterhin mit der aktuellen Geschwindigkeit zu, wird diese im Zeitraum zwischen 2030 und 2052 die Grenze von 1,5 °C erreichen. Da die klimabedingten Risiken für natürliche und menschliche Systeme mit fortschreitender Erwärmung immer weiter steigen, sollte es jedoch das langfristige Ziel sein, die Klimaerwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen. Um dieses Ziel noch zu erreichen sind schnelle und weitreichende Systemübergänge in der Energie-, Land-, Stadt- und Infrastruktur sowie in Industriesystemen erforderlich. Eine einschneidende Emissionsminderung in allen Sektoren ist essentiell.

Vor demselben Hintergrund veröffentliche die Bundesregierung bereits im September 2010 ihr „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“. Folgende quantitative Hauptziele wurden hierfür festgelegt:

- Reduktion der Treibhausgasemissionen um 80 - 95 % gegenüber 1990
- Verminderung des Primärenergieverbrauchs um 50 % gegenüber 2008
- Senkung des Stromverbrauchs um 25 % gegenüber 2008
- Ausbau der erneuerbaren Energien auf 60 % des Bruttoendenergieverbrauchs

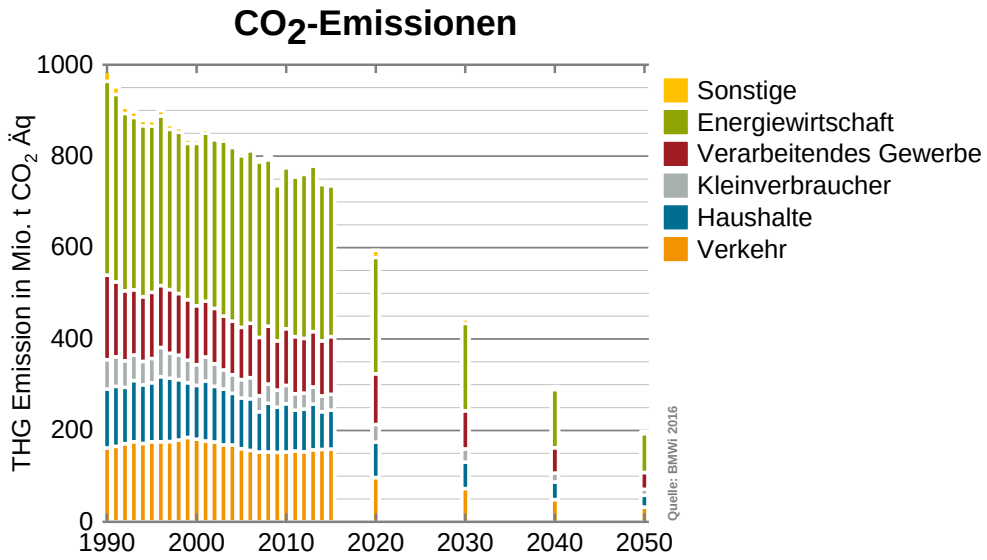


Abb. 1-1: Treibhausgasemissionen in Deutschland – langfristiger Trend und Zielsetzungen.

Für die wichtigsten Teilmärkte bzw. Handlungsfelder wurden ebenfalls Einsparziele definiert, siehe Abb. 1-1. Zwar ist in den Jahren von 1990 bis 2015 zu erkennen, dass in Deutschland ein deutlicher Trend zu geringeren Treibhausgasemissionen vorhanden ist. Wird aber weiter gemacht mit dem „*Business as Usual*“, dann wird nicht nur das Einsparungsziel für 2020, sondern auch das langfristige Ziel von einer Einsparung von mindestens 80 % im Jahr 2050 weit verfehlt. Stattdessen lägen die Einsparungen im Jahr 2050 nur im Bereich von knapp unter 60 %. Daraus lässt sich schließen, dass trotz aller Bemühungen der Bundesregierung die Energieeinsparungen in den letzten zwei Jahrzehnten zu gering waren, um die langfristigen Ziele erfüllen zu können.

Dies betrifft auch den Gebäudesektor. Auf ihn entfallen rund 29 % des deutschen Endenergieverbrauchs (Bigalke 2012). Um diesen Wert zu verringern, sind Anstrengungen bei den Energiesparmaßnahmen im Gebäudesektor notwendig. Dazu könnten weitere deutliche Verschärfungen der energetischen Mindestanforderungen an Neubauten beitragen, allerdings ist deren energetisches Niveau bereits jetzt sehr gut. Das deutlich größere Potenzial liegt hier im gezielteren Vorantreiben der Sanierungsbemühungen des deutschen Gebäudebestandes: Im Gegensatz zu den Neubauten, die sich bereits auf einem energetisch hohen Niveau bewegen, sind in Bestandsgebäuden die Einsparpotentiale aufgrund des schlechten Zustands der Gebäudehülle sowie der veralteten Anlagentechnik enorm. Der energetischen Gebäudesanierung und dem energieeffizienten Bauen wird somit eine tragende Rolle im Energiekonzept der Bundesregierung zugewiesen: „Die energetische Sanierung des Gebäudebestands ist der zentrale Schlüssel zur Modernisierung der Energieversorgung und zum Erreichen der Klimaschutzziele“ (BMWi 2010).

Die durchschnittliche jährliche Sanierungsrate von unter 1 % ist viel zu gering, um dieser Schlüsselrolle gerecht zu werden. Ein Ausbau von Sanierungsmaßnahmen, die die Transmissionswärmeverluste von Bestandsgebäuden durch eine Verbesserung des Dämmstandards verringern, ist unerlässlich. Zu diesen zählt auch die innenseitige Dämmung von Außenwänden, deren Rolle bei der Sanierung des deutschen Gebäudebestands hier eingehend untersucht werden soll.

1.1 Hintergrund

Nur knapp über ein Drittel der 3,5 Milliarden m² an Außenwandflächen in Deutschland ist gedämmt (siehe Abb. 1-2). Zur Reduzierung der Transmissionswärmeverluste wird derzeit in den meisten Fällen eine außenseitige Dämmung der Außenwände vorgezogen. Die Innendämmung sollte als echte Alternative jedoch nicht nur da zum Einsatz kommen, wo eine Außendämmung nicht möglich ist, sondern bringt auch eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Außendämmung mit sich. Vor allem bei denkmalgeschützten oder stark gegliederten Fassaden, bei Gebäuden mit fehlendem Dachvorsprung, in Fällen von Grenzbebauung oder bei vorwiegend temporär genutzten Gebäuden werden ihre Stärken besonders deutlich. Auch rechtliche Gründe wie uneinheitliche Besitzverhältnisse oder wirtschaftliche Zwänge wie Teilsanierungen bei knappen finanziellen Mitteln können für eine innenseitige Dämmung der Wände sprechen.

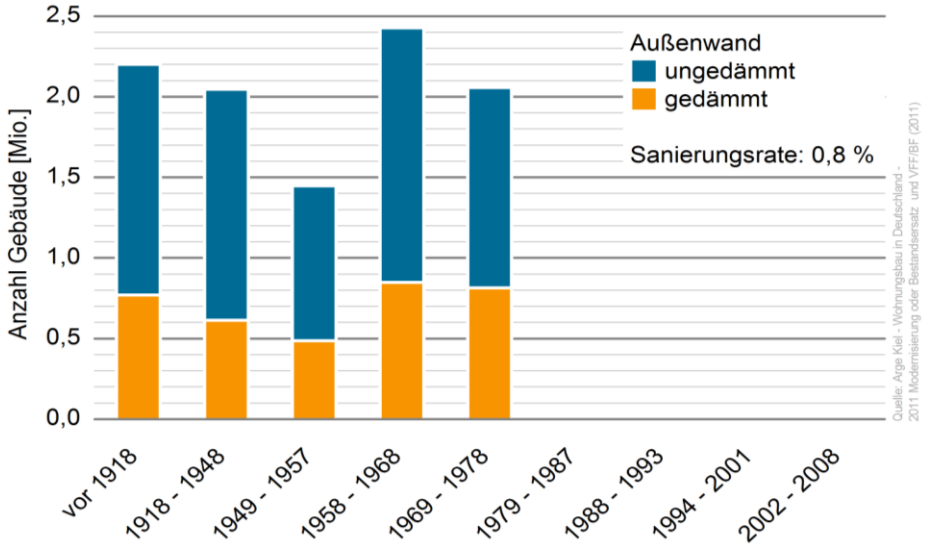


Abb. 1-2: Zustand der Gebäudehülle in Deutschland.

Von insgesamt 3,5 Milliarden m² Fassadenfläche stehen 1,8 Milliarden m² aufgrund ihres schlechten energetischen oder baulichen Zustands zur Sanierung an. Das Potential der Innendämmung wird hierbei in ersten Schätzungen bei 15 – 20 % vermutet, was insgesamt ein Potential von rund 360 Millionen m² an Fassadenfläche für die Innendämmung bedeuten würde.

Während Innendämmsysteme auf der einen Seite eine recht kostengünstige und damit wirtschaftliche Sanierungsmaßnahme darstellen, bringen sie auch einige bauphysikalische Probleme bzw. Anforderungen mit sich. Dazu zählen beispielweise Frostschäden, die aufgrund des verringerten Trocknungspotentials und einer damit einhergehenden dauerhaften Auffeuchtung der Bestandskonstruktion auftreten können und die Energieeffizienz und Dauerhaftigkeit der Dämmmaßnahme beeinflussen können. Auch die mögliche Bildung von Tauwasser und damit von Schimmel an der Grenzschicht zwischen Dämmstoff und Bestandkonstruktion steht bei Innendämmmaßnahmen immer wieder in der Diskussion. Hier können nicht nur Schäden in der Konstruktion die Folge sein, sondern es wird oftmals auch befürchtet, dass die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs und der Bestandswand durch hohe Feuchtegehalte steigen könnte und die Dämmleistung sich dadurch merklich verschlechtert.

Des Weiteren muss bei der Planung von Innendämmmaßnahmen gründlich darauf geachtet werden, wie hoch die zu erwartenden inneren Feuchtelasten nach Beendigung der Sanierung sein werden, da diese das Funktionieren einer Innendämmung maßgeblich beeinflussen können. Details wie Fensteranschlüsse, an denen aufgrund von Platzmangel häufig mit dünneren Dämmstoffschichten ausgekommen werden muss, oder Wärmebrücken an Außenecken oder einbindenden Bauteilen, müssen gründlich geplant werden.

Diese Anforderungen werden aufgrund der immer höheren Dämmstoffdicken, immer leistungsfähigeren Materialien und des breiten Marktangebots an unterschiedlichen Systemen

anspruchsvoller und vielfältiger. Dies hat zur Folge, dass Innendämmsysteme nur bis maximal 1,0 m²K/W pauschal nachweisfrei sind und bei Sanierungen meist detaillierte Berechnungen erforderlich werden. Hinzu kommen eine mangelnde Markttransparenz, oft geringes Vertrauen in die Innendämmung im Allgemeinen, wenig verlässliche Sanierungsergebnisse und fehlende Informationen. Daher schrecken derzeitig noch viele Planer vor Innendämmungen zurück.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieses Forschungsprojekts ist es, den beschriebenen Verunsicherungen bei Planern, Denkmalpflegern und Herstellern entgegenzuwirken. Hierzu ist es unbedingt notwendig, sichere Methoden zur Beurteilung und Bewertung von Innendämmsystemen zu entwickeln. Tiefgreifende Forschungsarbeiten müssen durchgeführt werden, um die dauerhaft energiesparende Wirkung von Innendämmsystemen sicherzustellen und die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zu gewährleisten.

Der vorliegende Forschungsbericht wurde in Zusammenarbeit des Fraunhofer IBP und des FIW München erstellt. Zu den Inhalten des Projekts zählt zunächst die Charakterisierung von Innendämmstoffen und -systemen. Hierzu wurden eine Marktübersicht und eine Gruppierung der verfügbaren Dämmstoffe und Systeme vorgenommen. Hier soll die gesamte Palette an verfügbaren, zum Teil auch neuartigen Innendämmmaterialien berücksichtigt werden. Anschließend werden deren thermische, hygrische und ökologische Eigenschaften eingehend beschrieben. Um die Anwendungsbereiche und – grenzen von verschiedenen Systemen aufzuzeigen, werden energetische und feuchtetechnische Bemessungen im Regelquerschnitt durch hygrothermische Simulationen durchgeführt und durch Freilandversuche validiert. Auch Anschlussdetails und Wärmebrücken bei verschiedenen Innendämmsystemen werden eingehend untersucht sowie die Potentiale von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb aufgezeigt.

Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, Bestandssituationen besser beurteilen und kritische Situationen in der Planungsphase besser erkennen zu können. Auf dieser Grundlage soll die Wahl geeigneter Lösungen vereinfacht werden. Dies steigert die Sicherheit für Planer und Ausführende und fördert damit auch den vermehrten Einsatz von Innendämmsystemen. Langfristig soll dies dazu führen, dass das mögliche Energiesparpotential von Innendämmungen besser ausgeschöpft wird.

1.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Treibhausgasemissionen in Deutschland – langfristiger Trend und Zielsetzungen.....1
Abb. 1-2: Zustand der Gebäudehülle in Deutschland.....3

1.4 Literaturverzeichnis

Bigalke, Uwe (2012): Der dena-Gebäudereport 2012. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand 2012. Hg. v. deutsche Energieagentur.

BMWi (2010): Energiekonzept für eine umwelt schonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 09.07.2018.

IPCC (2018): Global Warming of 1.5 °C. an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre- industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strenghtening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Hg. v. Intergovernmenta Panel on Climate Change.

2 Charakterisierung und Gruppierung von Innendämmsystemen

2.1 Marktrecherche, Einteilung und Auswahl

Es wurde eine umfangreiche Marktrecherche über die verfügbaren Dämmmaterialien für Innendämmungen durchgeführt. Dabei wurden 213 Produkte von über 200 Herstellern identifiziert, die in den folgenden Kapiteln vorgestellt und kategorisiert werden sollen.

2.1.1 Unterscheidung nach Materialgruppen

Die 213 untersuchten Produkte sollen in erster Ebene in verschiedene Materialgruppen auf Basis ihrer Rohstoffe eingeteilt werden. Dabei wird auf die häufig verwendete Unterscheidung zwischen „organischen“ und „anorganischen“ (mineralischen) Dämmstoffen zurückgegriffen. Anschließend wird noch ein weiteres Mal nach Art der Herstellung, nämlich in „natürliche“ und „synthetisch“ hergestellte Dämmstoffe unterschieden.

In den nachfolgenden Tab. 2-1 und Tab. 2-2 sind die unterschiedlichen Dämmstoffe in die eben genannten Kategorien unterteilt (Fachverband Innendämmung e.V. 2016; Holm et al. 2013). Zusätzlich ist für jeden Dämmstoff angegeben, wie viele Materialien jeweils in der Marktrecherche ausfindig gemacht und untersucht wurden. Typische Lieferformen, mögliche Anwendungsgebiete im Bereich der Innendämmung und eine Kurzbeschreibung für jede Materialgruppe sind ebenfalls in den Tabellen enthalten. Die für Innendämmungen relevanten Anwendungsgebiete laut DIN 4108-10:2015-12 sind:

- **DI:** Innendämmung der Decke (unterseitig) oder des Daches, Dämmung unter Sparren/Tragkonstruktion, abgehängte Decke usw.
- **DEO:** Innendämmung der Decke oder Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich ohne Schallschutzanforderungen
- **DES:** Innendämmung der Decke oder Bodenplatte (oberseitig) unter Estrich mit Schallschutzanforderungen
- **WI:** Innendämmung der Wand
- **WTH:** Dämmung zwischen Haustrennwänden mit Schallschutzanforderungen
- **WTR:** Dämmung von Raumtrennwänden

Ist das Kürzel für den Anwendungsbereich in Tab. 2-1und Tab. 2-2 in **„fett“** geschrieben, so besitzt die Materialgruppe definierte Eigenschaften laut DIN 4108-10. Bei Produkten mit bauaufsichtlicher Zulassung ist der Anwendungsbereich *„kursiv“* geschrieben, bei selten genutzten Produkten ist er unterstrichen. Alle vorgestellten Materialien sind mehr oder weniger stark begrenzt in ihren Anwendungsbereichen und sollten daher immer als System betrachtet werden. Soll ein Dämmstoff für eine bestimmte Anwendung gewählt werden, ist stets die Beratung durch einen Fachplaner sinnvoll. Herstellerhinweise bezüglich Verarbeitung und Anwendung eines bestimmten Produktes sowie die individuellen Randbedingungen der Nutzung sollten stets Beachtung finden (Fachverband Innendämmung e.V. 2016, S. 90).

Tab. 2-1: Organische Materialgruppen für Innendämmstoffe.

Materialgruppe		Anzahl Produkte	Liefer-form	Anwen-dungstyp	Kurzbeschreibung
Synthetisch	Expandiertes Polystyrol EPS	17	Platten	**DI DEO DES WI**	Erdölprodukt aus expandiertem Polystyrol, Treibmittel (Pentan) und Flammschutzmitteln; Granulat wird mit Wasserdampf zweifach aufgeschäumt, sodass ein homogenes Material entsteht
	Extrudiertes Polystyrol XPS	9	Platten, Formteile, Granulat	**DI DEO**	Erdölprodukt aus Polystyrol, Treibmittel (meist CO_2), Farbstoffen und Flammschutzmittel; Granulat wird geschmolzen, kontinuierlich auf ein Fließband aufgetragen und stark aufgebläht, was zu homogenen, geschlossenzelligen Strukturen führt
	Phenolharzschaum	4	Platten	**DI DEO WI**	Phenolharz, Härter und Treibmittel werden im kontinuierlichen Verfahren als Bandware aufgeschäumt; Kaschierung mit Glasvlies zur Fixierung
	Polyurethan	15	Platten, Formteile	**DI DEO WI**	Erdölprodukt, das aus einer chemischen Reaktion von MDI, Polyolen und Treibmitteln hergestellt wird; Aufgrund der geschlossenzelligen Strukturen verbleibt das Treibmittel in den Schaumzellen
Natürlich	Hanf & Flachs	15	Stopfwolle, Matten, Rollen	*DI DEO WTH WTR*	Faservliese aus der äußeren Rindenschicht der Flachs-/Hanfpflanze; Zusatz von Borsalz zum Brandschutz
	Holzfaser	10	Platten, Matten, Einblas-dämmung	**DI DEO DES WI WTR**	Herstellung vorwiegend aus Nadelholzabfall und Schwachhölzern, die mit Klebstoff zu Matten geformt und verklebt werden
	Holzwolle	4	Platten	**DI DEO WI**	Langfaserige Nadelholzwolle wird mit mineralischem Bindemittel (Zement) zu Leichtbauplatten gebunden
	Kork	6	Platten, Schüttung	**DI DEO WI WTR**	Korkschrot der Korkweide wird mit Wasserdampf expandiert und zu Platten gepresst; die freigesetzten Harze dienen als Bindemittel; Imprägnierung z.B. durch Bitumen
	Schafwolle	9	Stopfwolle, Matten	*DI DEO DES WI WTR*	Gereinigte Schafwolle wird zu Vliesen verarbeitet; verschiedene Schutzmittel (z.B. gegen Motten) können zugesetzt sein
	Schilfrohr	3	Platten	*DI WI*	Schilfrohr wird nach erstem Frost geerntet und sorgfältig getrocknet; lange dicke Schilfrohre werden zu Dämmplatten gebündelt
	Zellulose	13	Matten, Pellets, lose Flocken	*DI WI WTR*	Herstellung hauptsächlich aus recyceltem Altpapier, das zerkleinert und mit Borsalzen und Ammoniumphosphat (verbessert Brandschutz und Dauerhaftigkeit) vermischt wird

Tab. 2-2: Anorganische Materialgruppen für Innendämmstoffe.

Materialgruppe		Anzahl Produkte	Liefer-form	Anwen-dungstyp	Kurzbeschreibung
Synthetische	Aerogele	10	Matten, Granulat		Gelartige Stoffe, denen bei hohen Temperaturen und/oder hohem Druck die Feuchtigkeit entzogen wurde, sodass eine Vielzahl an gasgefüllten Poren entsteht (außerordentlich hohe Dämmwirkung) ➔ sehr dünn, sehr geringer Platzaufwand, aber noch sehr teuer
	Kalziumsilikat	17	Platten, Schüttung	*DI* *WI*	Poröse Kalksilikate werden zur Verbesserung der Flexibilität mit Zellstoff vermischt und anschließend mit Wasserdampf ausgehärtet
	Mineralschaum	16	Platten	DI WI	Quarzsand, Portlandzement, Kalkhydrat und Wasser werden mit einem Treibmittel vermischt, in Formen gegossen, aufgeschäumt und anschließend unter Temperatur ausgehärtet
	Mineralwolle (Steinwolle + Glaswolle)	8	Platten, Rollen, Matten, lose Fasern	**DI** **DEO** **DES** **WI** **WTH** **WTR**	Überbegriff für Steinwolle (Rohstoffe Dolomit, Scherben, Sand, Eisenoxid, Zement) und Glaswolle (Rohstoffe Scherben, Sand, Soda, Borax); Rohstoffe werden geschmolzen, zerfasert, mithilfe von Phenol-Formaldehydharz gebunden und ausgehärtet
	Pyrogene Kieselsäure	2	Platten	DI DEO WI	SiO_2-Pulver, die mittels Flammenhydrolyse hergestellt werden; es entsteht ein sehr feines Pulver, das zu Dämmplatten mit sehr niedriger Wärmeleitfähigkeit verarbeitet werden kann
	Schaumglas	8	Platten, Formteile, Schotter	**DI** **DEO** **WI** **WTR**	Herstellung z.T. aus Altglas bzw. aus denselben Rohstoffen wie Glas (hauptsächlich Quarzsand, Kalifeldspat, Natriumcarbonat) → Schmelzen, Auskühlen und Zerpulverung des Rohglases, anschließend mit Aufschäumen mit Kohlenstoff in Edelstahlformen und kontrollierte Abkühlung
	VIPs	15	Platten (i.d.R. nach Maß)		Stützkern (i.d.R. Pyrogene Kieselsäure oder Mineralwolle) wird mit Hochbarrierefolie umgeben und vakuumisiert, was die Konvektion unterdrückt (außerordentlich hohe Dämmwirkung) ➔ sehr dünn, sehr geringer Platzaufwand, aber noch sehr teuer und korrekter Einbau nötig
Natürliche	Blähperlite (EPB)	4	Platten, Schüttung		Perlit (vulkanisches Gestein) wird durch schockartiges Erhitzen expandiert und anschließend fein zermahlen
	Dämmputze	12	Sackware, Auftragung vor Ort		Mineralischem Putz (z.B. Zement, Kalk) wird ein Leichtzuschlag (z.B. Polystyrol-Kügelchen, Blähglas, Perlite) zugefügt; maximale Dicke jedoch i.d.R. 10 cm bei deutlich höherer Wärmeleitfähigkeit als herkömmliche Dämmstoffe
	Lehm	16	Lehmputz, Stampflehm mit Vorsatz-schale		Lehm und andere natürliche Rohstoffe (Kork, Holzvlies, Nadelholzhackschnitzel…) werden zu Platten oder Schüttungen mit hoher Kapillaraktivität verarbeitet

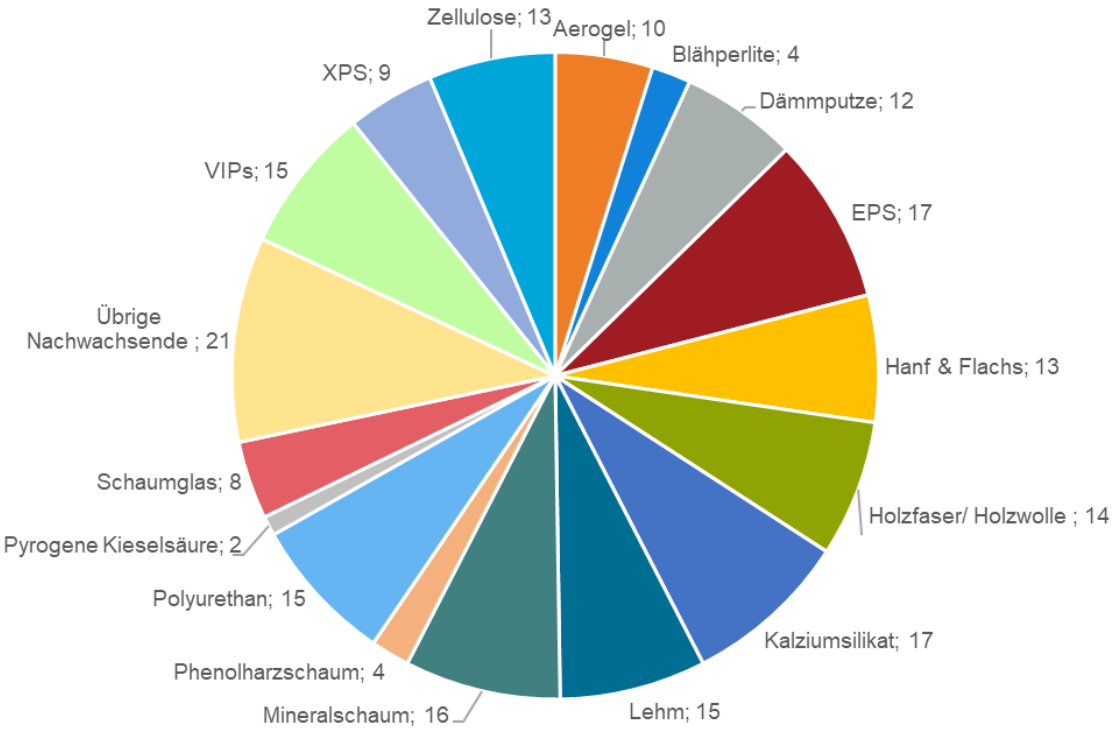


Abb. 2-1: Anzahl der auf dem Markt verfügbaren Dämmstoff-Produkte je Materialgruppe.

In Abb. 2-1 ist noch einmal grafisch dargestellt, wie viele Produkte für Innendämmungen in der Marktrecherche für die jeweilige Materialgruppe ausfindig gemacht werden konnten. Eine große Vielzahl an Produkten wurden demnach für die Materialgruppen EPS, Kalziumsilikat, Mineralschaum, Lehm, Polyurethan und VIPs identifiziert. Von den 213 untersuchten Materialien für Innendämmungen wurden insgesamt 98 aus anorganischen und 115 aus organischen Rohstoffen gewonnen. Von den anorganischen wurden wiederum 79 Produkte synthetisch hergestellt, nur 19 sind als natürlich zu bezeichnen. Bei den organischen Dämmstoffen ist mit 77 Produkten der natürliche Anteil höher, hier wurden nur 38 synthetisch hergestellt. Die prozentualen Anteile der verschiedenen Gruppen sind noch einmal in Abb. 2-2 dargestellt. Diese Werte sind lediglich als die Anzahl der in dieser Marktrecherche untersuchten Produkte je Materialgruppe zu verstehen. Sie geben keinen Aufschluss auf die tatsächlichen Marktanteile, die verschiedene Dämmstoffgruppen in Deutschland haben.

Um die Marktanteile einzelner Dämmstoffgruppen zu identifizieren, wurden verschiedene Studien zurate gezogen. Zum einen wurde eine Umfrage aus dem Jahr 2005 verwendet, die Aufschluss über die Marktanteile der häufigsten Dämmstoffe in Deutschland gibt (Gesamtverband Dämmstoffindustrie 2005). Ergänzend hierzu wird einer Studie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. betrachtet (Dorsch et al. 2008), welche sich genauer mit den Marktanteilen von nachwachsenden Rohstoffen befasst. Beide Studien beziehen sich auf Dämmmaterialien im Allgemeinen und bieten keinen genauen Rückschluss auf die für Innendämmungen verwendeten Materialien. Auch sind sie nicht mehr als aktuell zu bezeichnen, die Marktanteile können sich in den letzten Jahren durchaus verschoben haben. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse dieser beiden Studien zumindest als

qualitative Richtwerte über die Beliebtheit verschiedener Dämmstoffarten Aufschluss geben können.

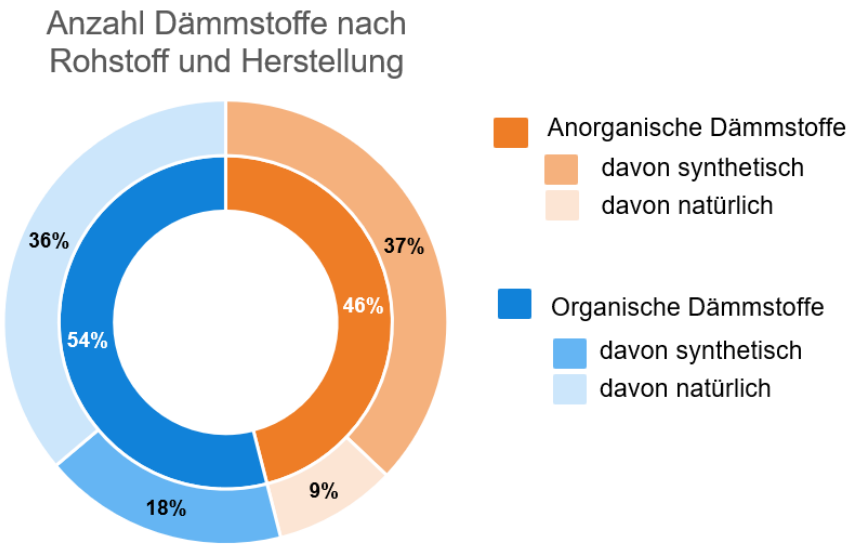


Abb. 2-2: Anteile der untersuchten Dämmstoffe, Unterscheidung nach Art der Rohstoffe (organisch oder anorganisch) bzw. nach Art der Herstellung (natürlich oder synthetisch).

Laut Gesamtverband Dämmstoffindustrie 2005 sind demnach 55 % der Dämmmaßnahmen in Deutschland mit Mineralwolle durchgeführt. Einen weiteren großen Marktanteil besitzen die Polystyrol-Schäume EPS und XPS mit gemeinsam 37 %, gefolgt von Polyurethan-Schäumen mit einem Marktanteil von 5 %. Natürliche Dämmstoffe haben insgesamt nur einen sehr geringen Marktanteil von 3 %. Davon verfällt jeweils rund 1 % auf Holzfaserdämmplatten und Dämmungen mit Zellulosefasern. Andere nachwachsende Rohstoffe machen zusammen nicht einmal 1 % des Dämmstoffmarktes aus (Dorsch et al. 2008). Die Ergebnisse der beiden Studien sind im linken Diagramm in Abb. 2-3 zusammengefasst.

Im Rahmen des Projekts „Detaillösungen für Innendämmungen“ (Oswald et al. 2011) wurde eine deutschlandweite Sachverständigenumfrage zum Thema Innendämmung durchgeführt. Von 178 Teilnehmern gaben 19 (ca. 11 %) Sachverständige an, in den letzten Jahren rund 60 Modernisierungen mit Innendämmungen durchgeführt zu haben, die mindestens den Anforderungen der EnEV 2009 entsprachen. Davon war wiederum eine detaillierte Auswertung von leidglich 33 Wandkonstruktionen hinsichtlich der verwendeten Innendämmstoffe möglich. Aufgrund der sehr geringen Anzahl an Referenzobjekten ist diese Studie zwar nicht als statistisch repräsentativ anzusehen, allerdings sind allgemeine Hinweise und Trends erkennbar sowie ein Vergleich zu den breiter gefächerten Studien zu Dämmmaßnahmen im Allgemein möglich.

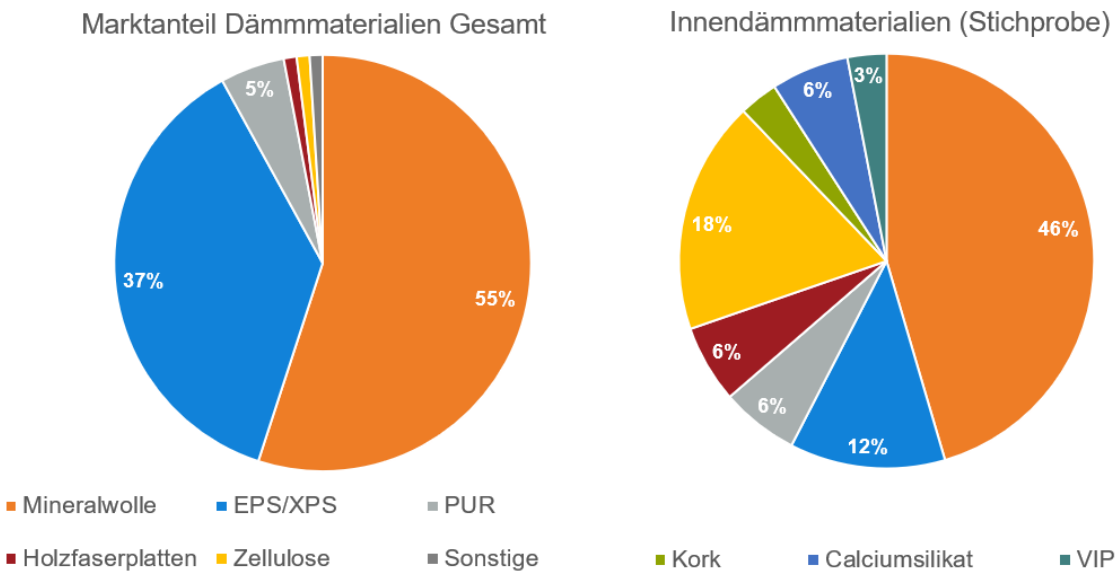


Abb. 2-3: Marktanteile verschiedener Materialien am gesamtem Dämmstoffmarkt in Deutschland (links) und Anteile verwendeter Dämmmaterialien bei 33 Referenzobjekten mit Innendämmungen (rechts).

Die prozentualen Anteile der verschiedenen für Innendämm-Maßnahmen verwendeten Materialien sind in Abb. 2-3 im rechten Diagramm dargestellt. In 15 von 33 Referenzobjekten (46 %) wurden Produkte auf Basis von Mineralwolle (bzw. Mineraldämmplatten) verbaut. Wie für Dämmungen im Allgemeinen macht diese Materialgruppe auch im Fall von Innendämmungen den weitaus größten Anteil aus. EPS- und XPS-Schaumstoffe haben in den untersuchten, innengedämmten Objekten einen deutlich geringeren Anteil (12 %), als auf dem gesamten Dämmstoffmarkt. Der Anteil von PUR-Schäumen (6 %) ist hingegen etwa gleichbleibend.

In der Sachverständigenumfrage zu Innendämmungen wurde ein weitaus größerer Anteil der Dämmungen mit nachwachsenden Dämmstoffen (Holzfaserplatten 6 %, Zelluloseschüttungen 18 %, Kork 3 %) oder innovativen Dämmstoffen (Calciumsilikat-Platten 6 %, VIPs 3 %) durchgeführt, als auf dem gesamten Dämmstoffmarkt in Deutschland. Dort machen sie zusammen lediglich 3 % aus. Die Umfrage zu Innendämmungen kann, wie bereits erwähnt, aufgrund der geringen Anzahl an Referenzobjekten nicht als statistisch repräsentativ für Gesamtdeutschland gesehen werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass diese „Nischenprodukte“ im Bereich der Innendämmung tatsächlich einen höheren Marktanteil haben, als sie es auf dem gesamten Dämmstoffmarkt haben.

2.1.2 Unterscheidung nach Materialeigenschaften

Wie Tab. 2-1 und Tab. 2-2 bereits vermuten lassen, eignet sich prinzipiell eine Vielzahl an Dämmstoffen für Innendämmungen. Um Planern und Anwendern die Wahl eines geeigneten Dämmstoffs zu erleichtern, ist eine weitere Einteilung der Dämmstoffe nach Materialeigenschaften sinnvoll. Es gibt zahlreiche Kriterien, die bei der Wahl von

Innendämmungen eine wichtige Rolle spielen können. Dazu zählen nach Fachverband Innendämmung e.V. 2016 die schalldämmenden Eigenschaften, die Frostbeständigkeit, die Resistenz gegen Schimmelpilzwachstum, Nachhaltigkeitsaspekte und mögliche Gesundheitsgefahren der Materialien. Genauer betrachtet werden sollen die Materialien in den folgenden Kapiteln jedoch nur nach den zwei Anforderungen, die für Innendämmung als am wichtigsten eingestuft werden. Dazu zählen ihre Eigenschaften bezüglich Wärmeschutz (Wärmeleitfähigkeit λ) und Feuchteschutz (Wasserdampfdiffusionswiderstand μ sowie Kapillaraktivität).

2.1.2.1 Wärmeschutz

Als Maß für den Wärmeschutz kann die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] eines Materials angesehen werden. Aus energetischer Sicht gilt, je kleiner die Wärmeleitfähigkeit, desto besser die Wärmedämmwirkung eines Materials. Für die Berechnung von U-Werten wird in Deutschland der sogenannte „Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit“ verwendet. Laut Holm et al. 2013 charakterisiert dieser den langfristigen Gebrauchszustand des Dämmstoffs. Dabei enthält er Zuschläge aufgrund des baupraktischen Feuchtegehalts und der eventuellen Alterung des Materials.

Die 213 nach Materialgruppen zusammengefassten Innendämmprodukte werden nun genauer hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit betrachtet. Dies geschieht in Form eines sogenannten Box-Plots, siehe Abb. 2-4. Im rechten Teil der Grafik ist die Funktionsweise eines Box-Plots noch einmal veranschaulicht: Die horizontale Linie innerhalb der Box stellt den Median der Daten dar. Jeweils 50 % der gesamten Werte liegen unterhalb des Medians und 50 % darüber. Die obere Begrenzung der Box stellt das obere Quartil, die untere Begrenzung das untere Quartil der Daten dar, sodass genau 50 % der Daten innerhalb der Box liegen. Die vertikale Länge der Box wird Interquartilsabstand (IQR) genannt. Die Länger der oberen und unteren Whisker beträgt maximal 1,5 x IQR. Sie reichen bis zum letzten Wert oberhalb und unterhalb der Box, der noch innerhalb des 1,5-fachen Abstandes liegt. Alle Werte außerhalb dieses Abstandes werden als „Ausreißer“ bezeichnet und in Form von Punkten dargestellt. Existiert kein Ausreißer in die jeweilige Richtung, so gibt die Länge des Whiskers jeweils den Minimalwert bzw. den Maximalwert der betrachteten Daten an.

Die insgesamt 22 identifizierten Materialgruppen für Innendämmungen sind auf der x-Achse des Box-Plots aufgetragen, die Wärmeleitfähigkeit in W/mK auf der y-Achse. Das Diagramm gibt Aufschluss darüber, wie hoch die Streuung der Wärmeleitfähigkeiten innerhalb der Produkte einer Materialgruppe ist. Ebenso kann der Median abgelesen sowie etwaige Ausreißer innerhalb einer Gruppe identifiziert werden. Mithilfe der Darstellung im Box-Plot werden die Materialgruppen nun in Tab. 2-3 hinsichtlich des Medians ihrer Wärmeleitfähigkeit gruppiert. Noch einmal wird außerdem aufgeführt, wie viele Produkte je Materialgruppe untersucht werden. Je mehr Produkte betrachtet wurden, desto repräsentativer ist die Marktrecherche einzuschätzen.

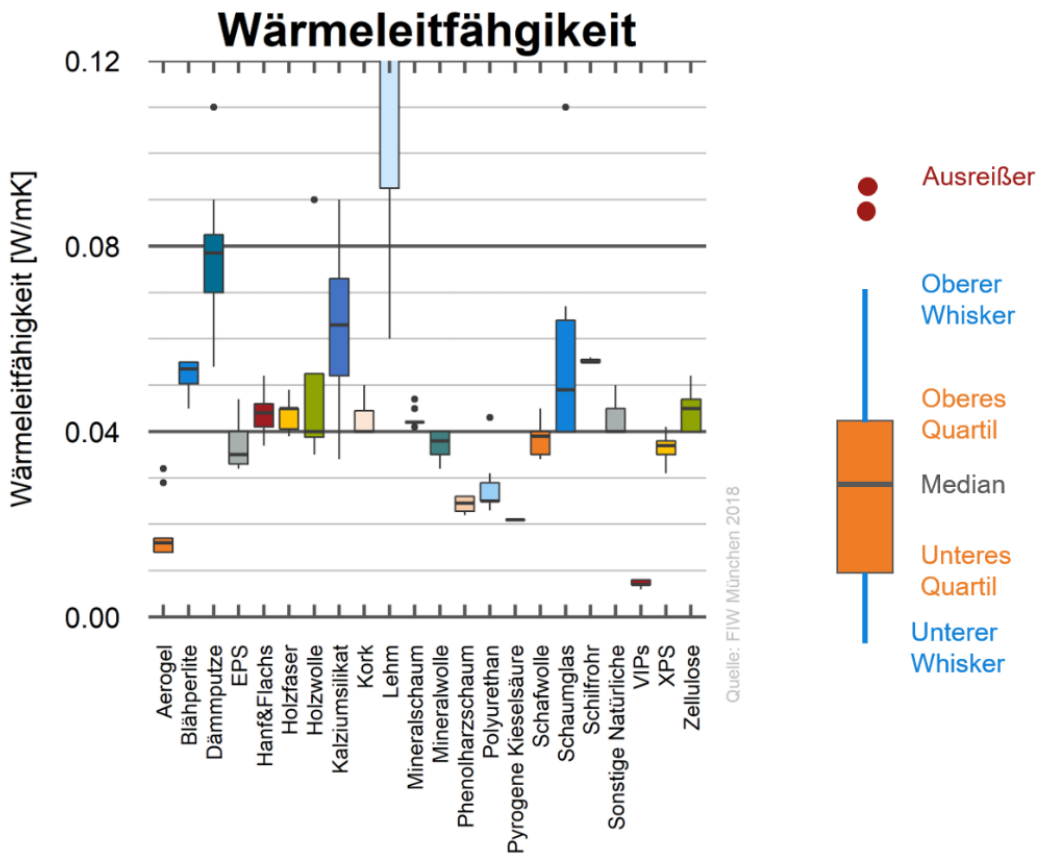


Abb. 2-4: Wärmeleitfähigkeiten [W/mK] der einzelnen Materialgruppen für Innendämmungen.

Zusätzlich wird angegeben, wie hoch die Streuung der Werte innerhalb der Materialgruppe ist. „Gering“ ist hierbei gleichzusetzten mit einem IQR ≤ 0,005 W/mK, „Mittel“ mit IQR ≤ 0,01 W/mK und „Hoch“ mit IQR > 0,01 W/mK. Eine „Sehr hohe“ Streuung von über 0,3 W/mK weist lediglich die Materialgruppe „Lehm“ auf. Diese ist in Abb. 2-4 nicht vollständig dargestellt. Das untere Quartil liegt hier bei knapp über 0,09 W/mK, der Median bei rund 0,19 W/mK und das oberer Quartil bei über 0,4 W/mK. Diese überaus weite Streuung innerhalb der Materialgruppe „Lehm“ lässt sich darauf zurückführen, dass hier eine Vielzahl an recht unterschiedlichen Produkten zusammengefasst ist, die von Lehmbauplatten über Lehmschüttungen und gebrochenen Baulehm mit jeweils unterschiedlichen Zusätzen (Kork, Holz, Stroh, Hanf) reicht. Die Wärmeleitfähigkeit der sehr unterschiedlichen Produkte sollte hier im Einzelnen betrachtet werden. Für alle anderen Materialgruppen, insbesondere bei geringer oder mittlerer Streuung der Werte und einer höheren Anzahl an betrachteten Produkten, ist davon auszugehen, dass sich ihre Wärmeleitfähigkeit herkömmlicherweise im Bereich der hier angegebenen Gruppierung bewegt.

Tab. 2-3: Gruppierung der Materialgruppen anhand des Medians ihrer Wärmeleitfähigkeit.

Gruppe	Material	Anzahl Produkte	Streuung
λ_{Median} < 0,01	VIPs	15	Gering
λ_{Median} < 0,02	Aerogele	10	Gering
λ_{Median} < 0,03	Pyrogene Kieselsäure	2	Gering
	Phenolharzschaum	4	Gering
	Polyurethan	15	Mittel
λ_{Median} < 0,04	EPS	17	Mittel
	XPS	9	Gering
	Mineralwolle	8	Mittel
	Schafwolle	9	Gering
λ_{Median} < 0,05	Holzwolle	4	Hoch
	Mineralschaum	16	Gering
	Hanf & Flachs	15	Mittel
	Holzfaser	10	Mittel
	Kork	6	Gering
	Sonstige Natürliche	3	Mittel
	Schaumglas	8	Hoch
λ_{Median} < 0,06	Blähperlite	4	Mittel
	Schilfrohr	3	Gering
λ_{Median} < 0,08	Dämmputze	12	Hoch
λ_{Median} < 0,19	Lehm	16	Sehr hoch

Verschiedene Faktoren können bei der Wahl des Dämmstoffes hinsichtlich des Wärmeschutzes eine Rolle spielen. Energetisch ist das Ziel einer Sanierungsmaßnahme in der Regel, den Wärmedurchgangswiderstand einer Konstruktion möglichst zu maximieren. Der Wärmedurchgangswiderstand kann vergrößert werden, indem ein Dämmstoff mit möglichst kleiner Wärmeleitfähigkeit gewählt wird und/oder die Dicke der Dämmstoffschicht vergrößert wird. Aus wirtschaftlicher Sicht sind speziell bei Innendämmungen nun zwei Faktoren zu beachten:

- Dämmstoffe mit sehr geringen Wärmeleitfähigkeiten, sog. „Superdämmstoffe“ wie VIPs und Aerogele, sind deutlich teurer als bisher auf dem Markt etablierte Dämmstoffe wie beispielsweise Mineralwolle oder Polystyrol-Schäume.
- Eine Innendämmmaßnahme geht stets zulasten der Wohn- oder Nutzfläche eines Gebäudes. Um den Flächenverlust weitestgehend zu minimieren, sollte der Querschnitt der Innendämmung also möglichst dünn und effizient sein. Soll gleichzeitig eine hohe

Dämmwirkung erhalten bleiben, muss ein Dämmstoff mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit gewählt werden.

Es muss im Einzelfall abgewogen werden, welcher wirtschaftliche Aspekt – die Minimierung der Anschaffungskosten oder die Maximierung der Gebäudefläche bei gleichbleibender Wärmedämmwirkung – eine größere Rolle spielt. Insbesondere in begehrten Innenstadtlagen mit hohen Quadratmeterpreisen ist es allerdings möglich, dass „Superdämmstoffe“ mit sehr geringen Wärmeleitfähigkeiten bereits als wirtschaftlicher betrachtet werden können, als herkömmliche. Auch sind hier häufig historische Gebäude mit denkmalgeschützten Fassaden anzufinden. Um die denkmalpflegerischen Belange zu erfüllten, kann auch hier die Wahl eines innovativen, wenn auch teuren Dämmstoffes sinnvoll sein.

2.1.2.2 Feuchteschutz

Neben dem Wärmeschutz spielt bei der Wahl von Innendämmstoffen und -systemen auch der Feuchteschutz eine sehr große Rolle. Häufig werden Innendämmungen mit Tauwasserrisiko und Schimmelpilzwachstum verbunden. Diese Befürchtungen haben ihren Grund in der Tatsache, dass die auf der Kaltseite der Innendämmung liegende Bestandswand zwangsläufig kälter und feuchter wird, als sie es noch im ungedämmten Zustand war. Um eine übermäßige Auffeuchtung zu verhindern, darf auf Dauer im Winter nicht mehr Feuchte in die Wand gelangen, als im Sommer auch wieder austrocknen kann. Daher ist es bei der Planung einer Innendämmmaßnahme hinsichtlich des Feuchteschutzes wichtig, nicht nur die Materialeigenschaften des Dämmstoffes zu betrachten, sondern das Gesamtsystem Bestandswand und Innendämmung in Betracht zu ziehen.

Die Diffusionseigenschaften sind der maßgebende Faktor bei der Wahl einer bestimmten Konstruktion bzw. eines bestimmten Dämmstoffs. Der Diffusionsdurchlasswiderstand (s_d-Wert) eines Dämmstoffs berechnet sich anhand des Produkts seiner Schichtdicke s [m] und seiner Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ [-]. Umso geringer μ × s, desto geringer ist auch der Diffusionswiderstand eines Materials (Holm et al. 2013). Hinsichtlich des Diffusionswiderstandes lassen sich nach Geburtig und Gänßmantel 2013 drei grundsätzliche Konstruktionsweisen unterscheiden:

- **Diffusionsdichte Konstruktionen (s_d > 1500m):** Bei diffusionsdichten Konstruktionen soll entweder über funktionelle dampfsperrende oder dampfbremsende Schichten oder einen an sich diffusionsdichten Dämmstoff verhindert werden, dass während der Heizperiode Feuchte vom Innenraum in die Konstruktion eindringen kann. Wasserdampf kann dann nur über Fugen oder Stoßstellen zwischen den Dämmstoffplatten eindringen. Der große Nachteil an dieser Art von Konstruktion ist allerdings, dass gleichzeitig auch eine Trocknung zur Raumseite hin im Sommer verhindert wird. Dies ist insbesondere bei Schlagregen belasteten Fassaden von Bedeutung.
- **Diffusionshemmende Konstruktionen (0,5m < s_d < 1500m):** Diffusionshemmende Konstruktionen lassen eine bestimmte Menge an Wasserdampf (bzw. Kondensat) in der Konstruktion zu, da diese im Sommer auch wieder besser austrocknen können, als

diffusionsdichte Konstruktionen. Die zugelassene Menge an Kondensat muss im Vorfeld durch Berechnung oder Simulation genau eingestellt werden.

- **Diffusionsoffene Konstruktionen (s_d < 0,5m):** Diese Art von Konstruktion lässt es zu, dass Wasserdampf in sie vordringt. Eine deutliche Zunahme der Porenluftfeuchte in der Bestandswand, in Kleberschichten oder auch im Dämmstoff selbst während der Heizperiode sind die Folge. Der Wassergehalt darf dabei niemals so hoch werden, dass die Konstruktion geschädigt wird. Diffusionsoffene Konstruktionen sollten in der Regel „kapillaraktiv“ sein. Kapillaraktive Dämmstoffe besitzen die Fähigkeit, Wasser schon bei geringen Feuchtegehalten und auch in flüssiger Form zu transportieren und unterstützen damit den Feuchtetransport zur Raumseite hin.

Einem zu hohen Feuchtegehalt in der Konstruktion kann also mit verschiedenen Funktionsweisen entgegengewirkt werden. Zu berücksichtigen sind bei der Planung einer Innendämmung mit ausreichendem Feuchteschutz u.a. die Dampfdichtigkeit der Bestandskonstruktion, der Schlagregenschutz, das Außenklima am jeweiligen Standort und die Nutzung und Lüftung des Gebäudes (Fachverband Innendämmung e.V. 2016).

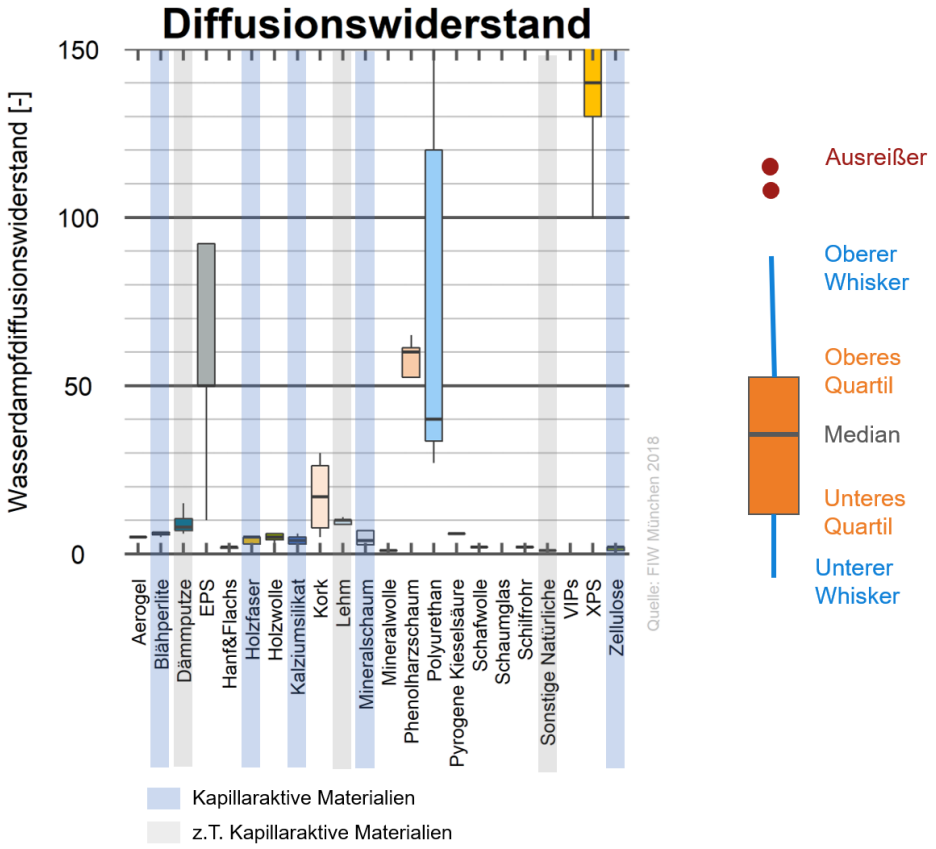


Abb. 2-5: Wasserdampfdiffusionswiderstand [-] sowie Kapillaraktivität der einzelnen Materialgruppen für Innendämmungen.

In Abb. 2-5 ist der Diffusionswiderstand und die Kapillaraktivität der verschiedenen untersuchten Materialgruppen zu sehen. Wie schon für die Wärmeleitfähigkeit erfolgt die Darstellung in einem Box-Plot. Zusätzlich ist dargestellt, ob die jeweilige Materialgruppe als kapillaraktiv zu bezeichnen ist (Blähperlite, Holzfaser, Kalziumsilikat, Mineralschaum, Zellulose – blaue Hinterlegung). Materialgruppen, in denen einige aber nicht alle Produkte aufgrund unterschiedlicher Rohstoffzusammensetzung kapillaraktiv sind (Dämmputze, Lehm, sonstige natürliche Materialien), sind grau hinterlegt. Es sei erwähnt, dass der Diffusionswiderstand von Schaumglas und VIPs nicht in Abb. 2-5 dargestellt ist. Diese beiden Materialien sind sehr diffusionsdicht, ihr µ-Wert geht „gegen Unendlich“. Auch der Maximalwert der betrachteten XPS-Dämmstoffe ist nicht mehr dargestellt. Er liegt bei 165.

Die Auswertung des Box-Plots erfolgt noch einmal in tabellarischer Form in Tab. 2-4. Hier sind die verschiedenen Materialien gruppiert nach aufsteigendem µ-Wert (Median der jeweiligen Materialgruppe). Zusätzlich ist wiederum die Anzahl der Produkte in der jeweiligen Materialgruppe angegeben sowie die Streuung der µ-Werte. „Gering“ entspricht einer Streuung von weniger als 2, „Mittel“ einer Streuung zwischen 2 und 10 und „Hoch“ einer Streuung der µ-Werte von über 10. Auf Grundlage der angegebenen Kapillaraktivität und des Diffusionswiderstandes des Dämmmaterials werden zuletzt mögliche Konstruktionsweisen genannt. Diese (grobe) Unterscheidung umfasst:

- **Diffusionsdicht**: Die Konstruktion ist allein durch die Wahl des diffusionsdichten Dämmstoffs diffusionsdicht
- **Diffusionsdicht (mit Dampfsperre)**: Diffusionsoffene/-hemmende Dämmstoffe werden erst in Verbindung mit einer entsprechenden Dampfsperre diffusionsdicht
- **Diffusionshemmend**: Die Konstruktion ist allein durch die Wahl des diffusionshemmenden Dämmstoffs diffusionshemmend
- **Diffusionshemmend (mit Dampfbremse)**: Diffusionsoffene Dämmstoffe werden erst in Verbindung mit einer entsprechenden Dampfbremse diffusionshemmend
- **Diffusionsoffen**: Diffusionsoffene Konstruktionen werden nur in Verbindung mit kapillaraktiven Materialien empfohlen

Diese Unterteilung der Konstruktionsarten ist sehr rudimentär und sollte nur als Anhaltspunkt dienen. Die Eignung der einzelnen Produkte innerhalb der Materialgruppen für eine bestimmte Konstruktionsweise sollte stets im Einzelfall geprüft werden. Jede der hier genannt Konstruktionsweisen bringt ihre eigenen Vor- und Nachteile mit sich, sodass keine allgemeinen Empfehlungen zur Ausführung von Innendämmungen gegeben werden können. So ergab auch die Sachverständigenumfrage nach Dorsch et al. 2008 keinen eindeutigen Trend hinsichtlich der Diffusionseigenschaften von bisher in Deutschland verbauten Innendämmsystemen: Hier wiesen 51 % der Referenzobjekte diffusionsoffene und 49 % diffusionsdichte Konstruktionen auf.
Zukünftig ist allerdings zu erwarten, dass sich der Trend für Innendämmsysteme aufgrund innovativer, feuchteregulierender Produkte eher in Richtung von diffusionsoffenen und kapillaraktiven Konstruktionen entwickeln wird.

Tab. 2-4: Gruppierung der Materialgruppen anhand des Medians ihres Diffusionswiderstandes.

Gruppe	Material	Anzahl Produkte	Streuung	Kapillar-aktiv	Mögliche Konstruktionsweisen
$\mu_{Median} \leq 2$	Mineralwolle	8	Gering	Nein	Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Sonstige natürliche Dämmstoffe	3	Gering	z.T.	Diffusionsoffen (z.T.) Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Hanf & Flachs	15	Gering	Nein	Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Schafwolle	9	Gering	Nein	Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Schilfrohr	3	Gering	Nein	Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Zellulose	13	Gering	Ja	Diffusionsoffen
$\mu_{Median} \leq 4$	Kalziumsilikat	17	Gering	Ja	Diffusionsoffen
	Mineralschaum	16	Mittel	Ja	Diffusionsoffen
$\mu_{Median} \leq 6$	Aerogele	10	Gering	Nein	Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Holzfaser	10	Gering	Ja	Diffusionsoffen
	Holzwolle	4	Gering	Nein	Diffusionshemmend (mit Dampfbremse) Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Blähperlite	4	Gering	Ja	Diffusionsoffen
	Pyrogene Kieselsäure	2	Gering	Nein	Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
$\mu_{Median} \leq 8$	Dämmputze	12	Mittel	z.T.	Diffusionsoffen (z.T.) Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
$\mu_{Median} \leq 10$	Lehm	17	Gering	z.T.	Diffusionsoffen (z.T.) Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
$\mu_{Median} \leq 50$	Kork	6	Hoch	Nein	Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	Polyurethan	15	Hoch	Nein	Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
	EPS	17	Hoch	Nein	Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
$\mu_{Median} \leq 100$	Phenolharzschaum	4	Mittel	Nein	Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
$\mu_{Median} \leq 150$	XPS	6	Hoch	Nein	Diffusionshemmend Diffusionsdicht (mit Dampfbremse)
$\mu_{Median} \geq 150$	Schaumglas	8	-	Nein	Diffusionsdicht
	VIPs	15	-	Nein	Diffusionsdicht

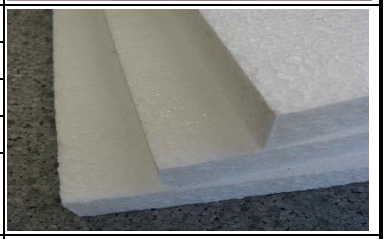
2.1.3 Auswahl von Materialien für die eingehende Untersuchung

Ziel ist es nun, aus der großen Fülle an betrachteten Produkten eine Auswahl der interessantesten Materialien zu treffen und diese im Laufe des Projekts eingehend zu untersuchen. Die gewählten Materialien sollen zum einen den Markt an verfügbaren Innendämmstoffen möglichst gut abdecken, zum anderen soll der Fokus aber vor allem auf innovativen Materialien liegen.

In Tab. 2-5 ist eine Zusammenstellung der 13 untersuchten Materialien und ihrer Eigenschaften gegeben. Sechs der Materialien sind diffusionsoffen, vier diffusionshemmend und zwei diffusionsdicht. Zusätzlich werden vier Dämmmaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen sowie vier „Hochleistungsdämmstoffe“ betrachtet.

Tab. 2-5: Übersicht über die untersuchten Innendämmmaterialien.

Materialbezeichnung	Materialeigenschaften		Abbildung
Mineralische Aerogel-Dämmplatte ▪ Montage mit Ständerprofilen und feuchtevariabler Dampfbremse	Diffusionsoffen		
	Diffusionshemmend	X	
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff	X	
Wärmedämmplatte aus Vakuum Isolations-Paneelen (VIP) ▪ Verbundpaneel mit beidseitigen Deckschichten ▪ Plattenstöße werden diffusionsdicht abgeklebt, Vorwandinstallation	Diffusionsoffen Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht	X	
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff	X	
Kork-Lehm-Dämmplatte ▪ Expandierter Kork mit lehmartigen Zuschlägen ▪ Anbringung mit Kleber an der Innenwand	Diffusionsoffen		
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend	X	
	Hochleistungsdämmstoff		
Organische Aerogelplatte ▪ Produktinnovation	Diffusionsoffen		
	Diffusionshemmend	X	
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff	X	
Hanffaserdämmplatte ▪ Anbringen mit mineralischem Kleber auf der Innenwand	Diffusionsoffen	X	
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend	X	
	Hochleistungsdämmstoff		

Materialbezeichnung	Materialeigenschaften		Abbildung
Aerogel Hochleistungsdämmputz ▪ Mineralischer Dämmputz auf Kalkbasis mit Zuschlägen	Diffusionsoffen	X	
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff	**X**	
Schaumglas ▪ Verklebung direkt auf Innenwand	Diffusionsoffen		
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht	**X**	
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff		
Hochleistungs-Dämmputz ▪ Mineralischer Trockenmörtel mit organischen Leichtzuschlägen	Diffusionsoffen	**X**	
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff		
Mineraldämmplatte ▪ Verklebung direkt auf Innenwand	Diffusionsoffen	**X**	
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff		
Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton ▪ Verklebung direkt auf Innenwand ▪ Gipskarton Verspachtelung	Diffusionsoffen		
	Diffusionshemmend	**X**	
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff		
EPS weiß ▪ Verklebung direkt auf Innenwand	Diffusionsoffen		
	Diffusionshemmend	**X**	
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend		
	Hochleistungsdämmstoff		
Holzfaserplatte nicht hydrophobiert	Diffusionsoffen	**X**	
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend	**X**	
	Hochleistungsdämmstoff		
Holzfaserplatte hydrophobiert	Diffusionsoffen	**X**	
	Diffusionshemmend		
	Diffusionsdicht		
	Nachwachsend	**X**	
	Hochleistungsdämmstoff		

2.1.4 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend gilt, dass Innendämmmaßnahmen andere Herausforderungen mit sich bringen, als die weiter verbreitete Außendämmung von Gebäuden. Es ist jedoch besonders aufgrund der speziellen Umstände möglich, dass es bisherigen „Nischenprodukten“ (wie Hochleistungsdämmstoffen, kapillaraktiven Dämmstoffen oder Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen) erleichtert werden kann, durch Innendämmungen einen breiteren Einstieg und höhere Akzeptanz auf dem Markt zu finden. Es fallen zum Beispiel folgende Kriterien ins Gewicht:

- Eine Innendämmmaßnahme geht stets zulasten der Wohn- oder Nutzfläche eines Gebäudes. Um den Flächenverlust möglichst gering zu halten, können sogenannte „Superdämmstoffe“ (VIPs, Aerogele) mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit dazu beitragen, die benötigten Dämmstoffdicken zu reduzieren und dadurch den Flächenverlust zu minimieren. Die (noch) sehr teuren „Superdämmstoffe“ können also insbesondere in begehrten Innenstadtlagen aufgrund der Flächenmaximierung wirtschaftlich sein. Auch bei historischen Gebäuden kommen aufgrund denkmalschützerischer Belange häufig innovative, wenn auch teure Dämmstoffe zum Einsatz.
- Der Nutzer steht in deutlich direkterem Kontakt mit einer Innendämmung, als mit einer Außendämmung. Etwaige Emissionen des Dämmstoffs können direkt an die Raumluft abgegeben werden. Dadurch können Vorbehalte gegenüber ansonsten häufig genutzten Dämmmaterialien entstehen, was dazu führen kann, dass Nutzer eher zur Anwendung von natürlichen Dämmstoffen geneigt sind.
- Der geringere Anteil and EPS- und XPS-Schäumen bei Innendämmungen kann möglicherweise auf die feuchtetechnischen Eigenschaften dieser Materialien zurückgeführt werden. So sind diese Dämmstoffe diffusionshemmend und nicht kapillaraktiv, was bei Innendämmsystemen oft als weniger günstig angesehen wird. Andere Materialien, die bei Innendämmungen häufiger zum Einsatz kommen als auf dem gesamten Dämmstoffmarkt (Holzfaserdämmplatten, Zellulose und insbesondere Kalziumsilikat-Platten) sind im Gegensatz dazu diffusionsoffen und kapillaraktiv und werden in Innendämmsystemen gezielt aufgrund dieser Eigenschaft eingesetzt.

Die Entscheidung für oder gegen einen bestimmten Innendämmstoff sollte stets nach dem folgenden Grundsatz getroffen werden: Die Innendämmung muss immer im Kontext des Systems betrachtet werden, in dem sie verbaut werden soll. Infolgedessen gibt es nicht den einen, idealen Dämmstoff für Innendämmungen oder allgemeingültige Anforderungen an die verwendeten Materialien (Fachverband Innendämmung e.V. 2016). Die Eignung eines Dämmstoffes als Innendämmung ist immer systemabhängig.

2.2 Thermische Eigenschaften

Die natürliche Transportrichtung der Wärmeenergie verläuft stets gemäß des Fourierschen Gesetzes von der höheren zur niedrigeren Temperatur und ist auf drei Wärmeübertragungsmechanismen zurückzuführen. Diese sind die Wärmeleitung, also die Übertragung kinetischer Energie zwischen benachbarten Atomen und Molekülen im Feststoff ($\lambda_{c,s}$) und im gasgefüllten Porenraum ($\lambda_{c,g}$), die Wärmeströmung, also die mitgeführte innere Energie eines strömenden Fluids (λ_{co}) und die Wärmestrahlung, also elektromagnetische Wellen zwischen 0,8 – 800 µm (IR-Strahlung), die nicht an Materie gebunden ist (λ_r) (Schild und Willems 2011). Das Zusammenwirken der drei Wärmetransportvorgänge in einem porigen Festkörper wird auch als äquivalente Wärmeleitfähigkeit (λ_{eq}) (1) bezeichnet, die neben den genannten Anteilen auch noch von Kopplungseffekten λ_{ce} bestimmt wird, die in den Zwickeln der punktuellen Kontakte, die dort wirkenden thermischen Widerstände durch enthaltene (Rest-) Luftmoleküle oder adsorbierte Wassermoleküle herabsetzen (Sprengard und Spitzner 2011).

$$\lambda_{eq} = \lambda_{c,s} + \lambda_{c,g} + \lambda_r + \lambda_{co} + \lambda_{ce} \qquad (1)$$

Im Folgenden wird der Begriff Wärmeleitfähigkeit der äquivalenten Wärmeleitfähigkeit gleichgesetzt.

Die den einzelnen Anteilen zu Grunde liegenden Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung sind in der Literatur einschlägig beschrieben. Dämmstoffe sind stets poröse Produkte – enthalten also viele kleine, möglichst gegeneinander abgeschlossene Kavitäten, die mit Luft (oder anderen Gasen) gefüllt sein können oder auch weitgehend evakuiert sind (z. B. Vakuum Isolations-Paneele (VIP)). Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit poröser Stoffe haben nach Cammerer 1995:

- Wärmeleitfähigkeit der festen Bestandteile
- Porosität / Rohdichte
- Art, Größe, Anordnung der Poren und ggf. die anliegenden Temperaturdifferenzen
- Art des Porengases, Gasdruck in den Poren, Gasdurchlässigkeit der Porenwände
- Strahlungseigenschaften der Begrenzungswände der Poren
- Temperatur und Wasser-/Feuchtegehalt

Viele der genannten Einflussfaktoren auf die Wärmleitfähigkeit können sich im Laufe der Nutzung je nach den Randbedingungen der Anwendung ändern. Durch Hydrolyse oder Temperatureinfluss kann sich die Struktur des Feststoffgerüsts ändern. Eventuell vorhandene Auflasten können die Rohdichte und damit auch die Größe der Porenräume beeinflussen. Durch die Anlagerung von Feuchtigkeit und auch durch Verschmutzungen können sich die Strahlungseigenschaften der Oberflächen verändern. Der unter baupraktischen Gesichtspunkten entscheidendste Einfluss ist jedoch der Feuchtegehalt des Dämmstoffs.

Aus diesem Grund befasst sich dieses Kapitel mit der Fragestellung, wie sich die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Feuchte von Dämmstoffen insbesondere bei Innendämmungen verhält. Zunächst sollen hierbei Grundlagen und Messverfahren beschrieben

und anschließend mittels einer Simulationsstudie untersucht werden, wie hoch der Feuchteeinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Innendämmstoffen ist.

2.2.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit feuchter Dämmstoffe unter stationären und instationären Temperaturbedingungen

In diesem Kapitel sollen grundsätzliche Erläuterungen zur Feuchteaufnahme und -speicherung von porösen (Dämm-)Stoffen gemacht werden, sowie deren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit beschrieben werden. Anschließend werden mögliche Verfahren zur Bestimmung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit beschrieben sowie erklärt, inwiefern diese Thematik besondere Relevanz bei Innendämmungen besitzt.

2.2.1.1 Grundlagen zur Feuchteaufnahme von porösen Stoffen

Bei bauüblichen Klimaverhältnissen sind Baustoffe nie ganz trocken, sondern enthalten stets eine von den Umgebungsverhältnissen abhängige Menge an Wasser. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Baustoffe stets an „feuchte“ Luft angrenzen und in größerem oder geringem Umfang Wasser aus dieser aufnehmen. Bei neu errichteten Konstruktionen kann zusätzlich Feuchte aus dem Herstellungsprozess der Materialien oder aus der Bauphase anfallen.

Obwohl praktisch alle Baustoffe zumindest geringe Mengen an Feuchtigkeit adsorbieren können, wird in der Literatur oft zwischen nicht-hygroskopischen und hygroskopischen Stoffen unterschieden. Zur Unterscheidung ist ein Grenzwert von 0,5 M.-% Feuchtigkeitsaufnahme (bezogen auf den absolut trockenen Stoff) bei einer relativen Luftfeuchte von 80 % üblich. Stoffe, die mehr Feuchtigkeit aufnehmen, werden als hygroskopisch, Stoffe, die weniger Feuchtigkeit aufnehmen, als nicht-hygroskopisch bezeichnet.

Grundsätzlich können Baustoffe Wasser über Absorption, Adsorption oder Kapillarkondensation aufnehmen, wobei diese verschiedenen Formen der Wasseraufnahme unter dem Sammelbegriff Sorption zusammengefasst sind. Ändert sich die relative Feuchte der umgebenden Luft, so ändert sich auch der Wassergehalt des Baustoffs und zwar so lange, bis er sich den neuen Klimaverhältnissen angepasst hat und sich die sogenannte Gleichgewichtsfeuchte einstellt. Der Zusammenhang zwischen der Gleichgewichtsfeuchte eines Stoffes und der relativen Feuchte der umgebenden Luft kann in sogenannten Sorptionsisothermen dargestellt werden (Jenisch 1996). Die Sorptionsisotherme hygroskopischer poröser Baustoffe besitzt in der Regel eine typische S-Form, wie beispielhaft in Abb. 2-6 gezeigt.

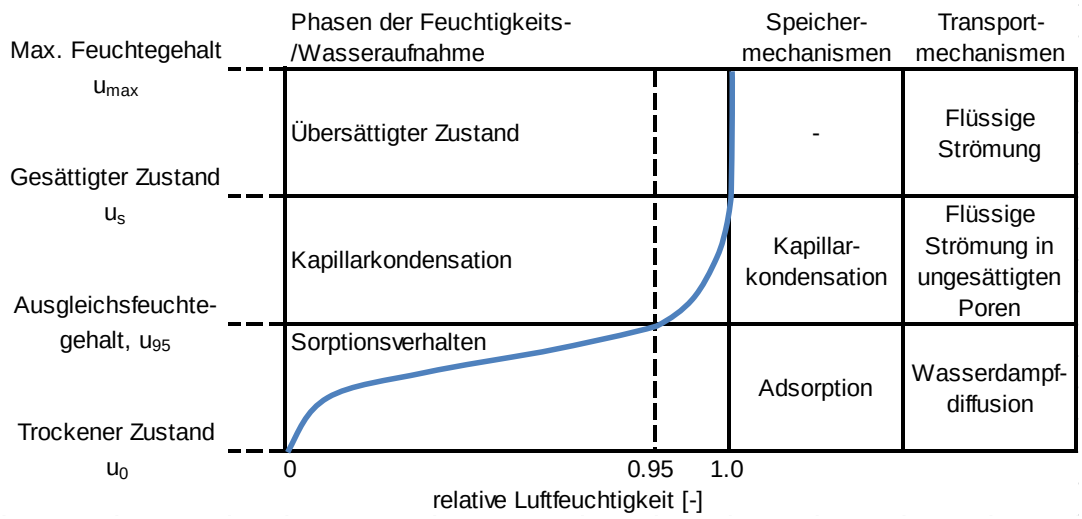


Abb. 2-6: Unterschiedliche Phasen der Feuchtespeicherung und damit verbundene Speicher- und Transportmechanismen.

In porösen Baustoffen lassen sich grundsätzlich drei Bereiche der Feuchtespeicherung unterscheiden, nämlich der Sorptionsfeuchtebereich, der Bereich in dem Kapillarkondensation auftritt und der Übersättigungsbereich. Der Sorptionsfeuchtebereich (0 – 95 % relative Feuchte) ist bestimmt durch die Anlagerung von Wasser aus der umgebenden Luft bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands. Ab einer relativen Feuchte von 95 % steigt die Sorptionsisotherme sehr stark an, der Bereich der Kapillarkondensation (häufig auch überhygroskopischer Bereich) ist erreicht. In diesem Bereich saugen kapillarporöse hygroskopische Materialien Wasser bis zur freien Wassersättigung auf. Die freie Wassersättigung ist nach Krus 1996 definiert als „diejenige Stofffeuchte, die durch freies Saugen ohne Einwirkung äußerer Kräfte unter Normaldruck erreicht werden kann. Bei kapillarporösen Baustoffen liegt die freie Wassersättigung immer unterhalb des durch den offenen Porenraum möglichen Wassergehaltes und stellt einen wichtigen Kennwert des Baustoffs dar“.

Obwohl die Sorptionsisotherme grundsätzlich im Bereich zwischen 0 und 100 % relativer Feuchte angegeben werden kann, ist jedoch zu beachten, dass im Kapillarwasserbereich bei über 95 % relativer Feuchte die Messung der Wasseraufnahme mit hohen Unsicherheiten behaftet ist. Zwar ist eine relative Luftfeuchte von 100 % durch Lagerung über Wasser grundsätzlich erzielbar, aber aufgrund der beschränkten Genauigkeit der Temperaturregelung können stets Kondensationsphänomene auftreten, welche die Genauigkeit des Verfahrens beeinflussen. Üblicherweise wird deshalb der Bereich bis ca. 95 % r. F. als Sorptionsfeuchtegehalt bezeichnet und das Verhalten im Bereich der Sättigung und im überhygroskopischen Bereich durch alternative Verfahren ermittelt (Krus 1996), bzw. rechnerisch bestimmt (Holm et al. 2002).

Ein Überschreiten der freien Wassersättigung und damit der Übergang in den Übersättigungsbereich ist nur durch die Anwendung äußeren Drucks, erzwungene Kondensation, Unterschreitung des Taupunktes oder lange Wasserlagerung möglich (Krus 1996). Der maximale Wassergehalt eines Materials ist bestimmt durch die Porosität. Der

Wassergehalt hängt im Übersättigungsbereich nicht mehr von der relativen Feuchte ab, da diese immer 100 % ist. Stattdessen hängt er von den Kondensations- und Verdunstungsbedingungen ab und schwankt im Bereich zwischen der freien Wassersättigung und dem maximalen Wassergehalt.

2.2.1.2 Der Einfluss des Feuchtegehalts auf die Wärmeleitfähigkeit

Eine Erhöhung des Feuchtegehalts in einem Baumaterial ist nicht nur im Schadensfall möglich, sondern kann auch je nach Innenraumnutzung, Konstruktion und Standort des Gebäudes einer jahreszeitlichen Schwankung unterworfen sein. Aus diesem Grund wird in Deutschland üblicherweise die Wärmeleitfähigkeit bei einem Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23°C / 80 % r. F. (23/80) nach DIN 4108-4 Abs. 4.2, bzw. auf europäischer Ebene nach DIN EN ISO 10456, Tabelle 4 bei 23°C / 50 % r. F. (23/50) angegeben.

Eine Erhöhung des Feuchtegehalts beeinflusst die Wärmeleifähigkeit von Dämmstoffen aufgrund unterschiedlicher Effekte. Dabei muss unterschieden werden, ob sich das Material im temperatur- und feuchtetechnischen Gleichgewicht befindet oder nicht. Im einen Fall liegen also stationäre, im anderen Fall instationäre Bedingungen vor. Im Weiteren muss unterschieden werden, ob Wasser am Feststoffgerüst adsorbiert ist oder als freies flüssiges Wasser in den Porenräumen auftritt.

Unter stationären Bedingungen bewirkt die eingelagerte Feuchtigkeit in erster Linie eine Erhöhung der Wärmeleitung in den Zwickeln der Kontaktpunkte und setzt die dort herrschenden Wärmeübergangswiderstände herab, bzw. schließt bei Auffüllung kleinerer Kavitäten benachbarte Partikel wärmetechnisch kurz. In Abb. 2-7 sind noch einmal die Wärmeübertragungsmechanismen und der Einfluss von Feuchtigkeit auf die Wärmeübertragung im Feststoffgerüst schematisch dargestellt.

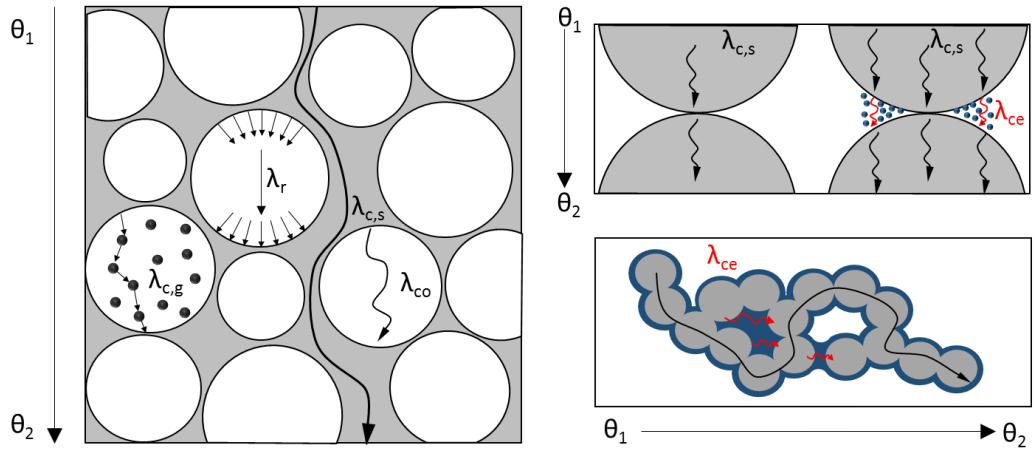


Abb. 2-7: Links: Wärmeübertragung in einem porösen Material (λc,g = Wärmeleitfähigkeit in der Gasphase, λc,s = Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs, λr = Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung in den Porenräumen, λco = Wärmeübertragung durch Konvektion (in Anlehnung an Schild und Willems 2011); Rechts oben: Verringerung des Wärmeübergangswiderstandes zwischen zwei Partikeln durch adsorbiertes Wasser; Rechts unten: Kurzschluss zwischen Partikeln durch adsorbiertes oder flüssig vorliegendes Wasser.

Liegt Wasser in den Porenräumen in flüssiger Form vor, so sind die oben beschriebenen Effekte verstärkt. Im Extremfall einer komplett unter Wasser stehenden Dämmstoffschicht nimmt der Dämmstoff in diesem Bereich schließlich die thermischen Eigenschaften von flüssigem Wasser an, einschließlich konvektiver Effekte (bspw. bei der Unterspülung von Dämmschichten) oder Latentwärme-Effekte. Unter latenter Wärme versteht man diejenige Wärme, die von einem Gegenstand aufgenommen oder abgegeben wird, ohne dass sich seine Temperatur dabei ändert. Diese Situation tritt auf, wenn Wärme bei Phasenübergängen (z.B. Gefrieren, Kondensieren) verbraucht oder freigesetzt wird.

Absolut stationäre Bedingungen lassen sich auch in kontrollierten Experimenten nur mit hohem apparativem und zeitlichem Aufwand erreichen. Unter baupraktischen Bedingungen und auch während der sogenannten Einschwingphase bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit im Experiment liegen demnach stets instationäre Bedingungen vor, bei denen zusätzliche Wirkeffekte auf die messbaren Wärmeströme auftreten.

Sowohl im Experiment zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit als auch unter realen Bedingungen liegen an einem Dämmstoff stets Temperaturdifferenzen an, die wie eingangs beschrieben einen Wärmestrom von der warmen zur kalten Seite des Materials bewirken. Geht man zunächst von einer über die Dicke des Materials gleichmäßigen Verteilung des Feuchtegehalts aus, so bewirkt das Anlegen eines Temperaturgradienten auf der Warmseite eine Trocknung und auf der Kaltseite eine Auffeuchtung des Materials. Der physikalische Prozess der Trocknung wird bei einem hygroskopischen Material als Desorption und die Auffeuchtung als Adsorption bezeichnet. Liegt Wasser in flüssiger Phase vor, spricht man von Verdunsten und Kondensieren.

Die Adsorption, bzw. die Kondensation sind exotherme Prozesse, d. h. es wird Wärme aus der sorptiven Bindung des Wasserdampfs an das Feststoffgerüst, bzw. der Bindung der Wassermoleküle untereinander frei. Konkret wird hierbei die Bewegungsenergie des Wasserdampfmoleküls verringert und dieser Enthalpieverlust wird in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben. Gleichzeitig findet ein Phasenwechsel von der Dampfphase in die flüssige Phase statt, was die enthaltene latente Wärme freisetzt. Die jeweiligen Energiemengen sind entsprechend dem Typ der Bindungen unterschiedlich und unterscheiden sich demnach auch zwischen Adsorption und Kondensation.

Umgekehrt ist die Desorption, bzw. das Verdampfen auf der Warmseite ein endothermer Prozess, der Energie verbraucht. Die Desorption eines Wassermoleküls auf der Warmseite verbraucht demnach Energie, die in Form von kinetischer Energie und der latenten Wärme für den Phasenwechsel im Molekül gespeichert ist. In Folge der Partialdampfdruckdifferenzen in der Gasphase diffundiert das Molekül durch einen Teil des Probenquerschnitts und adsorbiert in einem kälteren Bereich der Probe wieder am Feststoffgerüst, wobei die gespeicherte Energie wieder freigegeben wird. Durch diese Effekte wird also ein Wärmestrom induziert, der nicht direkt mit der Wärmeleitung des Materials zusammenhängt und zudem bei reversiblen Diffusionsströmen über einen Tag-/ Nachtzyklus, respektive einen Jahreszyklus auch zu reversiblen Energieein- und Energieausträgen führt.

Neben den Trocknungs- und Auffeuchtungsvorgängen, die zu Diffusionsströmen in der Gasphase führen, diffundieren auch Wassermoleküle auf der Oberfläche des Feststoffgerüsts bzw. im Feststoffgerüst selbst, entlang dem Wasserdampfpartialdruckgefälle. Auch diese Moleküle führen Energie mit sich und beeinflussen demnach den Wärmestrom in der Probe. Die genannten Diffusionsvorgänge kehren sich wie bereits erwähnt bei instationären Temperaturbedingungen um. Aber auch unter stationären Bedingungen (bspw. während der Messung der Wärmeleitfähigkeit) können ggf. umgekehrte bzw. sich zeitlich abschwächende Diffusionsströme einstellen. Dies ist dann zu beobachten, wenn durch die voranschreitende Auffeuchtung der Probe auf der Kaltseite der zunächst temperaturgetriebene Wasserdampfpartialdruckunterschied durch den zunehmend größer werdenden Unterschied im Feuchtegehalt kompensiert wird. Exemplarisch betrachtet könnte im Extremfall auf der Warmseite ein absolut trockener, auf der Kaltseite ein gesättigter Zustand vorliegen, womit unter bestimmten Temperaturbedingungen ein Wasserdampfpartialdruckgefälle von der Kaltseite zur Warmseite entstehen würde, was zu einer Rückdiffusion führt. Unter realen Bedingungen ist ein vollständig umgekehrter Diffusionsstrom im stationären Fall zwar unwahrscheinlich, der genannte Effekt kann sich aber durchaus auf die gemessenen Wärmeströme auswirken und hierdurch zu zeitlichen Effekten (zyklischen Schwankungen) führen.

Ähnliche Effekte ergeben sich, sobald auf der Kaltseite für längere Zeit kondensierende Bedingungen vorliegen. In der Anwendung auf dem Flachdach liegen die Kaltseite oben und die Warmseite unten. Kommt es zu einer Kumulierung des kondensierten Wassers, so bilden sich immer größere Tropfen, deren Gewichtskraft schließlich die Adhäsionskraft zum Partikel überwindet. In Folge löst sich der Tropfen und das Wasser rinnt in flüssiger Form zurück auf die Warmseite, bevor es dort angekommen wieder verdunstet und in Form von Wasserdampf in Richtung Kaltseite wandert.

2.2.1.3 Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleifähigkeit wird für Dämmstoffe üblicherweise unter stationären Bedingungen in sogenannten Plattengeräten vorgenommen. Typische Prüfgeräte sind dabei das Wärmestrommessplattengerät (beschrieben in ISO 8301, DIN EN 12664, DIN EN 12667, DIN EN 12939 und DIN EN 1934) und das Zweiplattenverfahren (beschrieben in ISO 8302, DIN EN 12667 und DIN EN 12664).

Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile. Das Zweiplattenverfahren (Abb. 2-8) wird in der Regel als Referenzverfahren herangezogen, weil es eine direkte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ermöglicht. Dabei wird die Probe zwischen einer elektrisch betriebenen Heizplatte und einer Kühlplatte eingespannt. Die Heizplatte ist außen von einem sogenannten Schutzring eingefasst, der auf die Temperatur der Heizplatte eingeregelt wird. Durch den Schutzring werden seitliche Wärmeströme und Randverluste ausgeglichen, womit die flächenspezifische Leistungsaufnahme der Heizplatte direkt dem Wärmestrom in W/m^2 durch die Probekörper bei der anliegenden Temperaturdifferenz entspricht. Zusammen mit der bekannten Dicke des Probekörpers kann anschließend die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden.

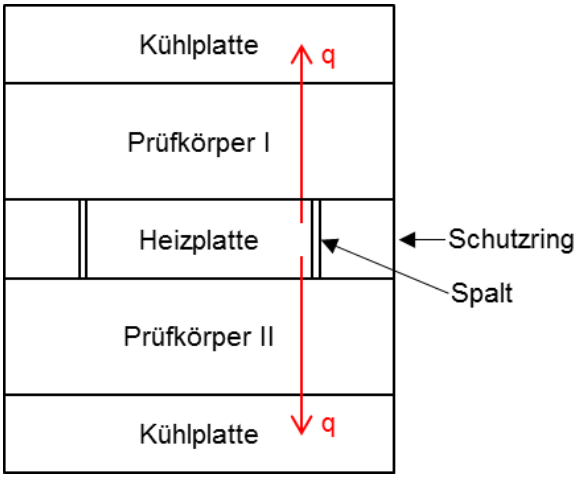


Abb. 2-8: Prinzipskizze zum Zweiplattenverfahren.

Das Wärmestrommessplattenverfahren (Abb. 2-9) ist hingegen ein indirektes Messverfahren. Hierbei wird der Prüfkörper zwischen einer Heiz- und einer Kühlplatte eingespannt, die beide mittels Thermostaten auf eine bestimmte Temperatur eingestellt werden. Der entstehende Wärmestrom durch den Prüfkörper hindurch wird durch sogenannte Wärmestrommessplatten bestimmt. Wärmestrommessplatten geben in Abhängigkeit der anliegenden Temperatur-differenz eine Thermospannung aus, die zum Wärmestrom proportional ist. Unter Kenntnis der Temperaturdifferenz und der Probendicke kann die Wärmeleitfähigkeit berechnet werden. Die Wärmestrommessplatten müssen in einem separaten Verfahren kalibriert werden, weshalb es sich um ein indirektes Messverfahren handelt, womit eine gegenüber dem Zweiplattenverfahren größere Messungenauigkeit einhergeht. Ein Vorteil des Wärmestrommessplattenverfahrens ist jedoch, dass durch die Verwendung von Thermostaten an Heiz- und Kühlplatte beliebige Temperaturdifferenzen aufgeprägt werden können. Bei Anwendungen, in denen die Einstellung einer möglichst exakten Temperaturdifferenz oder auch die Aufprägung instationärer Temperaturverläufe auf Warm- und Kaltseite wichtig sind, ist der Einsatz eines Wärmestrommessplattenverfahrens vorteilhaft.

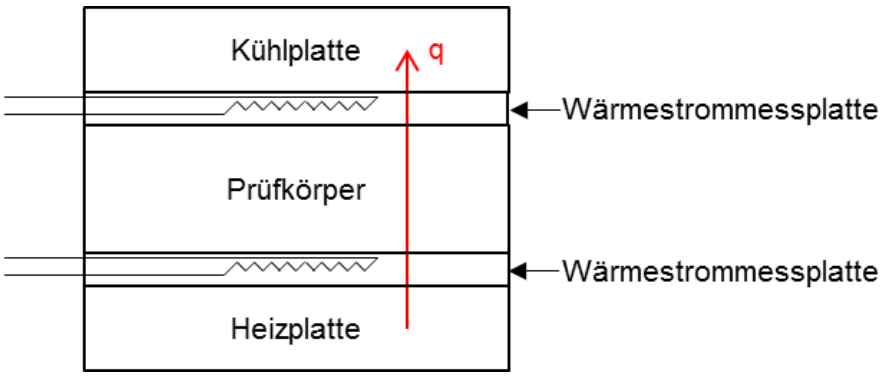


Abb. 2-9: Prinzipskizze zum Wärmestrommessplattengerät.

Im Sinne einer Abgrenzung der Begrifflichkeiten zu der in dieser Arbeit angewendeten Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturverhältnissen muss noch eine Reihe weiterer Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erwähnt werden, die oft als instationäre, transiente oder auch dynamische Verfahren bezeichnet werden.
Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit angewendeten Ansatz verwenden diese Messverfahren jedoch keine zyklisch schwankenden Temperaturdifferenzen, sondern prägen entweder eine konstante Heizrate (Hot Wire, Transient Hot Bridge, Hot disc), oder einen kurzen Temperaturpeak (Laser Flash) auf die Probe auf und messen die Antwort der Temperaturerhöhung am Sensor, bzw. in der Umgebung des Sensors, um daraus unter Kenntnis weiterer Größen (spezifische Wärmekapazität, Rohdichte, etc.) die Wärmeleitfähigkeit zu berechnen. Durch das indirekte Messprinzip nimmt die Messungenauigkeit insbesondere bei heterogenen Materialstrukturen wie Dämmstoffen stark zu. Zudem können meist nur kleine Prüfkörper gemessen werden, bzw. sind nur die Materialbereiche um den Sensor herum involviert, was bei Inhomogenitäten in Rohdichte und Struktur problematisch hinsichtlich der Repräsentativität ist.

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an feuchten Dämmstoffen unter stationären Bedingungen

Die Auswertung von Messdaten unter stationären Temperaturbedingungen erfordert zunächst in jedem Fall einen stationären Temperaturgradienten im Probenquerschnitt. Je nach Rohdichte und spezifischer Wärmekapazität (die auch wesentlich vom Feuchtegehalt abhängt) ist dieses Kriterium normalerweise in wenigen Stunden erreicht.

Bei der Messung von feuchten Stoffen verlagert sich aber wie beschrieben auch die Feuchteverteilung im Dämmstoff und es bildet sich ein Feuchtegradient mit niedrigeren Feuchtegehalten auf der Warmseite und höheren Feuchtegehalten auf der Kaltseite aus. Die Geschwindigkeit dieses Verlagerungsprozesses ist dabei von den Diffusionswiderständen im Prüfkörper abhängig. Für die Laufzeit der Messung und das Konzept der Auswertung ergeben sich damit unterschiedliche Fälle.

Bei diffusionsoffenen Materialien (z. B. faserförmige Dämmstoffe) findet eine schnelle Umlagerung des Feuchtegehalts statt, was praktisch von Anfang an auch die gemessenen Wärmeströme beeinflusst. In diesem Fall ist der gemessene Wärmestrom bei Erreichen eines ausgeglichenen Temperaturprofils also bereits von den beschriebenen Latentwärmeeffekten beeinflusst. Um einen Wert der Wärmeleitfähigkeit des feuchten Stoffes im Sinne eines physikalisch korrekten Messwerts zu erhalten muss demnach abgewartet werden bis in der Probe ein stationärer Feuchtegradient ausgebildet ist. Je nach Diffusionswiderstand und Sorptionsverhalten kann dies wenige Tage bis hin zu Wochen dauern.

Bei diffusionsoffenen, nicht hygroskopischen Dämmstoffen (beispielsweise Mineralwolle) können je nach Feuchtegehalt auch abweichende Muster der Wärmeströme auftreten. In Abb. 2-10 ist ein möglicher Verlauf der Wärmeströme aus ISO 10051 abgebildet. Zunächst ist hier ein konstanter Wärmestrom zu beobachten (Phase A) in dem eine konstante Verdunstungs-leistung auf der Warmseite und entsprechende Kondensation auf der Kaltseite zu

gleichbleibenden, erhöhten Wärmeströmen führt. In einer Übergangsphase (Phase B) ebbt der Wärmestrom mit dem Voranschreiten der Umlagerung des Feuchteprofils ab und erreicht schließlich in Phase C wieder ein konstantes Niveau. Wird unter diesen Bedingungen die Messung in Phase A abgebrochen, wird die Wärmeleitfähigkeit überschätzt.

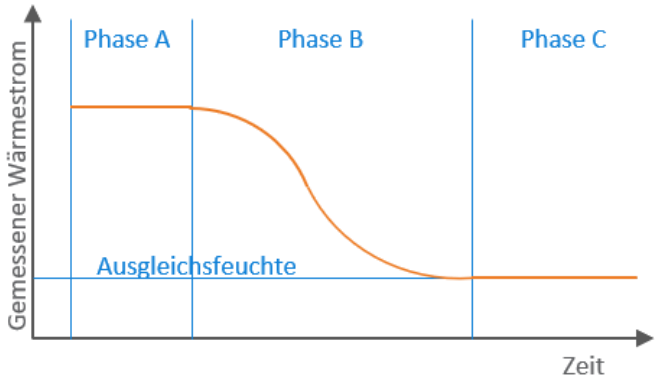


Abb. 2-10: Exemplarischer Verlauf der Wärmeströme bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten Stoffen unter stationären Temperaturbedingungen, Phase konstanter Verdunstung auf der Warmseite ohne Rücktransport (A), Übergangsphase (B) und Phase konstanter Wärmeströme bei abgeschlossener Umlagerung des Feuchteprofils (C) (eigene Darstellung des FIW München in Anlehnung an ISO 10051:1996)

Bei sehr diffusionshemmenden Materialien (z. B. geschlossenzellige Hartschäume) findet aufgrund der hohen Diffusionswiderstände nur eine sehr langsame Umlagerung der Feuchtigkeit statt. In diesem Fall kann die Messung beendet werden, sobald die Probe einen stationären Temperaturgradienten aufweist, weil eine Beeinflussung der gemessenen Wärmeströme durch die sehr langsame Umlagerung der Feuchte zu vernachlässigen ist.
Ein Nachweis konstanter Wärmeströme kann beispielsweise durch die Anwendung geeigneter Regressionsmodelle und Vergleich der Koeffizienten mit den mittleren Messwerten der letzten Stunden erfolgen. In diesem Zusammenhang haben sich einfache exponentielle Abklingkurven bewährt.

Einschränkend muss bedacht werden, dass die unter stationären Bedingungen bei abgeschlossener Feuchteumlagerung ermittelten Werte stets eine mittlere Wärmeleitfähigkeit für eine Reihe von Schichten mit unterschiedlichen Feuchtegehalten darstellen. Unter Annahme einer linearen Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feuchtegehalt ist dieser Mittelwert korrekt – liegt jedoch ein nicht lineares Verhalten oder der Fall einer vollständigen Austrocknung auf der Warmseite mit Wasser in flüssiger Phase in der Schicht auf der Kaltseite vor, sind die Mittelwerte unter Umständen nicht repräsentativ für den mittleren Feuchtegehalt der Probe.

Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit an feuchten Dämmstoffen unter instationären Bedingungen

Unter instationären Temperaturbedingungen ändern sich die Intensität und ggf. auch die Richtung der Wärmeströme mit der Temperaturdifferenz. Bezüglich einer Auswertung muss hierbei beachtet werden, dass unter normalen Prüfbedingungen (d. h. ohne ein Slicen des Prüfkörpers) Informationen über thermische Zustände nur an den Grenzflächen zwischen

Prüfkörper und Heiz-/Kühlplatten vorliegen. Dies führt zu der Problematik, dass die Berechnung einer zeitlich aufgelösten Wärmeleitfähigkeit zwangsläufig zu unsinnigen Werten führt.
Zur Veranschaulichung nehmen wir eine konstante Temperatur von 20°C auf der Warmseite und eine sinusförmige Temperaturkurve zwischen 20°C und 0°C auf der Kaltseite an. Erreicht der sinusförmige Temperaturverlauf auf der Kaltseite die 20°C liegt am Probekörper eine Temperaturdifferenz von 0 K an. Aufgrund der thermischen Trägheit des Prüfkörpers werden zu diesem Zeitpunkt aber noch Wärmeströme an den Grenzflächen zwischen Prüfkörper und Heiz- bzw. Kühlplatte gemessen. Wird in diesem zeitlichen Schritt die Wärmeleitfähigkeit mit den vorliegenden Informationen berechnet ergeben sich unendlich hohe Werte. Im umgekehrten Fall, bspw. wenn sich die Wärmeströme umdrehen, kann sich auch eine Wärmeleitfähigkeit von Null ergeben. Beide Fälle sind rechentechnische Artefakte und physikalisch falsch, beeinflussen letztlich aber auch die Mittelwertbildung wenn dieser Zeitschritt eingeschlossen ist.
Der einzig sinnvolle Weg zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unter instationären Temperaturbedingungen liegt daher in der Verrechnung mittlerer Wärmeströme und mittlerer Temperaturdifferenzen über einen kompletten Zyklus der Temperaturschwankung, beispielsweise im Rahmen einer tageweisen Betrachtung. Entsprechende Hinweise finden sich in der ISO 9869-1.

2.2.1.4 Feuchte Dämmstoffe und Innendämmung

Ungünstige Temperatur- und Dampfdruckverläufe in Baukonstruktionen können dazu führen, dass im Inneren eines Bauteils Tauwasser anfällt. Wenn Wasserdampf beispielsweise aufgrund von Wasserdampfpartialdruckunterschieden von innen nach außen durch den Dämmstoff diffundiert, kann er bei Kontakt mit kalten Außenbauteilen so stark abkühlen, dass der Wasserdampfsättigungspunkt erreicht wird und Kondensat ausfällt. Fällt andauernd oder häufig Kondensat an, können Dämmstoffe völlig durchnässen. Grundsätzlich gilt für feuchte Dämmstoffe, dass sie Wärme besser leiten, als trockene. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass Wasser eine etwa 20-mal höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt als ruhende Luft. Demnach erhöht sich der Heizenergieverbrauch von Gebäuden, die feuchte Dämmmaterialien enthalten.

Um einen ausreichenden Feuchteschutz von innengedämmten Außenwänden zu gewährleisten, wird häufig auf die traditionelle Strategie gesetzt, die Tauwasserbildung grundsätzlich zu unterbinden. Dies wird durch den Einsatz von diffusionsdichten Dämmstoffen oder von Dampfsperren gewährleistet, die nicht zulassen, dass Wasserdampf in kühlere Bereiche der Konstruktion eindringen kann. Jedoch verhindern solche Konstruktionen gleichzeitig auch die Abtrocknung eventuell anfallender Feuchte (z.B. Bau-/Materialfeuchte, Schlagregen) zum Innenraum hin.

Im Gegensatz zu diesem traditionellen Ansatz stehen Kondensat tolerierende Innendämmsysteme. Die Bildung von Kondensat in den Kapillaren und Poren bzw. Tauwasser wird hier explizit zugelassen, wobei drei grundsätzliche Kriterien erfüllt sein müssen:

- Die Austrocknung des Tauwassers aus dem Bauteil muss im nachfolgenden Sommer gewährleistet sein, um eine kontinuierliche Auffeuchtung der Konstruktion zu vermeiden.

- Die verwendeten Baumaterialien dürfen durch das anfallende Tauwasser nicht beschädigt werden.
- Die Wärmeleitfähigkeit der Bauteile darf durch die Feuchtezunahme nicht in unzulässigem Maße verschlechtert werden.
- Die maximal auftretende Tauwassermenge muss ohne Ablaufen von dem Material gehalten werden können.

Kondensat tolerierende Innendämmsysteme können folglich nur mit bestimmten Dämmstoffen realisiert werden. Sie müssen eine schadenfreie Aufnahme, Verteilung und in der nächsten Entspannungsphase auch Wiederabgabe des Kondensats gewährleisten. In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, dass der Begriff „kondensattolerierend“ nicht gleichbedeutend mit dem Begriff „kapillaraktiv“ ist. Kondensat tolerierende Innendämmsysteme müssen nicht zwangsläufig eine ausgeprägte kapillare Leitfähigkeit aufweisen, generell ist eine positive Wechselwirkung mit Wassermolekülen bedeutsamer. Dies erklärt auch die große Vielfalt an kondensattolerierenden Innendämmmaterialien. So funktionieren Holzfasern und andere natürliche Faserdämmstoffe überwiegend aufgrund ihrer hohen Wasserspeicher-fähigkeit, mineralische Dämmstoffe wie Calciumsilikat oder Perlite überwiegend aufgrund ihrer kapillaraktiven Eigenschaften (Fachverband Innendämmung e.V. 2016).

Hersteller greifen auf verschiedene Methoden zurück, um zu gewährleisten, dass ihr Dämmsystem mit der anfallenden Feuchtebelastung umgehen kann. Eine Möglichkeit besteht beispielsweise darin, den Kleber diffusionsdichter zu formulieren als den Dämmstoff und auf eine vollflächige Verklebung der Innendämmplatte zu achten. Tauwasser bzw. Kondensat in den Kapillaren und Poren fällt dann – wenn überhaupt – im Bereich der Grenzschicht zwischen Kleber und Dämmplatte an (siehe Abb. 2-11). Dieses Verhalten kann erwünscht sein, wenn für den Dämmstoff – im Gegensatz zum dahinter liegenden Bestandsmauerwerk – bekannt ist, dass er mit der Feuchtebelastung umgehen kann. Auf der anderen Seite verhindert eine diffusionshemmende Klebeschicht in gewissen Maße, dass Feuchte, die von außen in das Bestandsmauerwerk eindringt, zur Raumseite der Konstruktion hin austrocknen kann. Bei Kondensat tolerierenden Innendämmsystemen kann es also auch sinnvoll sein, bewusst einen diffusionsoffenen Kleber zu verwenden. An dieser Stelle wird deutlich, dass Kleber und Dämmstoff stets aufeinander abgestimmt sein sollten und es verschiedene Lösungsansätze zum Umgang mit Feuchtelasten in Innendämmsystemen gibt.

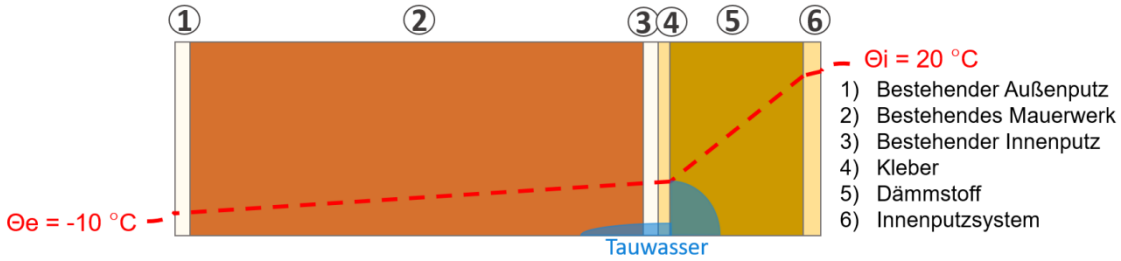


Abb. 2-11: Funktionsprinzip einer kondensattolerierenden, diffusionsoffenen Innendämmung: Exemplarischer Temperaturverlauf und möglicher Tauwasseranfall in einem nachträglich innengedämmten Mauerwerk.

Bei kondensattolerierenden Konstruktionen kann das angefallene Tauwasser in den Dämmstoff hinein transportiert und dort gespeichert werden. In der nächsten Trocknungsperiode muss das Tauwasser nur einen kürzeren Weg zum Innenraum hin überwinden. Auf diese Weise können auch kurze Entspannungsphasen zur Abtrocknung beitragen. Eine Akkumulation von Kondensat kann auf diese Weise leichter vermieden werden (Fachverband Innendämmung e.V. 2016).

Es ist jedoch nicht zu leugnen, dass es bei kondensattolerierenden Innendämmsystemen über gewisse Zeiträume zu sehr hohen Feuchtegehalten oder auch Tauwasseranfall in der Dämmschicht kommt. Dies gilt vor allem für den „ersten Zentimeter“ (und z.T. auch noch den zweiten Zentimeter) der Dämmung von der Kaltseite aus gesehen. Hier wird der Großteil des anfallenden Kondensats gespeichert, während die anderen Bereiche der Dämmung kaum dazu beitragen. Vor allem in diesem Bereich wird die Wärmeleitfähigkeit demnach erhöht und der Wärmeschutz der Dämmschicht lässt nach.

Wie und ob kondensattolerierende Innendämmsysteme mit den anfallenden Tauwassermengen schadensfrei umgehen können, wird in anderen Teilen dieses Berichts ausführlich erörtert. Ziel der in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen ist es hingegen, den Einfluss hoher Feuchtegehalte in kondensattolerierenden diffusionsoffenen Innendämmsystemen auf die Wärmeleitfähigkeit und damit die energetischen Kennwerte von Konstruktionen abzuschätzen.

2.2.2 Methoden

Zur Modellierung baupraktischer Feuchtegehalte in diffusionsoffen ausgeführten, innengedämmten Außenwandkonstruktionen wurde die hygrothermische Simulationssoftware WUFI® Pro 5.3 verwendet. Die Modelle wurden hierbei als 1-dimensionale Schichtenmodelle umgesetzt. Über einen Zeitraum von fünf Jahren wurde anschließend die Simulation durchgeführt, wobei nur das letzte Simulationsjahr zur Ergebnisauswertung verwendet wird, da hier von einem hinreichend eingeschwungenen Zustand des Systems ausgegangen werden kann. Als Ergebnisdatei wird eine stundengenaue Darstellung der Temperatur und Feuchte an der Innen- und Außenseite des Dämmstoffs sowie in jedem Zentimeter der Dämmstoffschicht ausgegeben. Aus den ermittelten Daten kann anschließend auf durchschnittliche und maximale baupraktische Feuchtegehalte in diffusionsoffenen Innendämmungen geschlossen werden.

Auch Rückschlüsse über die Feuchteverteilung innerhalb des Bauteils sind möglich. Somit können die ermittelten Simulationsergebnisse dazu dienen, relevante Feuchtezustände für die späteren Messungen zu bestimmen.

2.2.2.1 Materialien

Die Simulationen werden an drei unterschiedlichen, hygroskopischen und diffusionsoffenen Innendämmmaterialien durchgeführt:

- Mineralische Dämmplatte (Material 1)
- Holzfaserdämmplatte hergestellt im Trockenverfahren (Material 2)
- Holzfaserdämmplatte hergestellt im Nassverfahren (Material 3)

Aufgrund der Probekörperverfügbarkeit handelt es sich hierbei nicht um dieselben Materialien, die im übrigen Projekt untersucht wurden. Die gewählten Materialien wurden jedoch als geeignet erachtet, um das generelle Feuchteverhalten von Mineraldämmplatten und Holzfaserdämmplatten in kondensattolerierenden Innendämmsystemen abzubilden.

Für die Simulationen wurden von den Herstellern bereitgestellte WUFI-Datensätze für alle drei Materialien verwendet. Lediglich die Feuchtespeicherfunktion wurde aufgrund von gemessenen Sorptionsisothermen angepasst, siehe Abb. 2-12 (Übersättigungsbereich nicht eingeschlossen). Da die betrachteten Dämmstoffe zu den hygroskopischen Materialien zählen, steigt ihr Feuchtegehalt mit zunehmender Feuchte zunächst nur mäßig an, nimmt dann aber im Kapillarwasserbereich deutlich zu. Dieses Verhalten ist bei Material 1 am ausgeprägtesten, während Material 2 und vor allem Material 3 bereits bei geringeren relativen Feuchten ein deutlicheres Sorptionsverhalten aufweisen. Die freie Wassersättigung ist bei Material 3 deutlich am höchsten (400 kg/m³), gefolgt von Material 2 (275 kg/m³) und Material 1 (241 kg/m³).

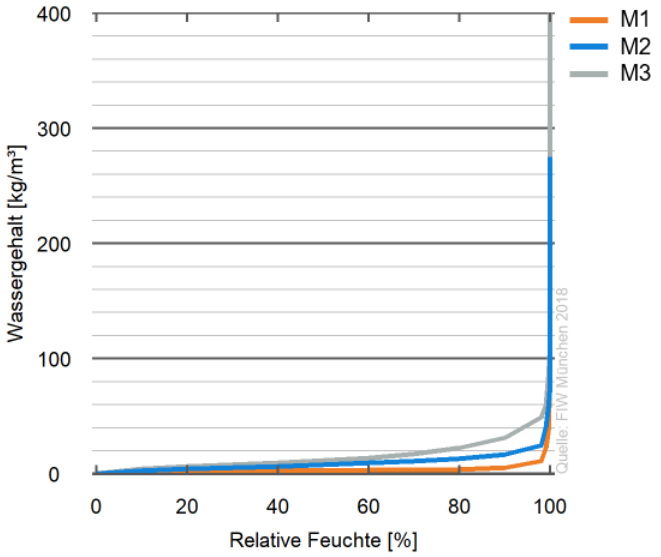


Abb. 2-12: Feuchtespeicherfunktionen der untersuchten Materialien (Orange = Material 1, Blau = Material 2, Grau = Material 3).

2.2.2.2 Konstruktionen

Alle drei Dämmmaterialien werden vor dem Hintergrund derselben Bestandkonstruktion betrachtet. Hierbei handelt es sich um ein ungedämmtes Vollziegelmauerwerk (300 mm) mit Außen- und Innenputz. Dieser Ausgangszustand weist einen U-Wert von 1,523 W/(m² K) auf. Die Dämmmaterialien werden mittels eines geeigneten Klebemörtels oberhalb des vorhandenen Innenputzes in den Stärken 60, 80 und 100 mm aufgetragen und mit einem geeigneten Klebe- und Armierungsmörtel sowie ggf. einem Oberputz verputzt. Der normativ vorgeschriebene, maximale sd-Wert von 0,5 m für diffusionsoffene Schichten wird auf der Innenseite der Dämmung in allen Fällen unterschritten. Somit ist eine ausreichende Diffusionsoffenheit des raumseitigen Anstrichs gewährleistet. Die genauen Schichtaufbauten der entstehenden innengedämmten Konstruktionen sowie deren wichtigste Materialkennwerte und U-Werte sind in Tab. 2-6, Tab. 2-7 und Tab. 2-8 zusammengefasst.

Tab. 2-6: Konstruktionsaufbau und Materialeigenschaften für Dämmung mit Material 1.

Material	**d [mm]**	**ρ [kg/m³]**	**λ [W/(m K)]**	**c [J/(kg K)]**	**Porosität [m³/m³]**	**μ [-]**	**U-Wert [W/(m² K)]**
Außenputz	15	1900	0,8	1000	0,24	19	0,47 (d=60) 0,39 (d=80) 0,33 (d=100)
Vollziegel Mauerwerk	300	1700	0,61	1000	0,35	19	
Kalkputz (Bestand)	10	1600	0,7	850	0,3	7	
Kleber	6	833	0,155	850	0,686	15	
Mineraldämmplatte	60/80/100	90	0,041	850	0,962	2.8	
Kleber/Armierung	10	833	0,7	850	0,686	15	

Tab. 2-7: Konstruktionsaufbau und Materialeigenschaften für Dämmung mit Material 2.

Material	**d [mm]**	**ρ [kg/m³]**	**λ [W/(m K)]**	**c [J/(kg K)]**	**Porosität [m³/m³]**	**μ [-]**	**U-Wert [W/(m² K)]**
Außenputz	15	1900	0,8	1000	0,24	19	0,45 (d=60) 0,37 (d=80) 0,31 (d=100)
Vollziegel Mauerwerk	300	1700	0,61	1000	0,35	19	
Kalkputz (Bestand)	10	1600	0,7	850	0,3	7	
Kleber/Armierung	5	1330	0,87	850	0,5	23	
Holzfaser Trockenverfahren	60/80/100	110	0,037	1500	0,927	3,0	
Kleber/Armierung	5	1330	0,87	850	0,5	23	
Oberputz	3	1640	0,87	850	0,4	50	

Tab. 2-8: Konstruktionsaufbau und Materialeigenschaften für Dämmung mit Material 3.

Material	**d [mm]**	**ρ [kg/m³]**	**λ [W/(m K)]**	**c [J/(kg K)]**	**Porosität [m³/m³]**	**μ [-]**	**U-Wert [W/(m² K)]**

Außenputz	15	1900	0,8	1000	0,24	19	0,47 (d=60) 0,38 (d=80) 0,32 (d=100)
Vollziegel Mauerwerk	300	1700	0,61	1000	0,35	19	
Kalkputz (Bestand)	10	1600	0,7	850	0,3	7	
Kleber/Armierung	5	1330	0,87	850	0,5	23	
Holzfaser Nassverfahren	60/80/100	160	0,038	1500	0,893	5	
Kleber/Armierung	5	1330	0,87	850	0,5	23	
Oberputz	3	1640	0,87	850	0,4	50	

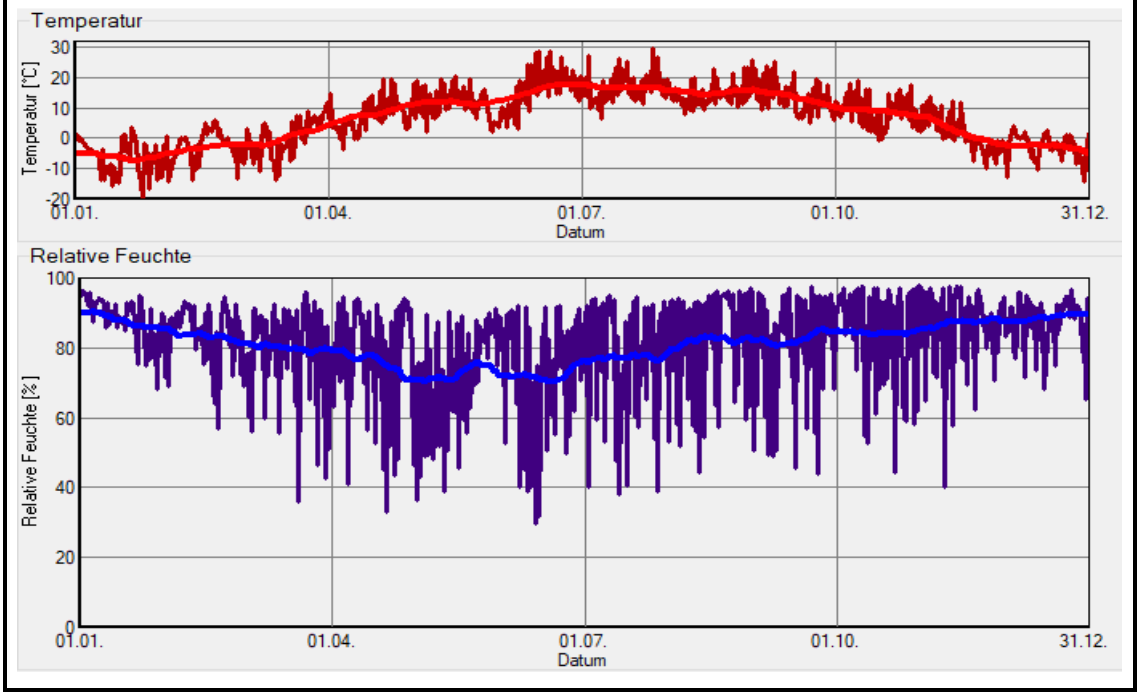
2.2.2.3 Varianten

Wie bereits erwähnt, wurden die Simulationen für drei verschiedene Dämmstoffe (Material 1-3) in jeweils drei verschiedenen Dämmstoffstärken (60, 80 und 100 mm) durchgeführt. Des Weiteren wurde eine Variation der inneren und äußeren Randbedingungen vorgenommen: Die auf der Außenseite angesetzten klimatischen Bedingungen werden durch Variation des Standortes verändert. Als erster Standort mit „Normalklima“ wird Holzkirchen gewählt. Hier treten im deutschen Vergleich zwar recht kühle Winter und recht warme Sommer auf, es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser Standort für die Abschätzung des hygrothermischen Verhaltens Ergebnisse liefert, die im normalen Bereich, jedoch auf der sicheren Seite liegen. Als zweiter Standort wird auf Grundlage des Referenzklimas von Fichtelberg mit dem Lokalklimagenerator des Fraunhofer IBP ein „Extremklima“ generiert. Die Klimaanalysen beider Standorte sind in Tab. 2-9 und Tab. 2-10 zu sehen. Da an beiden Standorten die Westseite die klar am meisten von Schlagregen belastete Fassade ist, wird an beiden Standorten ausschließlich die westliche Orientierung der Bauteile als kritischer Fall betrachtet.

Tab. 2-9: Klimaanalyse Standort Holzkirchen (WUFI).

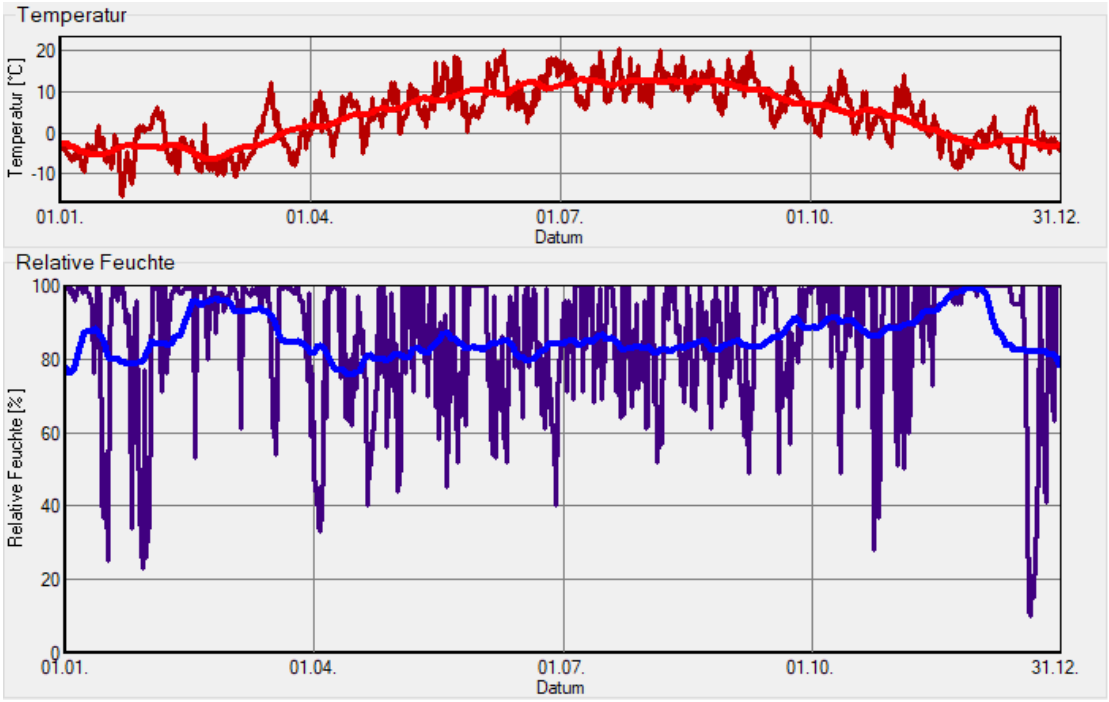
Standort Holzkirchen

Mittlere Temperatur in °C	6,6	Mittlere Relative Luftfeuchte in %	81
Maximale Temperatur in °C	32,1	Maximale Relative Luftfeuchte in %	98
Minimale Temperatur in °C	-20,1	Minimale Relative Luftfeuchte in %	24
Gegenstrahlungssumme in kWh/m²a	2668,4	Normalregensumme in mm/a	1185



Tab. 2-10: Klimaanalyse Standort Fichtelberg (WUFI) als Extremklima auf Basis des Lokalklimagenerators des Fraunhofer IBP.

Standort nach Referenzklima Fichtelberg			
Mittlere Temperatur in °C	4,2	Mittlere Relative Luftfeuchte in %	86
Maximale Temperatur in °C	23,5	Maximale Relative Luftfeuchte in %	100
Minimale Temperatur in °C	-17,0	Minimale Relative Luftfeuchte in %	9
Gegenstrahlungssumme in kWh/m²a	2641,4	Normalregensumme in mm/a	903



Da im Falle der Innendämmung davon auszugehen ist, dass innere Feuchtelasten einen großen Einfluss auf die relative Feuchte der Dämmebene haben, wird das Innenklima ebenfalls variiert. So werden die Feuchtelasten als „normal“ und „hoch“ nach DIN EN 15026 in Abhängigkeit des Belegungsgrades und der Außenlufttemperatur für normale Belegung (Feuchtelast 30 % - 60 %) und hohe Belegung (40 % - 70 %) bei Raumlufttemperaturen zwischen 20 °C und 25 °C angesetzt. Aus den somit definierten Randbedingungen ergeben sich die insgesamt 36 Simulationsvarianten wie dargestellt in Tab. 2-11.

Tab. 2-11: Matrix der 36 Simulationsvarianten.

Dämmmaterial	Dämmstärke	Standort	Feuchtelast	Variantenschlüssel
Material 1	**6**0 mm	**H**olzkirchen	**N**ormal	M1.06.HN
			Hoch	M1.06.HH
		Fichtelberg	Normal	M1.06.FN
			Hoch	M1.06.FH
	80 mm	**H**olzkirchen	Normal	M1.08.HN
			Hoch	M1.08.HH
		Fichtelberg	Normal	M1.08.FN
			Hoch	M1.08.FH
	100 mm	**H**olzkirchen	Normal	M1.10.HN
			Hoch	M1.10.HH
		Fichtelberg	Normal	M1.10.FN
			Hoch	M1.10.FH
Material 2	**6**0 mm	**H**olzkirchen	Normal	M2.06.HN
			Hoch	M2.06.HH
		Fichtelberg	Normal	M2.06.FN
			Hoch	M2.06.FH
	80 mm	**H**olzkirchen	Normal	M2.08.HN
			Hoch	M2.08.HH
		Fichtelberg	Normal	M2.08.FN
			Hoch	M2.08.FH
	100 mm	**H**olzkirchen	Normal	M2.10.HN
			Hoch	M2.10.HH
		Fichtelberg	Normal	M2.10.FN
			Hoch	M2.10.FH
Material 3	**6**0 mm	**H**olzkirchen	Normal	M3.06.HN
			Hoch	M3.06.HH
		Fichtelberg	Normal	M3.06.FN
			Hoch	M3.06.FH
	80 mm	**H**olzkirchen	Normal	M3.08.HN
			Hoch	M3.08.HH
		Fichtelberg	Normal	M3.08.FN
			Hoch	M3.08.FH
	100 mm	**H**olzkirchen	Normal	M3.10.HN
			Hoch	M3.10.HH
		Fichtelberg	Normal	M3.10.FN
			Hoch	M3.10.FH

2.2.3 Untersuchungen zu baupraktischen Feuchtegehalten

Die oben beschriebenen Varianten werden nun hinsichtlich ihrer relativen Feuchtegehalte sowie ihres Wassergehalts ausgewertet.

2.2.3.1 Auswertung der relativen Feuchtegehalte

Zur übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse werden die einzelnen Varianten in Form von Boxplots in Tab. 2-12 ausgewertet. Betrachtet wird jeweils die Heizperiode (1. Oktober bis 1. April) des fünften Simulationsjahres. Zu sehen sind für die verschiedenen Materialien und Materialstärken jeweils die Varianten „Holzkirchen Normal“ in Orange, „Holzkirchen Hoch“ in Blau, „Fichtelberg Normal“ in Grau sowie „Fichtelberg Hoch“ in Rot. Für jede Variante ist zum einen die Auswertung der kritischen Schicht, welche der Kaltseite der Dämmung, also Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandsputz entspricht, mit der Endung „k“ dargestellt (höherer Wert). Der niedrigere Wert entspricht der relativen Feuchte gemittelt über die gesamte Dämmschicht (Endung „m“). Der Einfluss von inneren Feuchtelasten, Standort, Dämmstoffdicke sowie der verschiedenen Materialien auf die Feuchtegehalte soll im Folgenden kurz beschrieben werden.

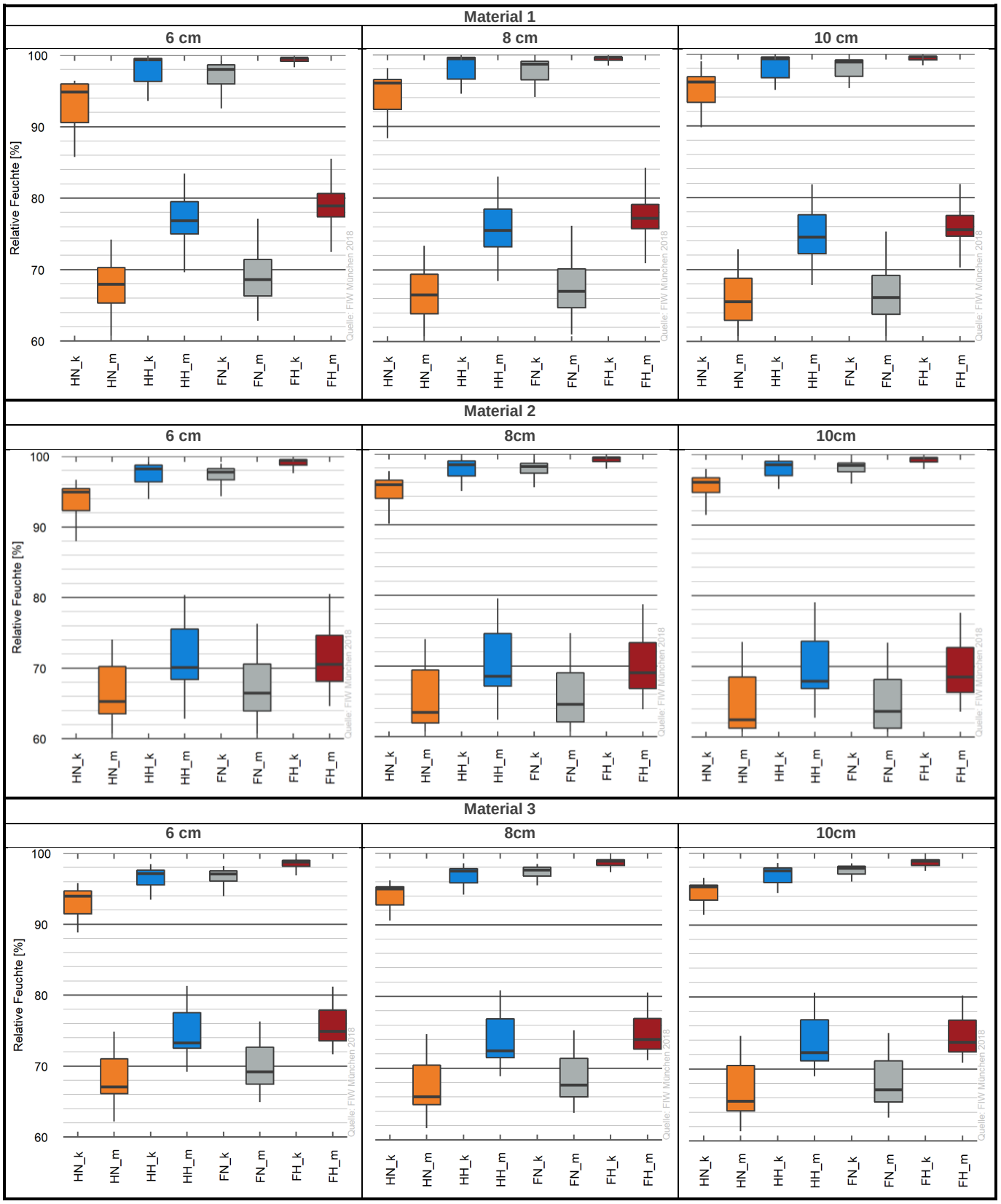
Es ist gut zu erkennen, dass eine Erhöhung der inneren Feuchtelasten in allen Fällen auch eine deutliche Erhöhung der relativen Feuchte in der kritischen Schicht sowie im Mittel in der gesamten Dämmschicht mit sich bringt. Auch ein „kritischeres“ Außenklima (hier Fichtelberg gegenüber Holzkirchen) führt zu einem Feuchteanstieg in der Dämmung. Es ist jedoch zu erkennen, dass das System empfindlicher auf erhöhte Feuchtelasten auf der Innenseite als auf der Außenseite reagiert, was dem zu erwartenden Verhalten bei Innendämmungen entspricht. Dieser Effekt ist vor allem zu erkennen, wenn man die mittlere relative Feuchte über die gesamte Dämmstoffschicht betrachtet: Hier führt der Vergleich zwischen den Standorten Fichtelberg und Holzkirchen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. In der kritischen Schicht an der Außenseite der Innendämmung tritt dieser Effekt jedoch weniger deutlich auf.

Eine Erhöhung der Dämmstoffdicke hat geringeren Einfluss auf die Höhe der relativen Feuchte sowohl in der kritischen Schicht als auch im Mittel über die gesamte Dämmung. Jedoch steigt der Feuchtegehalt in der kritischen Schicht mit steigender Dämmstoffdicke leicht an, während er im Mittel leicht fällt.

Im Vergleich weisen die drei untersuchten Materialien ein recht ähnliches Verhalten gegenüber Feuchteeinflüssen auf. Es ist lediglich zu erkennen, dass die Schwankungsbreite der relativen Feuchte im Mittel über die gesamte Dämmschicht bei Material 2 (Holzfaser Trockenverfahren) etwas höher ist als bei Material 3 (Holzfaser Nassverfahren) und Material 1 (mineralische Dämmplatte). Für Material 1 liegt der Median der relativen Feuchte über die gesamte Dämmschicht zwischen 65 – 77 % relativer Feuchte, für Material 2 zwischen 63 – 71 % und für Material 3 zwischen 65 – 74 %. Material 1 reagiert hierbei am empfindlichsten auf erhöhte innere Feuchtelasten, hier steigt der Median der relativen Feuchte in allen Fällen auf deutlich über 70 % an.

Für fast alle Varianten gilt, dass während der Heizperiode in der kritischen Schicht relative Feuchten von über 95 % vorherrschend sind. Der Median liegt hier für alle Varianten bei über 95 % und kann bei besonders kritischen Varianten auf über 99 % steigen. Für die kritische Schicht ist zu erkennen, dass die Schwankungsweiten für Material 1 am höchsten sind, gefolgt von Material 3 und Material 2.

Tab. 2-12: Auswertung der Feuchtegehalte in der Dämmschicht für die verschiedenen Materialien und Dämmstärken: In der kritischen Schicht („_k“) sowie im Mittel über die gesamte Dämmschicht („_m“). Fall „HN“ in Orange, „HH“ in Blau, „FN“ in Grau und „FH“ in Rot.



2.2.3.2 Auswertung des Wassergehalts

Um einen besseren Eindruck über die jahreszeitliche relative Feuchteverteilung in jedem Zentimeter Dämmstoff zu gewinnen, sind diese in Abb. 2-13 noch einmal für die Varianten mit 8 cm Dämmung in Holzkirchen für alle drei Materialien dargestellt. Dabei steht „Pos1“ für den ersten Zentimeter Dämmstoff auf der Kaltseite der Dämmung und daher für die kritische Schicht. „Pos8“ folglich steht für den 8. Zentimeter auf der Warmseite der Dämmung. Dazwischen wird die Feuchteverteilung in ein Zentimeter breiten Dämmstoff-Streifen betrachtet. „Mean“ steht für den mittleren Feuchtgehalt über die gesamte Dämmschicht.

Die folgenden Überlegungen gelten grundsätzlich in verstärkter Form auch für die hier nicht abgebildeten Varianten am Extremstandort Fichtelberg. Sie gelten ebenfalls für unterschiedliche Dämmstoffdicken, wobei sie bei 6 cm in abgeschwächter Form, bei 10 cm in stärkerer Form auftreten. In der Auffeuchtungsphase (1. Oktober bis 1. April) ist grundsätzlich zu erkennen, dass der Wassergehalt der Dämmung auf der Warmseite entweder recht konstant bleibt (M1) oder sinkt (M2, M3). Auf der Kaltseite der Dämmung steigt der Wassergehalt in allen Fällen an, jedoch je nach Material und Feuchtelasten unterschiedlich stark.

So verhält sich Material 1 bei normaler innerer Feuchtelast unproblematisch, der Wassergehalt liegt ganzjährig im Bereich von 5 kg/m³ (6 M.-%) und steigt nur im kritischen Zentimeter auf der Kaltseite im Winter auf weniger als 8 kg/m³ (9 M.-%). Jedoch reagiert M1 empfindlich auf eine Erhöhung der inneren Feuchtelasten: Zwar verbleibt der Wassergehalt auf der Warmseite der Dämmung ganzjährig bei etwa 5 kg/m³ (6 M.-%), steigt im ersten Zentimeter auf der Kaltseite im Winter jedoch auf bis zu über 50 kg/m³ (56 M.-%) und im zweiten Zentimeter auf 17 kg/m³ (19 M.-%). Jedoch trocknen diese hohen Wassergehalte ab Anfang April wieder sehr schnell ab, sodass die Werte bereits nach wenigen Wochen wieder im Bereich des Zustands vor der Auffeuchtungsphase (unter 8 kg/m³) liegen. Insgesamt liegen die Feuchtegehalte auf der gesamten Warmseite bis weit in die Dämmung hinein in einem sehr gleichmäßigen, niedrigen Bereich. Ein deutlicher Anstieg der Wassergehalte ist nur im ersten Zentimeter (normale Feuchtelasten) bzw. in den ersten zwei Zentimetern (hohe Feuchtelasten) auf der Kaltseite zu erkennen.

Material 2 weist eine etwas ausgeprägtere Feuchteverteilung auf als Material 1. Eine mit jedem Zentimeter größer werdende Auffeuchtung, die mit zunehmendem Abstand von der Warmseite immer deutlicher wird, findet hier über die Dämmstoffschicht statt. Bei normalen Feuchtelasten liegt der Wassergehalt auf der Warmseite zwischen rund 7 kg/m³ (ca. 6 M.-%) im Winter und 11 kg/m³ (ca. 10 M.-%) im Sommer. Auf der Kaltseite ist eine nur sehr geringe Auffeuchtung im Winter zu erkennen. Hier liegt der Wassergehalt das gesamte Jahr über im Bereich zwischen 16 – 18 kg/m³ (15 – 16 M.-%). Bei hohen Feuchtelasten verändern sich die Wassergehalte auf der Warmseite kaum gegenüber der Variante mit normalen Feuchtelasten. Jedoch findet zur Kaltseite hin eine ausgeprägtere Auffeuchtung statt. Im kritischen Zentimeter ist der Anstieg der Feuchte bei hohen inneren Feuchtelasten im Winter deutlich ausgeprägter. Über das Jahr liegt die Feuchte im Sommer bei rund 20 kg/m³ (18 M.-%) und in der Spitze im Winter bei bis zu 26 kg/m³ (24 M.-%). Eine Austrocknung im Sommer zum Ausgangszustand wird weit vor Beginn der nächsten Auffeuchtungsphase erreicht.

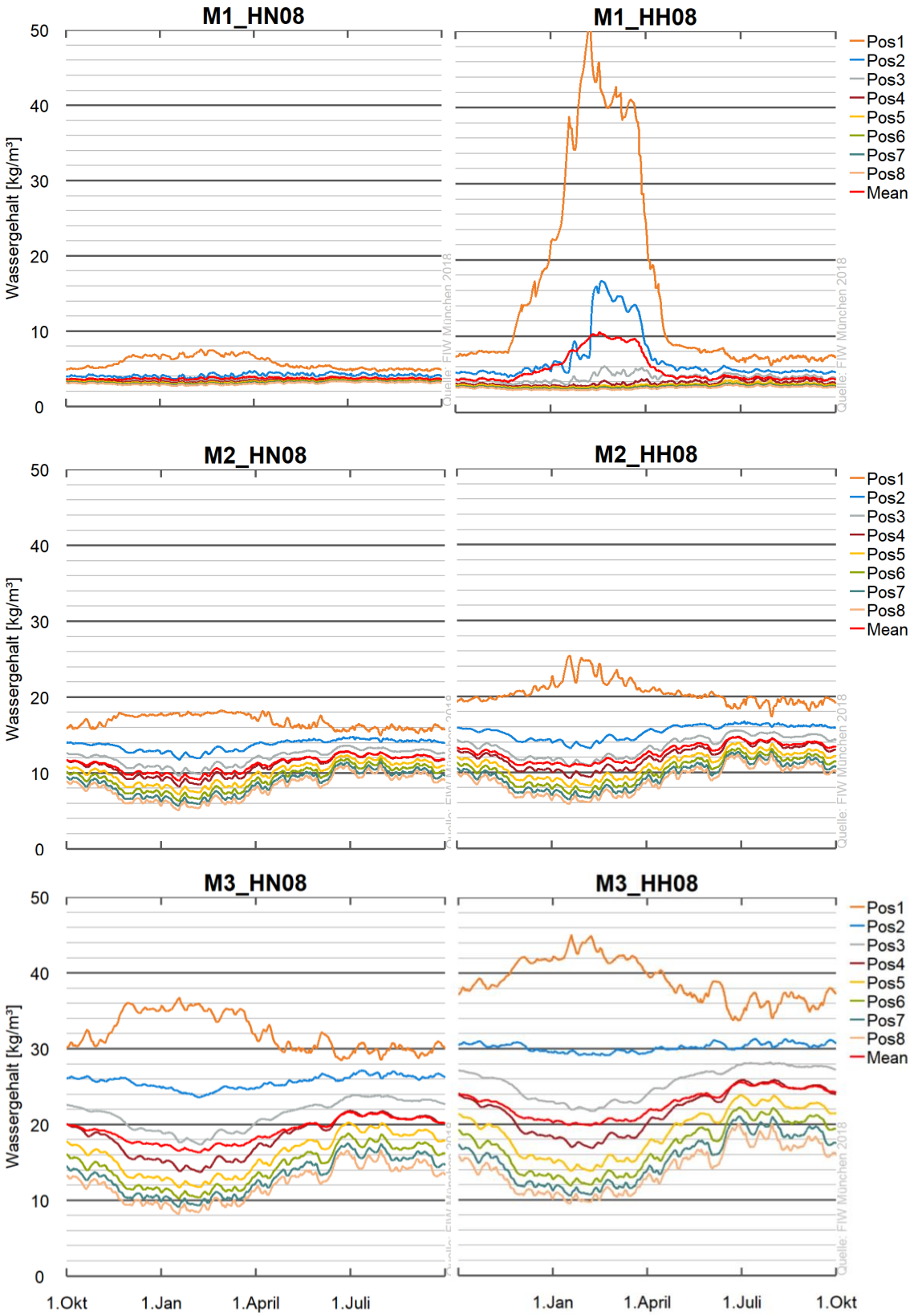


Abb. 2-13: Wassergehalt [kg/m³] im Jahresverlauf in jedem Zentimeter Dämmschicht am Standort Holzkirchen bei 8 cm Dämmstärke für alle drei Materialien; Pos1 = Erster Zentimeter der Dämmung, Kaltseite; Pos 8 = Achter Zentimeter Dämmung, Warmseite; Mean = Mittelwert über die gesamte Dämmstoffschicht; Links: Normale innere Feuchtelast; Rechts: Hohe innere Feuchtelast.

Material 3 weist insgesamt höhere Wassergehalte auf, als Material 2, jedoch ist hier derselbe Effekt der kontinuierlich verstärkten Auffeuchtung von der Warmseite zur Kaltseite hin zu beobachten. Auf der Warmseite schwanken die Werte bei normalen Feuchtelasten zwischen minimal 8 kg/m³ (5 M.-%) im Winter und maximal 16 kg/m³ (10 M.-%) im Sommer. Auf der Kaltseite findet eine deutliche Auffeuchtung im Winter statt, hier steigen die Werte auf bis zu rund 37 kg/m³ (23 M.-%). Jedoch sind hier die Feuchtegehalte auch im Sommer mit rund 30 kg/m³ (19 M.-%) bereits recht hoch. Ein ähnliches, jedoch ausgeprägteres Verhalten weist Material 3 mit hohen Feuchtelasten auf. Hier liegt der Wassergehalt auf der Warmseite zwischen minimal 10 kg/m³ (6 M.-%) im Winter und maximal 20 kg/m³ (13 M.-%) im Sommer. Bei der Auffeuchtung auf der Kaltseite im Winter wird ein Wassergehalt von bis zu 45 kg/m³ (28 M.-%) erreicht. Auch im Sommer liegen die Werte nie niedriger als 34 kg/m³ (21 M.-%). An dieser Stelle soll erwähnt werde, dass dauerhafte Materialfeuchtewerte über 20 M-% ein hohes Schimmelpilzrisiko mit sich bringen. In der Praxis sollte diese Variante also in jedem Fall hinsichtlich ihres Schimmelpilzwachstums untersucht werden. Da die Bewertung von verschiedenen möglichen Schadensmechanismen in einem anderen Teil dieses Berichts tiefreichend behandelt wird, wird an dieser Stelle darauf verzichtet. Für Material 3 ist jedoch zusätzlich zu erkennen, dass wie schon bei den beiden zuvor beschriebenen Materialien im Sommer eine Austrocknung auf dasselbe – wenn auch trotzdem hohe – Niveau wie vor der Auffeuchtungsphase stattfindet.

Somit ist mit einer kontinuierlichen Auffeuchtung der drei untersuchten Materialien über die Jahre nicht zu rechnen. Zusätzlich heißt es im WUFI® Leitfaden zur Tauwasserbewertung, dass im Kapillarwasserbereich zwischen 95 – 100 % relativer Feuchte zwar bereits flüssiges Wasser in den Porenräumen vorhanden ist, dieses jedoch durch die Kapillarkräfte in der Pore gebunden wird. Flüssiges, ungebundenes „Tauwasser“ kann im engeren Sinne erst dann ausfallen, wenn die freie Sättigung eines Stoffs erreicht ist. Die freie Wassersättigung der hier betrachteten Materialien liegt deutlich höher, als die maximal in Abb. 2-13 erreichten Wassergehalte, nämlich bei 241 kg/m³ für M1, 275 kg/m³ für M2 und gar 400 kg/m³ für M3. Mit freiem, ungebundenem Tauwasser ist somit in keiner der Varianten zu rechnen.

Obwohl eine weitere Bewertung der Wassergehalte bzw. des Schadensrisikos nicht Teil dieser Untersuchungen ist, haben die erhöhten Wassergehalte auf der Kaltseite der Dämmung im Winter jedoch ohne Zweifel Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Dämmmaterialien. Dieser Einfluss soll im folgenden Kapitel weiter diskutiert und quantifiziert werden.

2.2.4 Quantifizierung des Feuchteeinflusses auf die Wärmeleitfähigkeit

In Abb. 2-14 ist die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehalts des jeweiligen Materials dargestellt, wie er in den produktspezifischen Datensätzen angegeben wurde. Für Material 1 (Orange) wurden hierbei Werte bei einem Wassergehalt von 0, 1,2, 2,4 und 962 kg/m³ angegeben, aus denen sich ein beinahe vollständig linearer Zusammenhang ergibt. Für die Materialien 2 (Blau) und 3 (Grau) wurde gemäß Herstellerangaben ein materialspezifischer Wärmeleitfähigkeitszuschlag für Feuchte (b) von 0,5 %/M.-% angenommen. Der Maximalwert des Wassergehalts für alle drei Materialien entspricht dem

völlig untergetauchten Zustand, in dem alle Porenräume vollständig mit Wasser gefüllt sind. Er ist abhängig von der Porosität des Materials und entspricht für Material 1 962 kg/m³, für Material 2 927 kg/m³ und für Material 3 893 kg/m³. Insgesamt weist Material 1 hierbei eine deutlich höhere Abhängigkeit vom Wassergehalt auf, als Material 2 und 3. Bei vollständigem Untertauchen entspricht hier die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs beinahe der Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasser (0,60 W/mK), was dem zu erwartenden Verhalten entspricht.

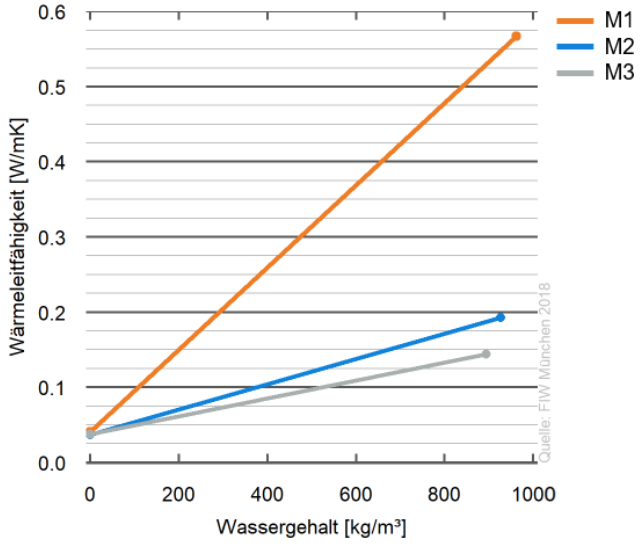


Abb. 2-14: Wärmeleitfähigkeit der drei Materialien in Abhängigkeit des Feuchtegehalts von trockenem Zustand bis zum völligen Untertauchen.

Bei den beiden Holzfaserdämmplatten wird dieses Verhalten selbst bei völligem Untertauchen nicht unterstellt. Die Wärmeleitfähigkeit liegt hier nicht höher als 0,15 bzw. 0,20 W/mK. Da auch hier bei einem maximalen Wassergehalt mit einer Wärmeleitfähigkeit nahe der von Wasser zu rechnen ist, ist der Feuchtezuschlag von b = 0,5 %/M.-% bzw. der vollkommen lineare Verlauf der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit im Bereich vom völlig trockenen bis zum völlig durchnässten Zustand zu hinterfragen. Um eine realistische Wärmeleitfähigkeit von knapp unter 0,6 W/mK bei vollkommenem Untertauchen zu erhalten, ist entweder eine Erhöhung des linearen Feuchtezuschlags denkbar, oder aber die Annahme der Nichtlinearität des Verlaufs. Beide Fälle sollen im Folgenden untersucht werden. Hierdurch kann unter anderem veranschaulicht werden, wie die Wahl des Feuchtezuschlagfaktors das Gesamtergebnis beeinflussen kann.

Zunächst wird daher für die Materialien 2 und 3 neben den im Herstellerdatensatz angegeben 0,5 %/M.-% auch noch ein Feuchtezuschlag von 0,8 %/M.-% (errechnet aus den Angaben zum Ausgleichsfeuchtegehalt und den Umrechnungsfaktoren in DIN 4108-4:2017) sowie von 1,5 %/M.-% (Beispielzuschlag für Holzmaterialien in der WUFI-Hilfe) untersucht. Zusätzlich wird anschließend von einem nicht-linearen Verlauf des Feuchtezuschlagfaktors ausgegangen. Denkbar ist zum Beispiel, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Feuchte überproportional zunimmt. Dieses Verhalten wird nachgebildet, indem nur bis zur relativen Feuchte von 80 % der in den Herstellerdatensätzen angegebene Zuschlag von 0,5 %/M.-% angesetzt wird. Für höhere Feuchten wird durch Interpolation der Feuchtezuschlag jeweils so angesetzt, dass bei

vollständigem Untertauchen die Wärmeleitfähigkeit von Wasser erreicht wird. Folglich entsteht ein „Knick“ bei 80 % relativer Feuchte. Dieser Wert wurde gewählt, da auch die Feuchtezuschläge in den einschlägigen Normen (ISO 10456, DIN 4108-4) für den Bereich bis maximal 80 % relativer Feuchte angegeben werden.

Im Folgenden wird nun für alle drei Materialien dargestellt, wie hoch der Feuchteeinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit bzw. auf den Wärmedurchgangswiderstand der Dämmschicht ist. Im Falle der Wärmeleitfähigkeit wird deren jährlicher Verlauf in der kritischen Schicht auf der Kaltseite für alle Varianten dargestellt, da hier mit den bei weitem höchsten Feuchtelasten zu rechnen ist. Um den Einfluss auf die Gesamtperformance der Dämmung abschätzen zu können, wird anschließend der Wärmedurchlasswiderstand der gesamten Dämmschicht während der Heizperiode (1. Oktober bis 1. April) errechnet. Hierbei wird der Feuchtegehalt und die daraus resultierende Wärmeleitfähigkeit in jedem Zentimeter der Dämmschicht berücksichtigt.

In Deutschland ist es üblich, die Wärmeleitfähigkeit und daher auch den Wärmedurchlasswiderstand eines Materials bei einem Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23 °C und 80 % relativer Feuchte anzugeben. Daher werden die hier bestimmten Ergebnisse neben dem Trockenwert auch mit dem Wert für 23/80 verglichen.

2.2.4.1 Material 1 – Mineralische Dämmplatte

In Abb. 2-15 ist die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts für die kritische Schicht in den unterschiedlichen Varianten für Material 1 dargestellt. Zusätzlich ist als hellrote Linie der Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit (0,041 W/mK) sowie als dunkelrote Linie die Wärmeleitfähigkeit bei einer relativen Feuchte von 80 % (0,043 W/mK) dargestellt. Im linken Teil der Abbildung sind die Varianten am Standort Holzkirchen, im rechten Teil am Standort Fichtelberg zu erkennen.

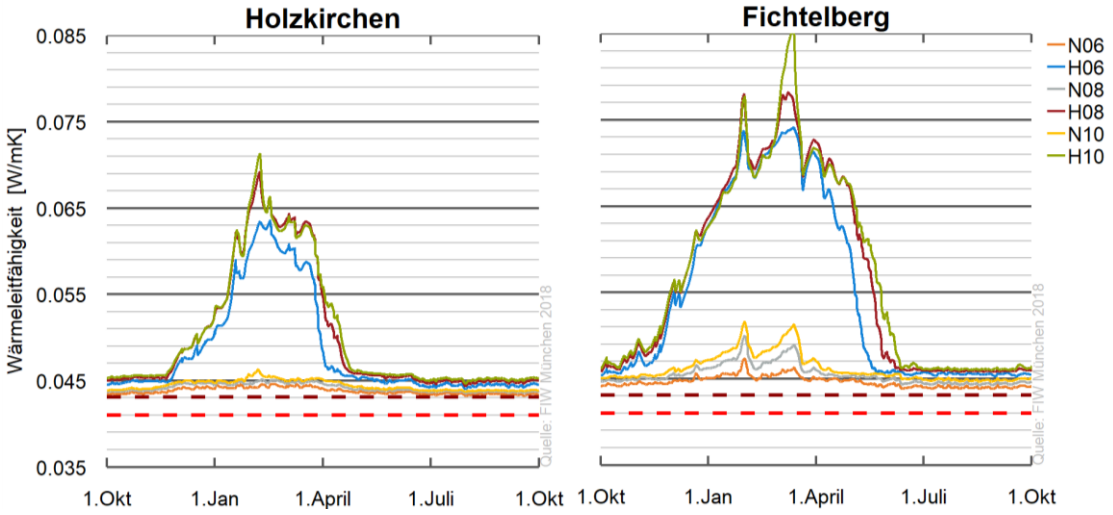


Abb. 2-15: Wärmeleitfähigkeit von Material 1 in Abhängigkeit des Feuchtegehalts im Jahresverlauf in der kritischen Dämmstoffschicht (Kaltseite) sowie Wärmeleitfähigkeit trocken (hellrote Linie) und Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. (dunkelrote Linie).

Für Material 1 ist an beiden Standorten gut zu erkennen, dass eine klare Unterscheidung der Varianten mit normalen inneren Feuchtelasten und der mit hohen inneren Feuchtelasten

getroffen werden muss. Am Standort Holzkirchen verbleibt die Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht bei normalen inneren Feuchtelasten ganzjährig nur knapp über dem Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte. Auch am Standort Fichtelberg findet bei diesen Varianten nur eine kurzzeitige Erhöhung auf rund 0,05 W/mK statt. Bei hohen inneren Feuchtelasten hingegen erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit der kritischen Schicht sehr viel deutlicher und erreicht am Standort Holzkirchen Werte von bis zu 0,07 W/mK und am Standort Fichtelberg von um die 0,08 W/mK. Auch ist am Standort Fichtelberg die Wärmeleitfähigkeit deutlich länger erhöht, als am Standort Holzkirchen. Hier dauert die Austrocknung der Konstruktion im Sommer bis Ende Juni an, während sie in Holzkirchen schon im April bis Mai abgeschlossen ist. Ein geringer Einfluss der Dämmstoffdicke ist ebenfalls erkennbar: So steigt die Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht mit zunehmender Dämmstoffdicke im Winter vermehrt an.

Abb. 2-16 stellt dar, wie sich diese Überlegungen auf die wärmedämmenden Eigenschaften der gesamten Dämmstoffschicht auswirken. Hierzu wurde der R-Wert von Material 1 für die verschiedenen untersuchten Dicken sowohl im trockenen Zustand (Orange) und bei 80 % relativer Feuchte (Blau) als auch für die unterschiedlichen Varianten berechnet. Hierfür wurde die durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts in jedem Zentimeter Dämmstoff während der Heizperiode verwendet. Zusätzlich ist dargestellt, wie groß die prozentuale Abweichung der einzelnen Varianten vom Referenzwert bei 80 % r.F. ist.

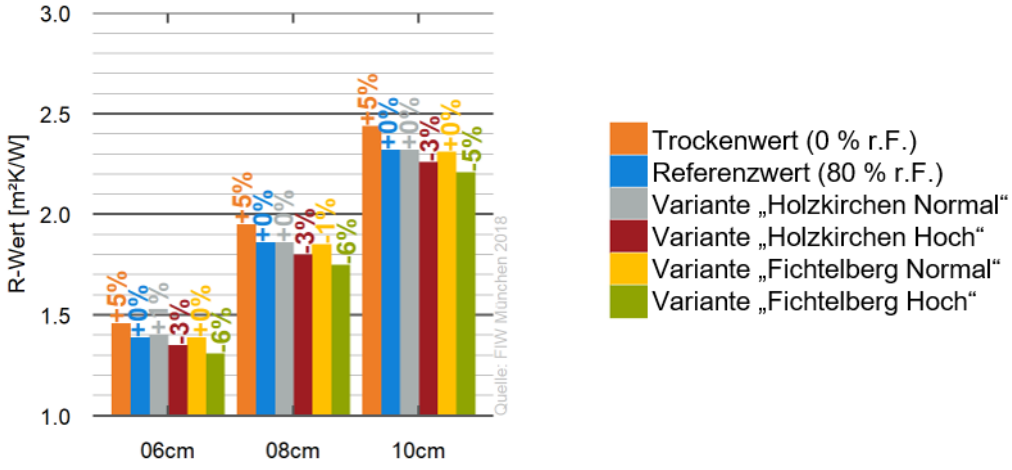


Abb. 2-16: R-Wert [m²K/W] der gesamten Dämmstoffschicht für Material 1 sowie prozentuale Änderung der Varianten gegenüber dem Referenzwert (80 % r.F.).

Wie zu erkennen ist, hat prozentual betrachtet die Dicke der Dämmstoffschicht kaum einen Einfluss auf die Änderung des R-Werts. Zwar konnte bei höheren Schichtdicken eine höhere Wärmeleitfähigkeit in der kritischen, äußeren Schicht beobachtet werden, jedoch wird gleichzeitig die Wärmeleitfähigkeit auf der Innenseite hier aufgrund des geringeren Wassergehaltes ebenfalls etwas geringer. Diese beiden Effekte scheinen sich auf die gesamte Dämmschicht betrachtet die Waage zu halten.

Insgesamt liegt der Referenzwert bei 80 % r.F. für alle betrachteten Dicken 5 % unterhalb des Trockenwerts. Der Referenzwert ist bei allen Schichtdicken und an beiden Standorten gut geeignet, um die Varianten mit normalen inneren Feuchtelasten abzubilden. Erst bei hohen

inneren Feuchtelasten nimmt der R-Wert der Varianten deutlicher gegenüber dem Referenzwert ab (5 – 6 %). In diesen Fällen ist davon auszugehen, dass der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte in der gesamten Dämmstoffschicht die reale Situation nicht ausreichend kritisch darstellt. Die Reduzierung der Dämmleistung könnte hier zu merklich erhöhten Energieverlusten führen.

2.2.4.2 Material 2 – Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren

Auch für Material 2 wurde die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht untersucht, siehe Abb. 2-17. Wie bereits erwähnt wurden hierbei zunächst verschiedene lineare Feuchtzuschlagsfaktoren (b) verwendet, nämlich 0,5 %/M.-%, 0,8 %/M.-% und 1,5 %/M.-%. Für den nicht-linearen Fall mit „Knick“ bei 80 % relativer Feuchte wurde für Feuchten über 80 % ein Zuschlag von 1,7 %/M.-% ermittelt, um bei maximalem Wassergehalt eine Wärmeleitfähigkeit zu erlangen, die im Bereich der Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasser liegt. Aufgrund der Variationen des Feuchtezuschlags ist es möglich darzustellen, wie sensibel die Ergebnisse auf die Wahl dieses Faktors reagieren.

Der Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit von Material 2 liegt bei 0,037 W/mK. Naturgemäß ändert sich der Referenzwert der Wärmeleitfähigkeit bei 80 % relativer Feuchte je nach Wahl des Feuchtezuschlagfaktors, siehe Tab. 2-13 bzw. dunkelrote Linie in Abb. 2-17. Wie bereits diskutiert sollte die Wärmeleitfähigkeit bei maximalem Wassergehalt u_{max} im Bereich der Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasser bei 0,60 W/mK liegen, da dies dem völlig untergetauchten Zustand entspricht. Welche Wärmeleitfähigkeit bei maximalem Wassergehalt bei unterschiedlichen Feuchtezuschlagsfaktoren erreicht wird, ist ebenfalls in Tab. 2-13 dargestellt. Sowohl für b = 0,5 %/M.-% als auch für b = 0,8 %/M.-% liegt die Wärmeleitfähigkeit bei vollkommener Durchnässung weit entfernt von der Wärmeleitfähigkeit von Wasser. Erst bei einem Feuchtezuschlag von 1,5 %/M.-% wird zumindest eine Wärmeleitfähigkeit von über 0,5 W/mK erreicht. Für den nicht-linearen Fall wurde der Zuschlag so errechnet, dass der Wert von 0,6 W/mK genau erreicht wird.

Tab. 2-13: Simulierter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Material 2 für die verschiedenen Feuchtezuschläge bei 80 % relativer Feuchte (u_{80}) sowie bei maximalem Wassergehalt (u_{max}).

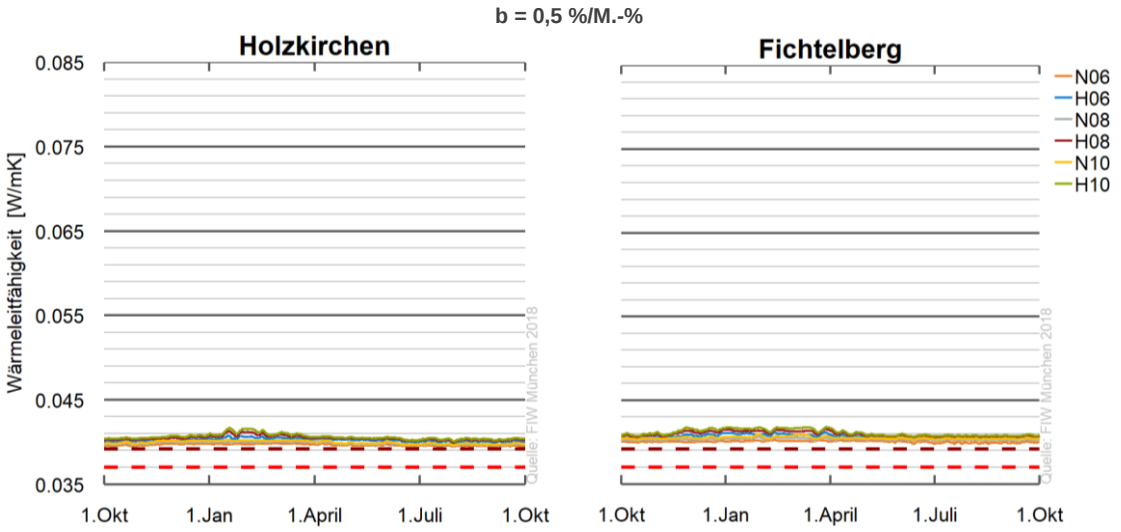
b [%/M.-%]	**$\lambda_{Trocken}$ [W/mK]**	**λ_{U80} [W/mK]**	**λ_{Umax} [W/mK]**
0,5	0,037	0,039	0,193
0,8	0,037	0,041	0,286
1,5	0,037	0,044	0,505
0,5 bis 80 % r.F. 1,7 ab 80% r.F.	0,037	0,039	0,60

In Abb. 2-17 ist zu erkennen, dass für die Fälle mit linearem Feuchtezuschlagsfaktor die Wärmeleitfähigkeit von Material 2 grundsätzlich eine geringere Abhängigkeit vom Feuchtegehalt aufweist, als Material 1. Auch fallen weder die Höhe der inneren Feuchtelasten, noch die Dicke der Dämmstoffschicht allzu sehr ins Gewicht. Jedoch nimmt ihr Einfluss mit zunehmendem linearen Feuchtezuschlagsfaktor zu. Die unterschiedlichen Standorte führen in der Spitze bei

gleichem Feuchtezuschlagsfaktor nicht zu unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten. Jedoch werden am Standort Fichtelberg die erhöhten Werte über einen längeren Zeitraum erreicht, als am Standort Holzkirchen. Die Abtrocknung der Feuchte im Sommer geht hier langsamer vonstatten.

So ähnelt sich der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht für alle Varianten mit einem Feuchtezuschlagsfaktor von b = 0,5 %/M.-% sehr. Die Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht liegt ganzjährig nur knapp über dem Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte und übersteigt einen Wert von 0,043 W/mK nicht. Für b = 0,8 %/M.-% werden Wärmeleitfähigkeit von bis zu rund 0,045 W/mK erreicht. Es ist zu erkennen, dass die Varianten mit höheren Feuchtelasten und höheren Schichtdicken auch zu leicht erhöhten Wärmeleitfähigkeiten führen. Dieser Effekt verstärkt sich für b = 1,5 %/M.-% noch einmal. Auch liegen hier die Wärmeleitfähigkeiten etwas deutlicher über dem Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte und erreichen Werte von ca. 0,051 W/(m K).

Für den nicht-linearen Fall mit einem Feuchtezuschlag von 1,7 %/M.-% ab 80 % relativer Feuchte ist für beide Standorte ein ähnliches bzw. leicht verstärktes Verhalten zu erkennen, wie für den linearen Fall mit Feuchtezuschlag von 1,5 %/M.-%. In den Spitzen erreichen hier die Fälle mit hohen inneren Feuchtelasten Wärmeleitfähigkeiten von rund 0,049 W/(m K). Wie in den linearen Fällen sind die Spitzen am Standort Fichtelberg nicht deutlich höher als die am Standort Holzkirchen, werden jedoch über längere Zeiträume erreicht. Für die Fälle mit normalen inneren Feuchtelasten ist über das Jahr hinweg ein deutlich konstanterer Verlauf der Wärmeleitfähigkeiten zu erkennen. Nur für den Fall mit 10 cm Dämmung am Standort Fichtelberg werden hier kurzzeitig Werte von über 0,045 W/(m K) erreicht. Für alle Fälle mit nicht- linearem Feuchtezuschlagsfaktor ist zu erkennen, dass die Feuchtigkeit im Sommer wieder so gut austrocknen kann, dass sie vor dem nächsten Winter wieder auf das Ausgangsniveau von 0,045 W/(m K) oder weniger gesunken sind.



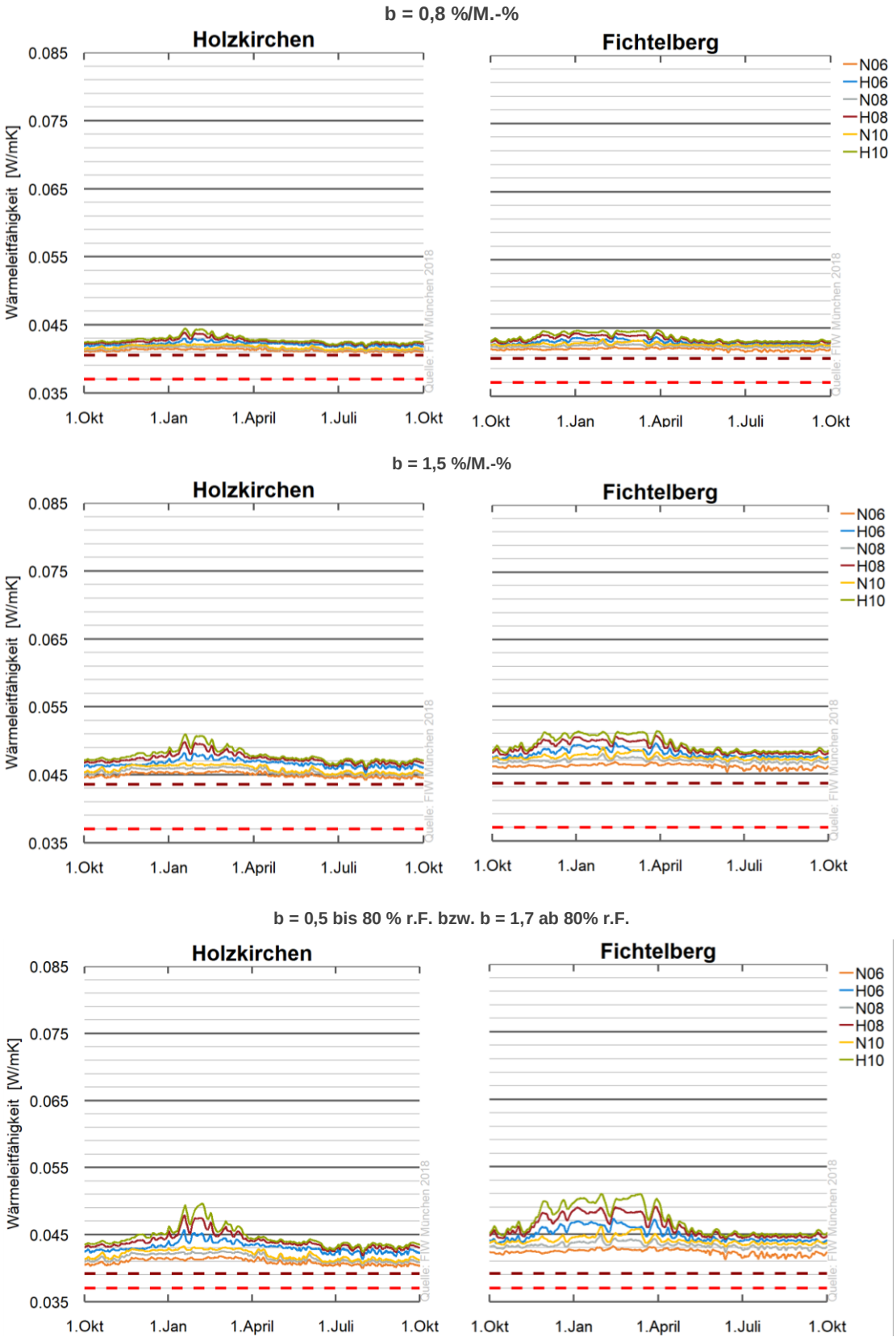


Abb. 2-17: Wärmeleitfähigkeit von Material 2 in Abhängigkeit des Feuchtegehalts im Jahresverlauf in der kritischen Dämmstoffschicht (Kaltseite) sowie Wärmeleitfähigkeit trocken (hellrote Linie) und Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. (dunkelrote Linie)

Der Einfluss der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit auf den R-Wert von Material 2 ist in Abb. 2-18 für die drei gewählten Feuchtezuschlagsfaktoren sowie für den nicht-linearen Fall dargestellt. Bei den linearen Fällen beeinflusst der Feuchtezuschlag vor allem, um wie viel niedriger der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte gegenüber dem Trockenwert ist. Für alle hier dargestellten linearen Varianten liegt der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte auf der sicheren Seite, da der R-Wert der Varianten genauso hoch oder höher liegt, als der des Referenzfalls. Mit steigendem Feuchtezuschlag ist zu erkennen, dass der R-Wert der verschiedenen untersuchten Varianten zunehmend höher wird, als der des Referenzfalls.

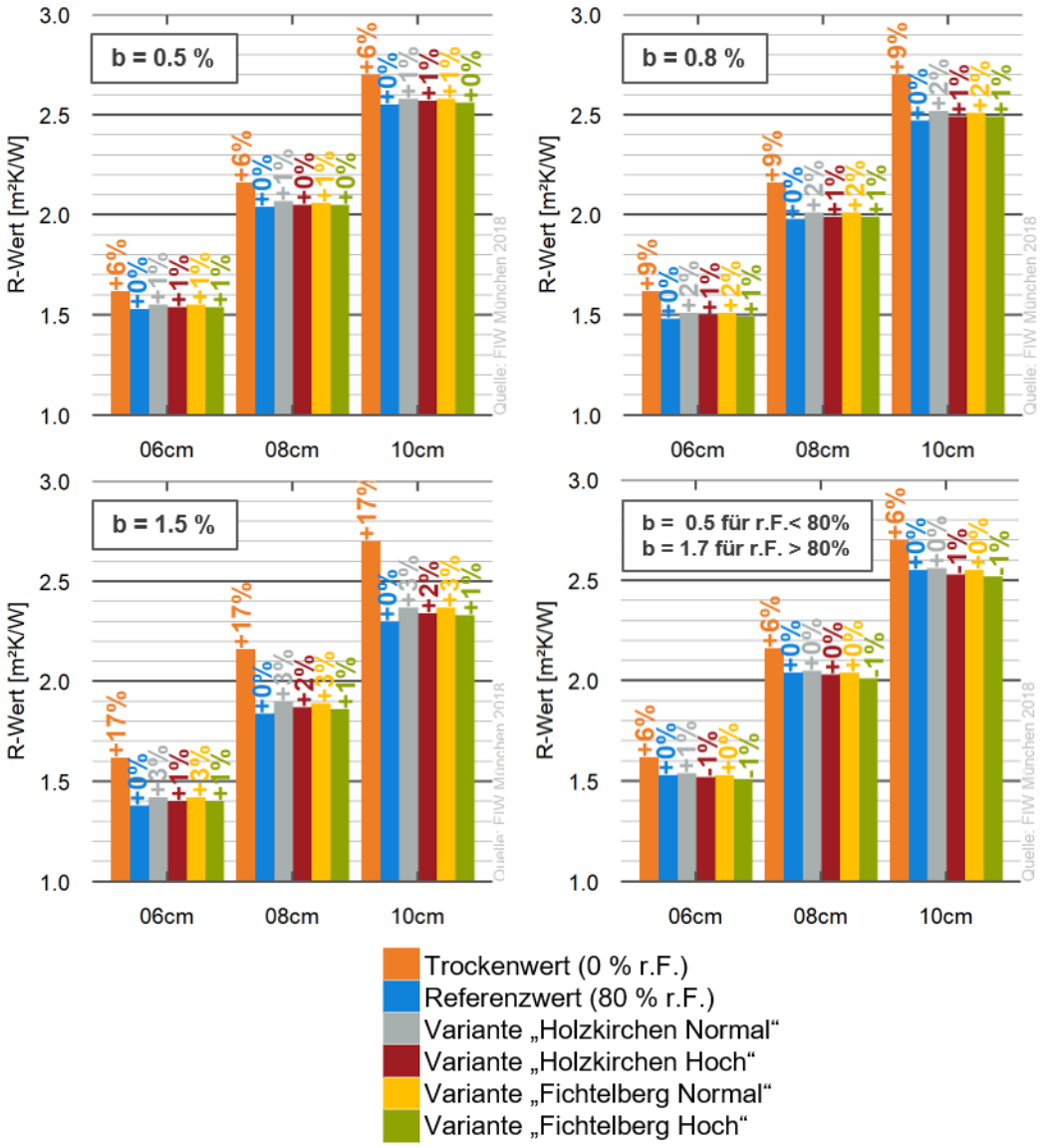


Abb. 2-18: R-Wert [m²K/W] der gesamten Dämmstoffschicht für Material 2 sowie prozentuale Änderung der Varianten gegenüber dem Referenzwert (80 % r.F.) für unterschiedliche Feuchtezuschläge (b).

Verwendet man statt eines Feuchtezuschlagfaktors von 0,5 %/M.-% einen von 0,8 %/M.-%, so bringt das eine Verringerung des R-Werts im Bereich von 0,05 bis 0,1 m²K/W mit sich und ein Feuchtezuschlagsfaktor von 1,5 %/M.-% gar eine Verringerung von 0,15 bis 0,3 m²K/W. Dieser Effekt wird mit zunehmender Dicke der Dämmstoffschicht deutlicher. Insgesamt lässt sich daraus schließen, dass die Wahl des linearen Feuchtezuschlagfaktors die Ergebnisse energetischer Berechnungen für dieses Material durchaus beeinflussen kann.

Der Fall mit nicht-linearem Feuchtezuschlag (Abb. 2-18 unten rechts) zeigt, dass der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte (Berechnung mit Feuchtezuschlag von 0,5 %/M.-%) sich gut eignet, um die Varianten mit normalen inneren Feuchtelasten abzubilden. Dies ist der Fall, obwohl hier in den kritischen Schichten z.T. mit einem deutlich höheren Feuchtezuschlag von 1,7 %/M.-% gerechnet wurde. Auch für den extremsten Fall mit hohen inneren Feuchtelasten am Standort Fichtelberg liegt der R-Wert der simulierten Varianten nur unwesentlich niedriger, als die der Referenzwert.

Grundsätzlich wird die Wärmeleitfähigkeit bei 80 % relativer Feuchte für dieses Material als gut geeignet eingestuft, um den Effekt der Feuchteabhängigkeit auf die wärmedämmenden Eigenschaften hinreichend abzubilden, sofern von einem linearen Feuchtezuschlagsfaktor auszugehen ist. Dies gilt auch unter Annahme eines nicht-linearen Feuchtezuschlags, der mit zunehmender Feuchte ansteigt. Selbst für die kritischsten Fälle mit hohem Feuchtezuschlag, hohen inneren Feuchtelasten und am Extremstandort Fichtelberg stellt der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte den Einfluss des Wassergehalts auf die energetischen Eigenschaften gut dar.

2.2.4.3 Material 3 – Holzfaserdämmplatte Nassverfahren

Dieselben Betrachtungen wie für die vorigen Materialien wurden auch für Material 3 durchgeführt. In Tab. 2-14 ist für dieses Material dargestellt, welchen Einfluss die Wahl des Feuchtezuschlagswerts b auf die Wärmeleitfähigkeit bei einer relativen Feuchte von 80 % sowie bei maximalem Wassergehalt hat. Auch bei einem Feuchtezuschlag von 1,5 %/M.-% liegt die maximale Wärmleitfähigkeit noch deutlich unter der von Wasser. Für den nicht-linearen Fall, der bei maximaler Wasseraufnahme die Wärmeleitfähigkeit von flüssigem Wasser erreichen soll, errechnet sich oberhalb von 80 % relativer Feuchte ein Feuchtezuschlag von 2,5 %/M.-%.

Der Feuchtezuschlag für den nicht-linearen Fall wird somit für Material 3 bei über 80 % relativer Feuchte deutlich höher angesetzt, als noch bei Material 2 (1,7 %/M.-%). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Material 3 eine geringere Porosität und somit auch eine geringere maximale Wasseraufnahme besitzt, als Material 2. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit vom Wert bei 80 % relativer Feuchte bis hin zur 0,6 W/mK bei maximaler Wasseraufnahme muss somit steiler erfolgen, der prozentuale Feuchtezuschlag wird höher.

Tab. 2-14: Simulierter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Material 3 für die verschiedenen Feuchtezuschläge bei 80 % relativer Feuchte (u_{80}) sowie bei maximalem Wassergehalt (u_{max})

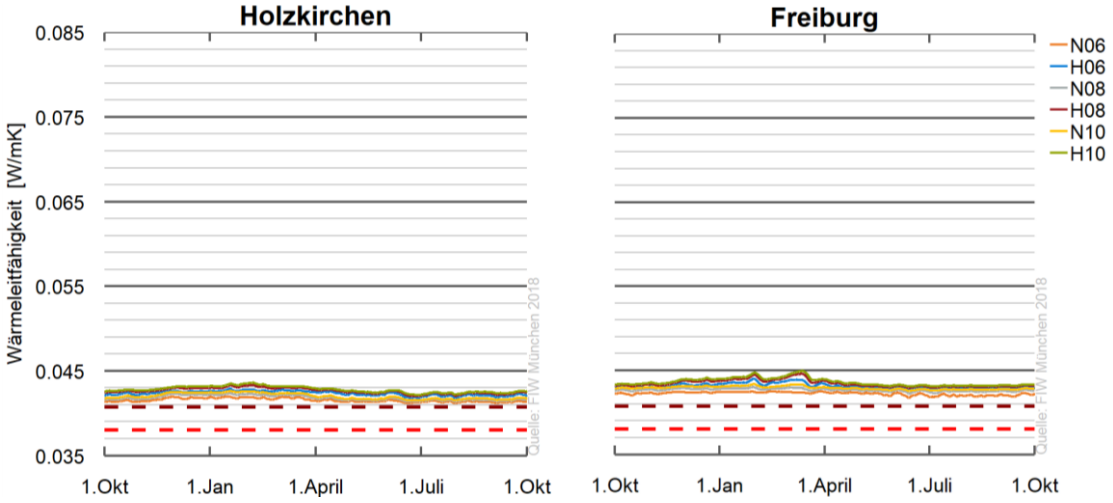
b **[%/M.-%]**	**$\lambda_{Trocken}$** **[W/mK]**	**λ_{U80}** **[W/mK]**	**λ_{Umax}** **[W/mK]**
0,5	0,038	0,041	0,144
0,8	0,038	0,042	0,208
1,5	0,038	0,046	0,356
0,5 bis 80 % r.F. 2,5 ab 80% r.F.	0,038	0,041	0,60

In Abb. 2-19 ist der jährliche Verlauf der Wärmleitfähigkeit von Material 3 in der kritischen Schicht für alle vier betrachteten Varianten dargestellt. Da Material 3 grundsätzlich mehr Feuchte aufnimmt als Material 2 ist erwartungsgemäß hier auch der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit bei gleichem Feuchtezuschlag höher. Der Referenzwert bei 80 % liegt bei diesem Material weiter unterhalb des Trockenwerts, als bei Material 2. Auch ist bei diesem Material ein größerer Einfluss des Standortes bei den linearen Fällen zu erkennen, die Wärmeleitfähigkeit in Fichtelberg steigt weiter an, als für dieselbe Variante in Holzkirchen.

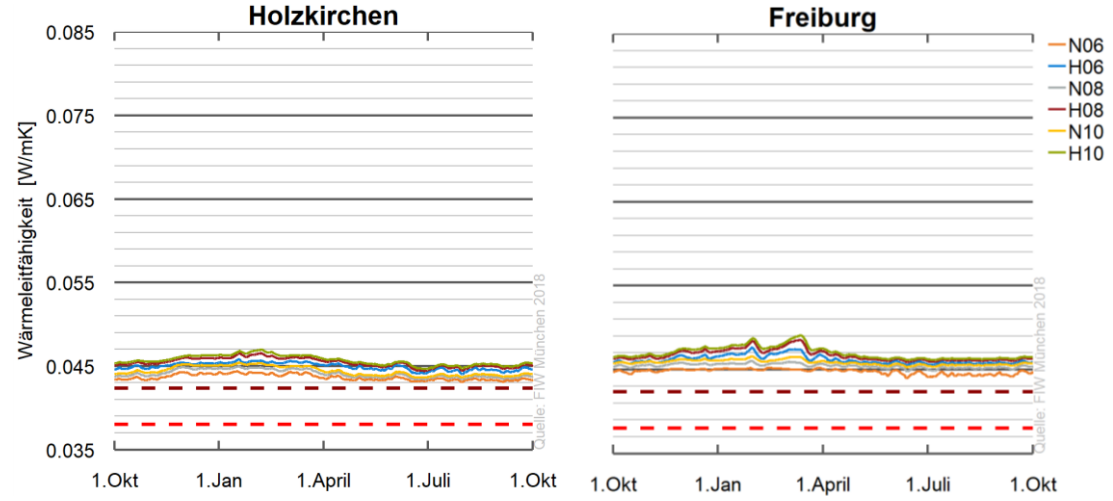
Wieder ist mit zunehmendem Feuchtezuschlag der Effekt zu erkennen, dass mit höherem Feuchtezuschlag der Einfluss der inneren Feuchtelasten, der Dämmstoffdicke und des Standorts zunehmen. Auch wird der Unterschied zwischen dem Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte und der Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Varianten mit zunehmendem linearen Feuchtezuschlag größer.

Im nicht-linearen Fall sind für Material 3 sowohl am Standort Holzkirchen als auch am Standort Fichtelberg ganzjährig erhöhte Wärmeleitfähigkeiten zu erkennen, die auch im Sommer für die Fälle mit normalen Feuchtelasten selten unterhalb von 0,045 W/(m K) liegen. Im Winter steigen die Spitzen für die kritischen Fälle auf über 0,057 W/(m K) (Holzkirchen) bzw. 0,063 W/(m K) (Fichtelberg). Aufgrund des hohen Feuchtezuschlags von 2,5 %/M.-% bei mehr als 80 % relativer Feuchte und ganzjährig hohen Feuchtegehalten liegt die Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht daher deutlich über dem Referenzwert, der mit einem Feuchtezuschlag von 0,5 %/M.-% berechnet wurde. Eine ausreichende Trocknung während der Sommermonate findet statt, auch hier ist nicht mit einer kontinuierlichen weiteren Auffeuchtung über die Jahre zu rechnen. Jedoch liegt das Feuchteniveau ganzjährig so hoch, dass vor allem am Standort Fichtelberg mit einer verringerten Leistungsfähigkeit der Dämmschicht zu rechnen ist.

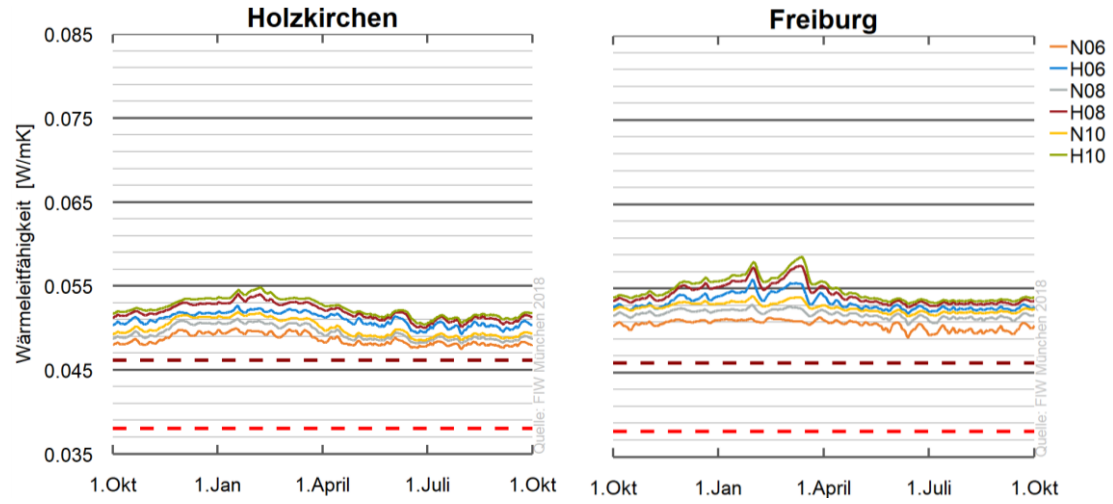
b = 0,5 %/M.-%



b = 0,8 %/M.-%



b = 1,5 %/M.-%



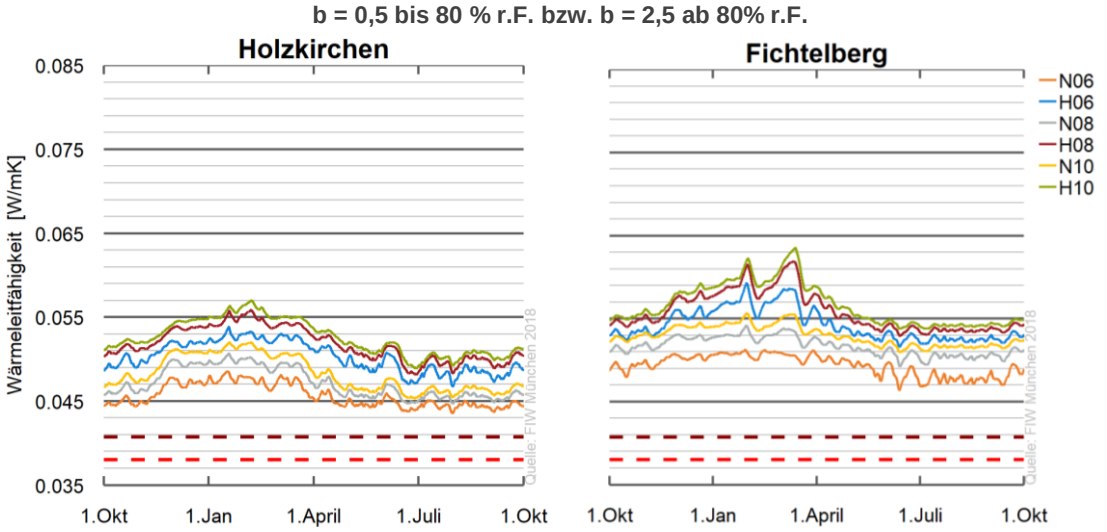


Abb. 2-19: Wärmeleitfähigkeit von Material 3 in Abhängigkeit des Feuchtegehalts im Jahresverlauf in der kritischen Dämmstoffschicht (Kaltseite) sowie Wärmeleitfähigkeit trocken (hellrote Linie) und Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. (dunkelrote Linie).

Die R-Werte der Dämmstoffschicht von Material 3 in den verschiedenen Varianten sowie der Trockenwert und der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte sind in Abb. 2-20 dargestellt. Der Referenzwert liegt hier aufgrund der höheren Feuchteaufnahme etwas weiter unterhalb des Trockenwerts, als bei Material 2, ansonsten können für die Fälle mit linearem Feuchtezuschlag aber ähnliche Beobachtungen bei diesen zwei Materialien gemacht werden: Auch für Material 3 erweist sich die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit bzw. der R-Werts bei einer relativen Feuchte von 80 % als auf der sicheren Seite liegend, da der R-Wert aller untersuchten Varianten entweder gleich hoch oder höher liegt als der Referenzwert. Tendenziell ist zu erkennen, dass die R-Werte der Varianten prozentual vermehrt oberhalb des Referenzwertes liegen, je höher der lineare Feuchtezuschlagsfaktor ist.

Die Wahl des linearen Feuchtezuschlags beeinflusst den R-Wert von Material 3 in etwa im gleichen Maßstab wie Material 2: Für einen Feuchtezuschlag von 0,8 %/M.-% verringert sich der R-Wert im Bereich von 0,05 bis 0,1 (m² K)/W und für 1,5 %/M.-% um 0,15 bis 0,3 (m² K)/W. Daher ist auch bei diesem Material davon auszugehen, dass die Wahl eines linearen Feuchtezuschlags die Ergebnisse energetischer Berechnungen und Simulationen beeinflussen kann.

Für den nicht-linearen Fall lassen sich für Material 3 folgende Beobachtungen machen: Es ist ein Einfluss sowohl von inneren Feuchtelasten als auch vom Standort auf die Abweichung des R-Werts vom Referenzwert zu erkennen. So wird der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte als geeignet eingestuft, um die Variante mit normalen Feuchtelasten am Standort Holzkirchen für alle Dämmstoffdicken darzustellen. Der R-Wert aller anderen Varianten liegt knapp unter dem des Referenzwerts, im ungünstigsten Fall (Fichtelberg, hohe Feuchtelasten) jedoch nicht mehr als 5-6 %.

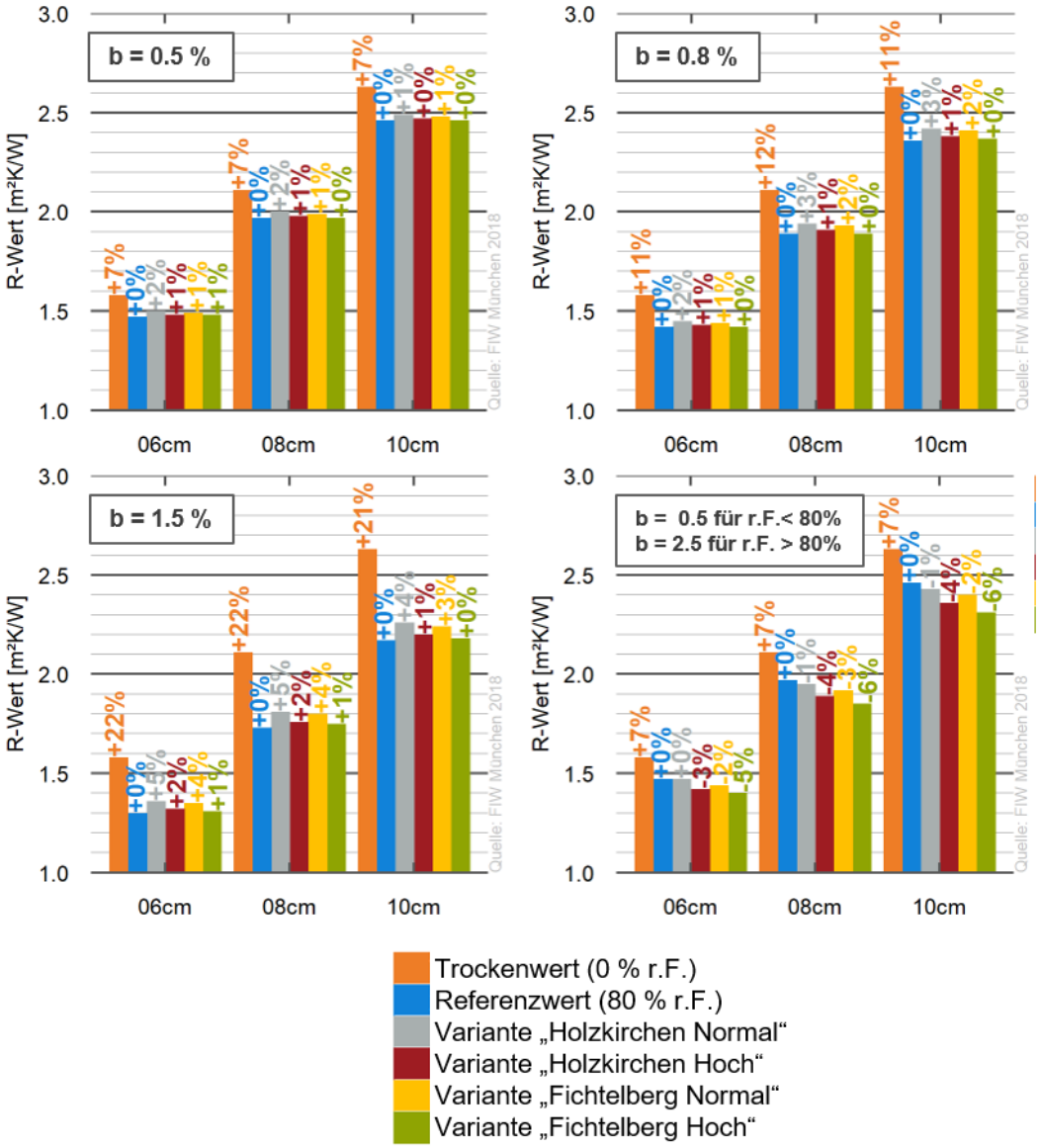


Abb. 2-20: R-Wert [m²K/W] der gesamten Dämmstoffschicht für Material 3 sowie prozentuale Änderung der Varianten gegenüber dem Referenzwert (80 % r.F.) für unterschiedliche Feuchtezuschläge (b).

2.2.5 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend lassen sich aus den durchgeführten Simulationen für die drei diffusionsoffenen, kondensattolerierenden Innendämmmaterialien folgende Rückschlüsse ziehen:

- Bei Material 1 handelt es sich um eine Mineraldämmplatte, deren Feuchtegehalt sensibel auf erhöhte Feuchten auf der Innenseite reagiert. Erhöhte innere Feuchtelasten führen zu hohen Feuchtegehalten in der kritischen Schicht. Zwar ist die

Kapillaraktivität der Dämmplatte hoch genug, um in allen untersuchten Varianten ein Abtrocknen der Feuchte im Sommer zu gewährleisten, jedoch kann es im Winter durch die Erhöhung der Wärmleitfähigkeit in der kritischen Schicht zu Verringerung der Dämmleistung der gesamten Schicht führen. Der R-Wert liegt in diesen Fällen 3 – 6 % niedriger, als der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte. Für die Fälle mit normalen inneren Feuchtelasten ist der Referenzwert jedoch ausreichend kritisch gewählt.

- Bei Material 2 handelt es sich um eine im Trockenverfahren hergestellte Holzfaserplatte, die ein leicht hydrophobes Verhalten und damit die geringste Wasseraufnahme der drei untersuchten Materialien aufweist. Der Einfluss erhöhter Feuchte in der kritischen Schicht auf die energetischen Kennwerte der gesamten Dämmschicht ist für alle Fälle mit linearem Feuchtezuschlag gering. Auch unter Annahme eines nicht-linearen Feuchtezuschlags von 1,7 %/M.-% bei über 80 % relativer Feuchte ergeben sich für keinen der untersuchten Fälle signifikant erhöhte Werte für die Wärmeleitfähigkeit in der kritischen Schicht oder für den R-Wert der gesamten Dämmstoffschicht. Die Verwendung des Referenzwerts der Wärmeleitfähigkeit bei 80 % relativer Feuchte in der gesamten Dämmstoffschicht für energetische Berechnungen erweist sich daher für alle untersuchten Varianten als ausreichend kritisch.

- Material 3 ist eine im Nassverfahren herstellte Holzfaser-Dämmplatte, die im Gegensatz zu Material 2 nicht hydrophobiert ist. Folglich nimmt sie durch ihre saugenden Eigenschaften mehr Wasser auf. Durch eine ausreichende Rücktrocknung im Sommer findet aber keine zunehmende Auffeuchtung über die Jahre statt. Aufgrund der erhöhten Feuchteaufnahme nimmt die Wärmleitfähigkeit bei 80 % gegenüber dem Trockenwert deutlich mehr zu, als bei Material 2. Dennoch ist auch bei diesem Material der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte in der gesamten Dämmschicht ausreichend, um den Einfluss auf die energetischen Kenngrößen erhöhter Feuchten für alle untersuchten Varianten mit linearem Feuchtezuschlag abzubilden. Wird von einem nicht-linearen Verhalten ausgegangen, ergibt sich für relative Feuchten über 80 % ein sehr hoher Feuchtezuschlag von 2,5 %/M.-%. Für die unkritischsten Varianten mit normalen Feuchtelasten am Standort Holzkirchen reicht auch hier der Referenzwert bei 80 % relativer Feuchte in der gesamten Dämmschicht aus, um den Feuchteeinfluss auf die energetischen Kenngrößen darzustellen. Für die kritischeren Varianten mit erhöhten inneren Feuchtelasten und am Standort Fichtelberg fällt der simulierte R-Wert jedoch um bis zu 5-6 % niedriger aus, als der R-Wert bei 80 % relativer Feuchte in der gesamten Dämmstoffschicht. Der Referenzwert ist für diese sehr kritisch gewählten Fälle (sehr hoher Feuchtezuschlagsfaktor ab 80 % relativer Feuchte, hohe innere Feuchtelasten, Extremstandort) also etwas zu unkritisch gewählt. Sollten in der Realität ähnlich ungünstige Bedingungen vorliegen, ist der Einfluss der Feuchte auf die energetischen Kenngrößen bei diesem Material genauer zu untersuchen.

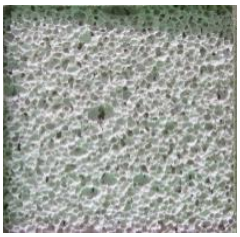
Grundsätzlich sollte kritisch hinterfragt werden, wie sinnvoll die Wahl eines linearen, prozentualen Feuchtezuschlags für den gesamten Feuchtebereich vom völlig trockenen Zustand bis zum völlig durchnässten Zustand eines Materials ist. Für die beiden hier betrachteten Holzfasern ergaben sich hieraus im völlig untergetauchten Zustand Werte für die Wärmeleitfähigkeit, deren Plausibilität anzuzweifeln ist. Auch der nicht-lineare Fall mit „Knick“ bei 80 % relativer Feuchte und anschließend höherem Feuchtezuschlag muss als experimentelles Konstrukt für einen kritisch gewählten Fall betrachtet werden, der vermutlich nicht der Realität entspricht. Jedoch bleibt ebenfalls fraglich, wie relevant diese hohen Feuchtebereiche für baupraktische Anwendungen überhaupt sind. In allen hier untersuchten Varianten, auch für die Extremfälle, wird die freie Wassersättigung der Materialien nicht erreicht, sodass die Definition des Feuchtezuschlagfaktors im Bereich über 100 % relativer Feuchte hier keine Rolle spielt.

Die genaue Kenntnis eines materialspezifischen Feuchtezuschlagsfaktors im baurelevanten Feuchtebereich bis 100 % relativer Feuchte hingegen wird als wichtig erachtet, um realistische energetische Kenngrößen durch hygrothermische Bauteilsimulation erhalten zu können. Bei Verwendung eines Zuschlags von 0,8 %/M.-% kann bei den untersuchten Materialien eine Verschlechterung des R-Werts bei 23/80 festgestellt werden, die im Bereich von 4-7 % liegt. Bei Verwendung eines Zuschlags von 1,5 %/M.-% statt 0,5 %/M.-% liegt die Verschlechterung im Bereich von 10-15 %. Es ist also davon auszugehen, dass die Wahl des Feuchtezuschlagfaktors die Ergebnisse energetischer Berechnungen durchaus beeinflussen kann. Eine produktspezifische Messung der Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Feuchtegehalten ist für den Feuchtebereich bis 80 % relativer Feuchte nach den in Kapitel 2.2.1.3 beschriebenen Methoden möglich und sinnvoll, um daraus einen verlässlichen Feuchtezuschlagsfaktor ermitteln zu können.

2.3 Hygrische Eigenschaften

Neben den thermischen Eigenschaften sind vor allem bei Innendämmungen die hygrischen Eigenschaften von Bedeutung. Neben der Charakterisierung der Materialien werden die Kennwerte für rechnerische Untersuchungen mit dem Simulationsprogramm WUFI® benötigt. Die hygrischen Kennwerte werden für folgende Dämmstoffe bestimmt (Tab. 2-15).

Tab. 2-15: Auswahl der untersuchten Innendämmmaterialien.

Mineraldämmplatte 	EPS weiß 
Hochleistungs-Dämmputz 	Kork-Lehm-Dämmplatte 
Aerogel Hochleistungsdämmputz 	Hanf-Dämmplatte 
Mineralische Aerogeldämmplatte 	Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren) 
Organische Aerogeldämmplatte 	Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren) 
EPS grau 	Mineralwolle 

2.3.1 Messverfahren

Für die Bestimmung der hygrischen Eigenschaften von Bau- und Dämmstoffen gibt es viele genormte Standardverfahren, die oft nach Produktgruppen gegliedert sind und sich in Details unterscheiden. Im Labor des Fraunhofer IBP werden Verfahren eingesetzt, die sich zwar an den Normen orientieren, aber auch geringfügig davon abweichen können. Außerdem kommen am Institut entwickelte, sogenannte Hausverfahren, zum Einsatz. Deshalb werden nachfolgend die angewandten Messverfahren beschrieben.

2.3.1.1 Rohdichte

Als Rohdichte, ρ, bezeichnet man die Dichte eines Festkörpers, die definiert ist als das Verhältnis von Masse der trockenen Festsubstanz und dem eingenommenen Raumvolumen, bestehend aus Feststoff inklusive Porenraum der Materialprobe [kg/m^3]. Die Trockenmasse wird durch Trocknung auf Gewichtskonstanz bei einer definierten Temperatur ermittelt. Die jeweilige Trocknungstemperatur richtet sich nach der Art des Materials und variiert zwischen 40 °C und 105 °C. Für die untersuchten Dämmstoffe wurde eine Trocknungstemperatur von 40°C mit trockener Umluft gewählt (DIN EN 1602:2013-05).

2.3.1.2 Reindichte

Die Reindichte oder Feststoffdichte wird mit dem Heliumpyknometer bestimmt. Die Feststoffdichte, ρ_m, auch als Partikeldichte bezeichnet, entspricht der Dichte der festen Matrix und berechnet sich aus dem Verhältnis der Gesamtmasse des Feststoffs bezogen auf das Feststoffvolumen ohne Porenräume [kg/m^3]. Die Feststoffdichte wird mit einem kommerziellen Heliumpyknometer bestimmt (Abb. 2-21). Im Messgerät sind zwei Kammern vorhanden, eine davon mit variablem Volumen. Zu Messbeginn wird das Volumen der unbefüllten Probenkammer auf die gleiche Größe der Referenzkammer eingestellt. Dazu wird mit Hilfe von Hubkolben in beide zuvor evakuierte Kammern die gleiche Menge Helium eingebracht und das Volumen der veränderlichen Kammer so eingestellt, dass in beiden Kammern der gleiche Druck vorliegt. Zur Messung wird Helium verwendet, da es als inertes Gas den kleinsten Molekulardurchmesser besitzt und alle zugänglichen Hohlräume einer Probe erfasst. Anschließend wird die Probenkammer mit dem Prüfgut befüllt, wieder evakuiert und dann die gleiche Menge Helium wie vorher eingebracht. Um in beiden Kammern nun den gleichen Druck zu erreichen, muss das Volumen der Prüfkammer um das Volumen des reinen Feststoffes des Prüfgutes vergrößert werden. Dividiert man die Masse der Probe durch das so bestimmte Reinvolumen, erhält man die Reindichte.



Abb. 2-21: Heliumpyknometer zur Bestimmung der Reindichte.

Die offene Porosität, Φ_o [m^3/m^3, bzw. Vol.-%] ist definiert als Verhältnis der für Wasser zugänglichen, offenen Poren bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe. Die Porosität, Φ [m^3/m^3], berechnet sich über das Substanzvolumen aus Trockenraumdichte und Feststoffdichte. Sie beschreibt den gesamten, zur Verfügung stehenden Porenraum.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m}$$

ρ_d [kg/ m^3] Rohdichte

ρ_m [kg/ m^3] Feststoffdichte/Reindichte

Φ [m^3/m^3] Porosität

2.3.1.3 Sorptionsisotherme

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt den Wassergehalt eines Baustoffes im Gleichgewicht mit den jeweiligen Randbedingungen. Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften muss zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden werden. Im Sorptionsfeuchtebereich gibt es ein allgemein angewandtes, sehr einfaches Verfahren. Die Probe wird in einem über einer gesättigten Salzlösung oder mit Hilfe eines Klimaschrankes eingestellten Klima gelagert und der Ausgleichsfeuchtegehalt durch Wiegen der Probe ermittelt. Durch schrittweises Variieren der relativen Luftfeuchte von relativ niedrigen (< 50 % r.F.) zu hohen Feuchten (bis 97 % r.F.) erhält man die Adsorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Die Ermittlung einer Sorptionsisotherme dauert je nach Probenmaterial und der Anzahl der Feuchtestufen aufgrund der sehr langsamen Einstellung der Ausgleichsfeuchte mehrere Wochen bis Monate. Das Messverfahren ist innerhalb der DIN EN ISO 12571:2013-12 normiert. Abb. 2-22 zeigt eine Auswahl von Dämmstoffen bei der Lagerung in Aluminiumschalen im Klimaraum bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte.



Abb. 2-22: Aluminiumschalen mit Dämmstoffen im Klimaraum.

Die Adsorptionsisotherme wurde bei 23 °C ermittelt. Die gemessenen Feuchtestufen sind in Tab. 2-16 aufgelistet.

Tab. 2-16: Gemessene Feuchtestufen für die Sorptionsisotherme.

Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	Messverfahren	Salzlösung
23	50	Klimakammer	-
23	65	Klimakammer	-
23	80	Klimakammer	-
23	93	Exsikkator	Ammoniumdihydrogenphosphat
23	97	Exsikkator	Kaliumsulfat

2.3.1.4 Freie Wassersättigung

Die freie Wasseraufnahme ist die gewichts- oder volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte (Überdruck oder Vakuum) aufnimmt. Sie liegt aufgrund eingeschlossener Luftporen stets unterhalb der Menge, die das Material aufgrund seiner offenen Porosität aufnehmen könnte.

Die Bestimmung der freien Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck erfolgt für Faserdämmstoffe gemäß DIN EN ISO 12087:2013-06. Dazu werden Prüfkörper mit den Abmessungen 200 mm x 200 mm zunächst im Trockenschrank bei 40 °C mit trockener Umluft bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend werden die Proben in ein Wasserbad, gefüllt mit Leitungswasser, auf einen Gitterrost gelegt. Die Prüfkörper werden zunächst für 1 Stunde nur bis zur Hälfte eingetaucht. Dann werden sie mit 20 mm $\pm$ 5 mm Wasser überdeckt und nach 28 Tagen aus dem Wasserbad entnommen. Die Proben werden für 10 Minuten über Eck zum Abtropfen auf ein Gitter gestellt und dann gewogen.

Für andere Baustoffe erfolgt die Wassersättigung nach DIN EN 13755:2008-08.Die getrockneten Prüfkörper werden zunächst zur Hälfte in ein Wasserbad, gefüllt mit Leitungswasser, auf einen Gitterrost gelegt. Nach 1 Stunde werden die Proben mit ca. 20 mm Wasser überdeckt und bis zur Massekonstanz, aber maximal 28 Tage, im Wasser gelagert.

2.3.1.5 Wasserdampfdurchlässigkeit

Die Diffusionswiderstandszahl beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht gleicher Dicke. Die Diffusionswiderstandszahl von Luft ist dementsprechend gleich 1, wogegen die der Baumaterialien meist deutlich höher liegt. Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN EN ISO 12572:2015-07 genormt. Dabei wird nach Trockenbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % r. F., allgemein als "dry-cup"-Verfahren bekannt, und Feuchtbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % r. F. ("wet-cup") unterschieden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen. Für Wärmedämmstoffe erfolgt die Bestimmung nach DIN EN 12086:2013-06.

Versuchsdurchführung:
Eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials wird als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Die Gefäße werden in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen diffundiert Wasserdampf durch die Proben hindurch. Nach Einstellen eines stationären Diffusionsstromes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom entspricht. Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Feuchtbereich.Abb. 2-23 zeigt die Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Klimaraum des IBP im Feuchtbereich mit gesättigter Salzlösung.

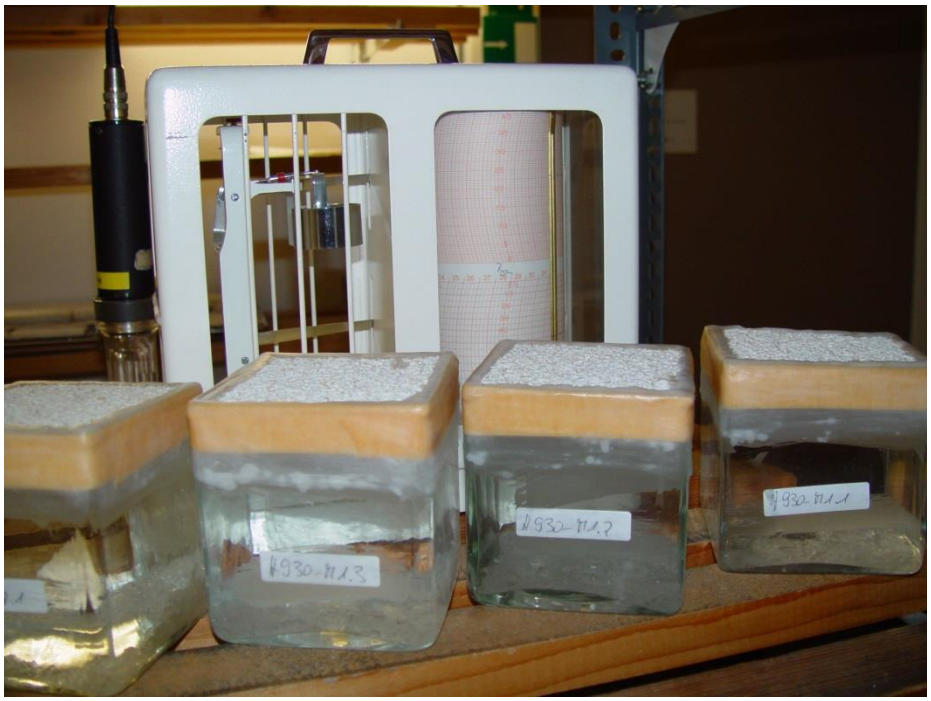


Abb. 2-23: Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Feuchtbereich.

2.3.1.6 Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Feuchteaufnahme eines Materials über die Benetzungsfläche. Bei Materialien mit zeitlich konstanter Porenstruktur erfolgt die Wasseraufnahme stets linear mit der Wurzel der Zeit.

Zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN EN ISO 15148:2003-03 werden die Proben an den Seitenflächen abgedichtet und mit der Saugfläche nach unten 2 bis 10 mm tief in ein Wasserbad eingetaucht (Abb. 2-24). Die Proben werden vor dem Eintauchen in das Wasserbad und dann in bestimmten Zeitabständen gewogen. Vor der zweiten und den folgenden Wägungen wird an der Saugfläche oberflächlich anhaftendes Wasser mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Trägt man die flächenbezogene Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit auf, ergibt sich für die meisten mineralischen Baustoffe eine Gerade. Aus der Steigung der Geraden kann der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) ermittelt werden. Ergibt sich keine mit der Wurzel der Zeit lineare Wasseraufnahme, wird der 24 Stunden-Wert der 1-Stunden-Wert und 4-Stunden-Wert ermittelt.

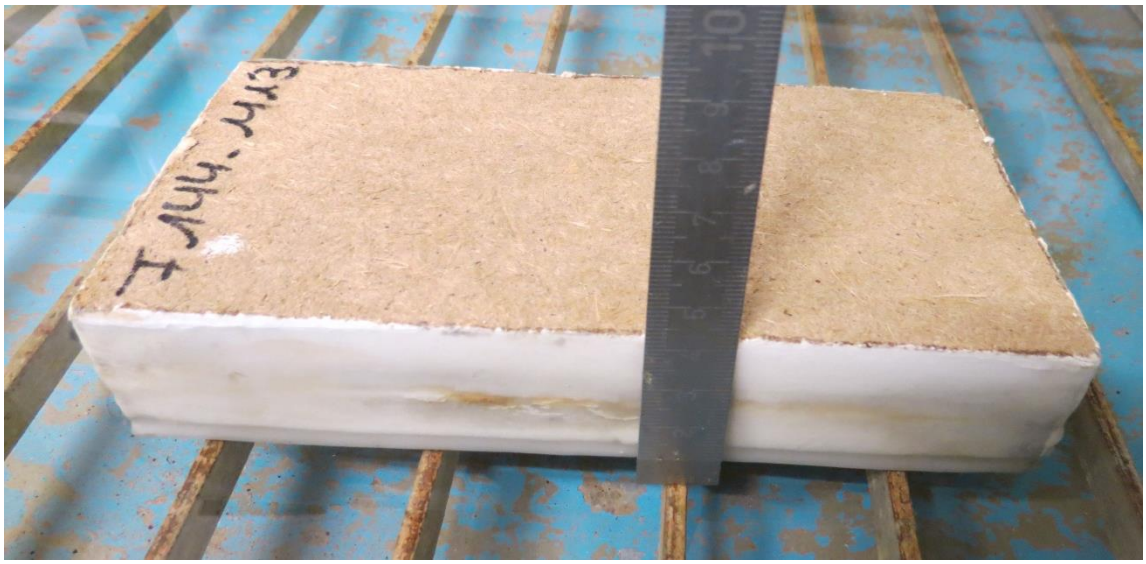


Abb. 2-24: Abgedichtete Probe im Wasserbad während der Messung.

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt nur die Wasseraufnahme eines Baustoffes über die Oberfläche, nicht aber die Verteilung des Wassers innerhalb des Materials. Mit Hilfe von Kapillartransportkoeffizienten, deren messtechnische Bestimmung aber einen hohen apparatetechnischen Aufwand bedeutet, lassen sich für die Wasseraufnahme die Feuchteverteilungen berechnen. Diese für hygrothermische Berechnungen wesentliche Transportkoeffizienten können mit guter Näherung auch aus Standardstoffkennwerten (dem w-Wert, der freien Wassersättigung und dem Feuchtegehalt) approximiert werden (Krus et al. 1997, S. 1–16).

2.3.1.7 Trocknungsversuch

Der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) kann nur die Wasseraufnahme beschreiben. Der Flüssigtransport beim Trocknungsvorgang läuft im Allgemeinen deutlich langsamer ab. Für diesen Transportvorgang existiert kein Standardkennwert vergleichbar dem w-Wert. Aus diesem Grund muss zusätzlich ein Trocknungsversuch durchgeführt werden. Dazu werden gesättigte fünfseitig abgedichtete Proben in einem Klimaraum bei konstanten Randbedingungen über die freie Seite getrocknet und durch Wägung der zeitliche Gewichtsverlauf ermittelt (Abb. 2-25) Aus diesem Gewichtsverlauf können unter Verwendung des instationären Wärme- und Feuchtetransportberechnungsprogramms WUFI iterativ die Kapillartransportkenngrößen für den Trocknungsvorgang ermittelt werden (Holm und Krus 1998, S. 33–52).

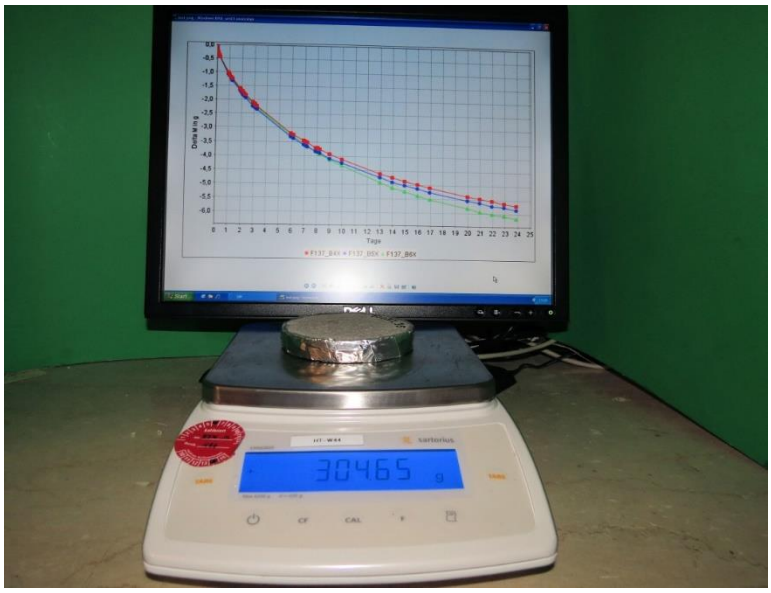


Abb. 2-25: Abgedichtete Probe bei der Messung des Trocknungsverlaufs.

2.3.1.8 Kapillartransportkoeffizienten

Die unter isothermen Bedingungen gemessene Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit bei Erhöhung der mittleren Stofffeuchte beruht auf einem der Diffusion überlagerten Feuchtetransport in flüssiger Phase. Für beide Transportmechanismen wirken unterschiedliche Transportpotentiale, deshalb ist die Vermischung beider Transportarten zu einem feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten nicht korrekt. Obwohl es sich beim Kapillartransportkoeffizienten eigentlich um eine Strömungserscheinung handelt, lässt sich der Flüssigtransport in den Porenräumen mit für bauphysikalische Zwecke hinreichender Genauigkeit durch einen Diffusionsansatz beschreiben.

Der Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang D_{ws} beschreibt die kapillare Wasseraufnahme bei vollständiger Benetzung der Bauteiloberfläche. Dies entspricht in bauphysikalischem Zusammenhang der Beregnung des Bauteils oder einem Wasseraufnahmeversuch. Der Saugvorgang wird von den größeren Kapillaren bestimmt, da sie zwar eine geringere Saugkraft als die kleinen Kapillaren besitzen, aber auch einen noch stärker verminderten Strömungswiderstand.
Für den Saugvorgang lässt sich zwischen D_{wsf} und dem w-Wert der folgende Zusammenhang herleiten:

$$D_{wsf} = \frac{K\pi w^2 \ln(D_{wsf} / D_{ws0})}{4u_f(u_f - u_{80})} + D_{ws0}$$

D_{wsf}	[m²/s]	Kapillartransportkoeffizient bei freier Wassersättigung
D_{ws0}	[m²/s]	Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich, stoffunabhängig auf $2 * 10^{-10}$ m²/s angesetzt
u_f	[kg/m³]	freie Wassersättigung
u_{80}	[kg/m³]	Sorptionswassergehalt bei 80 % r. F. (Bezugsfeuchtegehalt)
K	[-]	Korrekturfaktor
w	[kg/m³]	Wassergehalt

Auswertungen von Dry- und Wetcup Versuchen an zahlreichen mineralischen Materialien legen nahe, dass der Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsbereich nahe beieinander bei etwa 2×10^{-10} m²/s liegt. Aus diesem Grund wird für D_{w0} in der Regel dieser Wert angesetzt. Dieser Ansatz ist in der Software „Hygroapprox“ des Fraunhofer Instituts für Bauphysik integriert und wurde zur Bestimmung der angegebenen Koeffizienten verwendet. Für den Fall, dass die Berechnung mit $D_{ws0} = 2 * 10^{-10}$ m²/s den gleichen Wert für D_{wsf} ergibt wird D_{ws0} solange verringert, bis diese Kennwerte geringfügig unterschiedlich sind.

Der Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen D_{ww} beschreibt die Umverteilung des aufgesaugten Wassers, wenn nach Beendigung der Benetzung kein neues Wasser mehr eindringt und das vorhandene Wasser sich zu verteilen beginnt. Im Bauteil entspricht dies der Feuchtewanderung in Abwesenheit von Regen. Das Weiterverteilen wird von den kleineren Kapillaren bestimmt, da sie mit ihrer größeren Saugkraft die großen Kapillaren leersaugen.
Der Transportkoeffizient für das Weiterverteilen kann für den hygroskopischen Feuchtebereich aus der „feuchteabhängigen“ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl mittels folgendem Ansatz berechnet werden:

$$D_w = \frac{D_D p_s}{RT}\left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^*}\right) / \frac{dw}{d\Phi}$$

D_w	[m²/s]	Flüssigtransportkoeffizient
D_D	[m²/s]	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft
p_s	[Pa]	Sättigungsdampfdruck
R	[J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T	[K]	absolute Temperatur
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl aus Trockenbereichsmessung
μ*	[-]	fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (mit Flüssigtransport)
w	[kg/m³]	Wassergehalt
Φ	[-]	relative Feuchte

Allerdings lässt sich so nur auf Koeffizienten für Feuchtegehalte unter 93 % r. F. (höchste Feuchte bei der Bestimmung der Diffusionswiderstandszahl) schließen. Die mit der obigen Formel berechneten Koeffizienten werden der mittleren Feuchte zugeordnet, die bei der Bestimmung der Diffusionswiderstandszahl zugrunde liegt. Dies ist jedoch nur bei Werkstoffen möglich, die eine fallende Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl mit zunehmender Feuchte zeigen. Bei den üblichen Baustoffen, wurden die Flüssigtransportkoeffizienten aus den wetcup-Versuchen mit einem Feuchtegradienten von 50 % r. F. auf 93 % r. F für den Sorptionsfeuchtebereich ermittelt und den geometrischen Mittelwert von 50% und 93 %, also 80 % zugeordnet und zusätzlich für die freie Sättigung (D_{wwf}) ermittelt. Die Transportkoeffizienten in diesem Feuchtebereich wurden durch Nachrechnung des Trocknungsversuches (siehe oben) bestimmt.
Die Anwendung obiger Gleichung zur Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten ist zwar der physikalisch korrektere Ansatz, es zeigt sich aber, dass bei Ansatz eines

„feuchteabhängigen“ Diffusionswiderstandes unter normalen Randbedingungen ein vergleichbares Ergebnis erhalten wird.

2.3.1.9 KAPI-Test

Die o.g. Verfahren zur Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten gelten allgemein für Bau- und Dämmstoffe. Üblicherweise stehen Baustoffe mit flüssigem Wasser nur in Kontakt, wenn diese beregnet werden. Die Standard-Kapillartransportkoeffizienten beschreiben somit die Wasseraufnahme und anschließende Trocknung bei Kontakt mit Regen. Bei Innendämmungen liegt jedoch ein besonderer Fall vor. Hier kommt es zeitweise zur Kondensation von Wasserdampf durch Taupunkttemperaturunterschreitung mit anschließender Trocknung. Zur Bestimmung der Transportkoeffizienten bei kapillaraktiven Innendämmmaterialien wird ein speziell für Innendämmungen am IBP entwickeltes Verfahren, der sogenannten KAPI-Test, verwendet (Bestimmung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung nach Binder). Abb. 2-26 zeigt die Anlage im Klimaraum. Die prismatischen Probekörper werden auf die Kühlplatten aufgebracht und rundherum während des Versuchs mit Dämmstoff umwickelt.



Abb. 2-26: Versuchsanordnung für den KAPI Test.

Versuchsbeschreibung

Ein prismatischer Probekörper wird an fünf Seiten (seitlich und hinten) mit Epoxidharz abgedichtet. Die Rückseite der Probe wird an ein Kühlelement angebracht, mit Hilfe dessen die Taupunkttemperatur des Raumklimas unterschritten wird. Die Vorderseite ist dem Raumklima (23 °C, 65 % r.F.) ausgesetzt. Der einsetzende Diffusionsstrom feuchter Innenraumluft führt

zum Anstieg der relativen Feuchte im rückwärtigen Probenbereich. Ein zunehmender Flüssigtransport zurück in den wärmeren und noch trockeneren Vorderbereich des Probenkörpers wird hierdurch in Gang gesetzt. In Abhängigkeit von den Randbedingungen und den Materialeigenschaften stellt sich so – bei ausreichendem kapillarem Rücktransport - ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem sich die gegenläufigen Feuchtetransportvorgänge die Waage halten. Mittels regelmäßig erfolgender gravimetrischer Messung sowie Kernspinspektroskopie werden Feuchteaufnahme und -verteilung über den gesamten Versuchszeitraum bestimmt. Die eigentliche Ermittlung der Flüssigtransportkennwerte wird dann mit hygrothermischen Simulationen durchgeführt. Abb. 2-27 zeigt den schematisch den Versuchsaufbau.

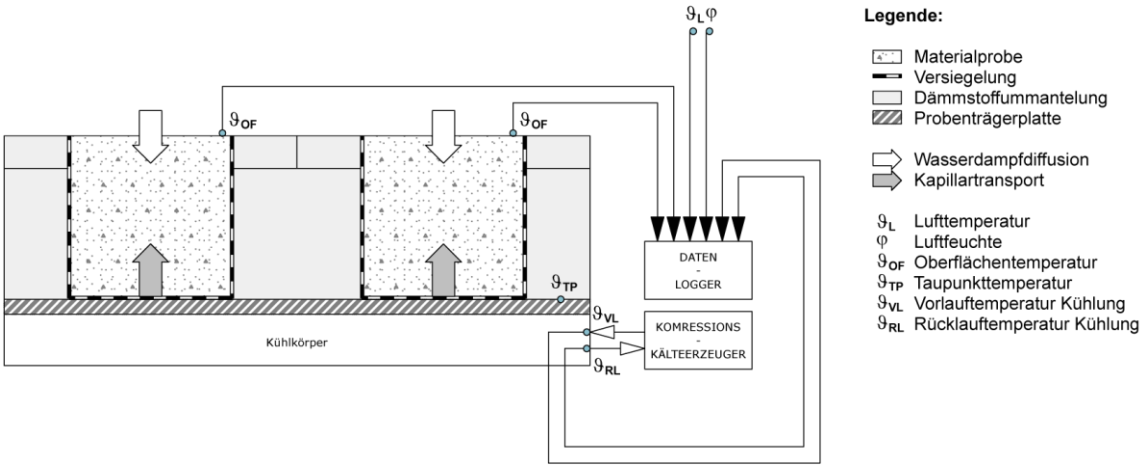


Abb. 2-27: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (KAPI-Test).

2.3.2 Messergebnisse

Betrachtet man die einzelnen Messwerte in Tab. 2-17 lässt sich folgendes feststellen: Die Rohdichten der untersuchten Materialien liegen zwischen 15,6 kg/m³ für EPS und 216 kg/m³ für den Aerogel-Hochleistungsdämmputz. Während die meisten der untersuchten Produkte relativ diffusionsoffen sind und µ-Werte zwischen 1,3 und 5,6 aufweisen, sind die beiden EPS Platten (weiß und grau) sowie die Kork-Lehm-Dämmplatte mit µ-Werten von 22 bis 80 diffusionshemmend.

Betrachtet man die Möglichkeit der Dämmstoffe, flüssiges Wasser aufzunehmen oder weiterzuleiten, lässt sich das mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten beurteilen. In Tab. 2-18 sind die Wasseraufnahmekoeffizienten nach 1 Stunde, nach 4 Stunden und nach 24 Stunden angegeben. Die mineralische Aerogel Dämmplatte und die organische Dämmplatte zeigen die geringsten Wasseraufnahmekoeffizienten. Auch die Holzfaserdämmplatte, die im Trockenverfahren hergestellt worden ist, nimmt relativ langsam Wasser auf und zeigt einen w-Wert von 0,07 kg/m²$\sqrt{\mathrm{h}}$. Die Mineraldämmplatte weist einen w-Wert zwischen 0,32 und 0,24 kg/m²$\sqrt{\mathrm{h}}$ auf. Der Hochleistungsdämmputz, die Kork-Lehm-Dämmplatte und die Hanf-Dämmplatte saugen relativ stark, sind aber nach 24 Stunden noch nicht durchfeuchtet. Der Aerogel-Hochleistungsdämmputz und die Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren) saugen so stark, dass sie nach etwas über 1 Stunde durchfeuchtet sind.

Tab. 2-17 Diffusionswiderstand der Innendämmmaterialien.

Material	Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m³]	µ--Wert im dry cup [-]	µ-Wert im wet cup [-]
Mineraldämmplatte	80	90	2,8	2,4
Hochleistungsdämmputz	60	133	4,2	4,7
Aerogel-Hochleistungsdämmputz	50	216	3,1	3,3
Mineralische Aerogel-Dämmplatte	30	150	3,3	3,9
Organische Aerogel-Dämmplatte	14	117	5,2	5,6
EPS grau	60	15,6	57	63
EPS weiß	60	20	71	80
Kork-Lehm-Dämmplatte	60	198	23	22
Hanf-Dämmplatte	40	148	2,4	2,9
Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren)	60	110	2,0	1,9
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	60	167	3,3	3,5
Mineralwolle	60	31	1,3	1,3

Tab. 2-18: Wasseraufnahmekoeffizienten der Innendämmmaterialien.

Material	Dicke [mm]	Rohdichte [kg/m³]	Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m²√h]		
			1h-Wert	4h-Wert	24h-Wert
Mineraldämmplatte	80	90	0,32	0,28	0,24
Hochleistungsdämmputz	60	133	1,5	1,4	1,1
Aerogel-Hochleistungsdämmputz	50	216	12,6	*	*
Mineralische Aerogel-Dämmplatte	30	150	0,03	0,03	0,03
Organische Aerogel-Dämmplatte	14	117	0,04	0,04	0,04
EPS grau	60	15,6	-	-	-
EPS weiß	60	20	-	-	-
Kork-Lehm-Dämmplatte	60	198	2,5	2,2	1,4
Hanf-Dämmplatte	40	148	3,9	4,5	2,9
Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren)	60	110	0,07	0,08	0,07
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	60	167	22,0	*	*
Mineralwolle	60	31	-	-	-

*) durchfeuchtet; -) nicht bestimmt.

Zur Ermittlung der Feuchtespeicherfunktion werden die Feuchtegehalte der Dämmmaterialien bei verschiedenen Feuchtestufen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tab. 2-19 zusammengestellt.

Tab. 2-19: Sorptionsfeuchtegehalte.

Material	Feuchtegehalt [Vol.-%] bei 23 °C und					
	50 % r. F.	65 % r. F.	80 % r. F.	93 % r. F.	97 % r. F.	Freie Sättigung
Mineraldämmplatte	0,12	0,15	0,24	0,48	1,04	24,1
Hochleistungsdämmputz	0,48	0,51	0,71	1,21	1,64	39,3
Aerogel-Hochleistungsdämmputz	0,26	0,30	0,83	1,70	2,14	46,2
Mineralische Aerogel-Dämmplatte	0,30	0,37	0,56	1,04	1,60	24,2
Organische Aerogel-Dämmplatte	0,16	0,18	0,24	0,30	0,32	0,61
EPS grau	-	--	0,017	-	0,025	2,12
EPS weiß	-	-	0,010	-	-	2,08
Kork-Lehm-Dämmplatte	0,48	0,56	0,77	1,02	1,18	16,7
Hanf-Dämmplatte	0,69	0,95	1,59	2,46	3,11	58,0
Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren)	0,69	0,93	1,25	1,88	2,13	57,4
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)	0,93	1,32	1,90	2,99	3,53	84,9
Mineralwolle	-	0,03	0,04	0,10	0,21	8,10

-) nicht bestimmt.

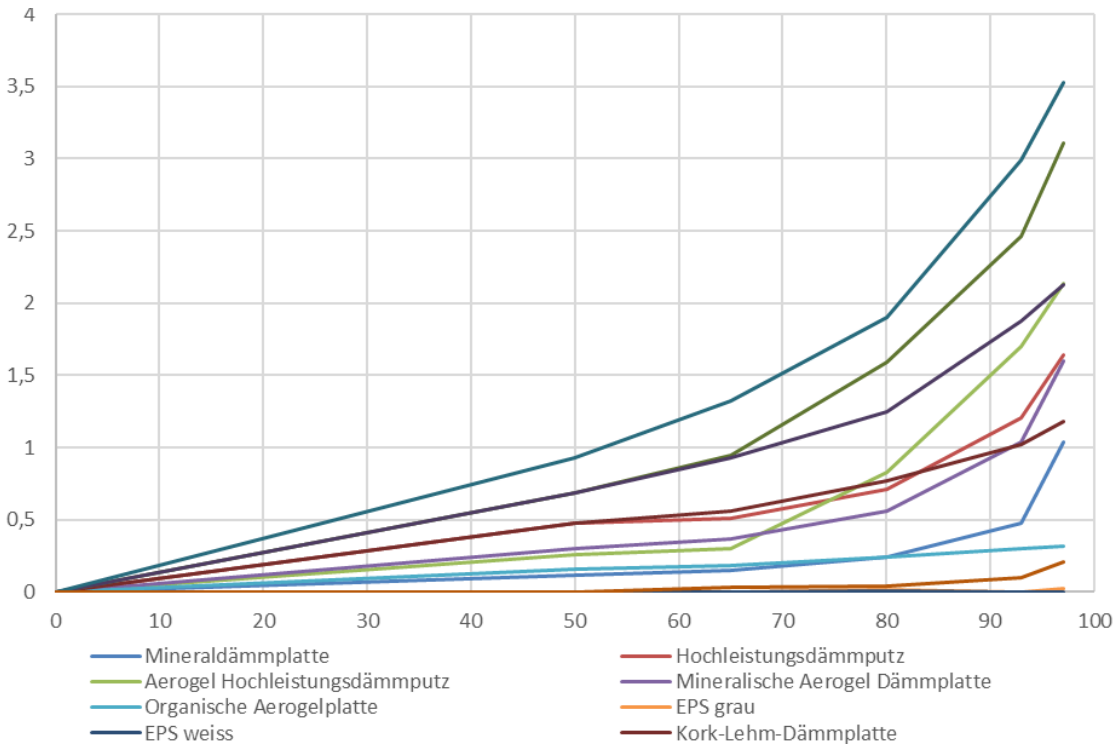


Abb. 2-28: Sorptionsisothermen der Dämmstoffe.

Trägt man die Werte grafisch wie in Abb. 2-28 auf, erkennt man, dass die beiden Holzfaserdämmplatten und die Hanf-Dämmplatte am meisten Feuchte speichern können. Die beiden EPS-Platten und die Mineralwolle nehmen am wenigsten Feuchte auf.

Kapillartransportkoeffizienten

Den Kapillartransportkoeffizienten kommt bei Innendämmmaterialien besondere Bedeutung zu, vor allem, wenn sogenannte kapillar aktive Innendämmungen vorliegen. Wird durch die Innendämmung die Temperatur des massiven Mauerwerks unter die Taupunkttemperatur abgesenkt, kann es zur Tauwasserbildung im hinteren Bereich der Innendämmung kommen. Für diffusionsoffene Dämmstoffe werden die Vorgänge in Abb. 2-29 schematisch dargestellt. Eine diffusionshemmende Schicht vermindert das Eindringen von Feuchte aus dem Innenraum im Winter, reduziert jedoch auch die Austrocknung der feuchten Wand im Sommer und es kann zu Tauwasserbildung hinter der diffusionshemmenden Schicht kommen. Ohne eine solche Schicht gelangt die feuchte Innenraumluft ungehindert bis zur kalten Wand und es bildet sich Tauwasser hinter der Innendämmung, das vom Mauerwerk aufgenommen wird. Durch die eingedrungene Feuchte wird die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung und des angrenzenden Mauerwerks erhöht. Kapillaraktive Dämmstoffe sind ebenfalls diffusionsoffen, fördern aber die Austrocknung, indem sie das Tauwasser durch Kapillarleitung wieder nach innen zurück befördern (Abb. 2-30). Hierbei ist jedoch noch unklar, wieviel Tauwasser anfallen muss, damit die Kapillarleitung einsetzt, und ab welchem Feuchtegehalt Schäden auftreten können.

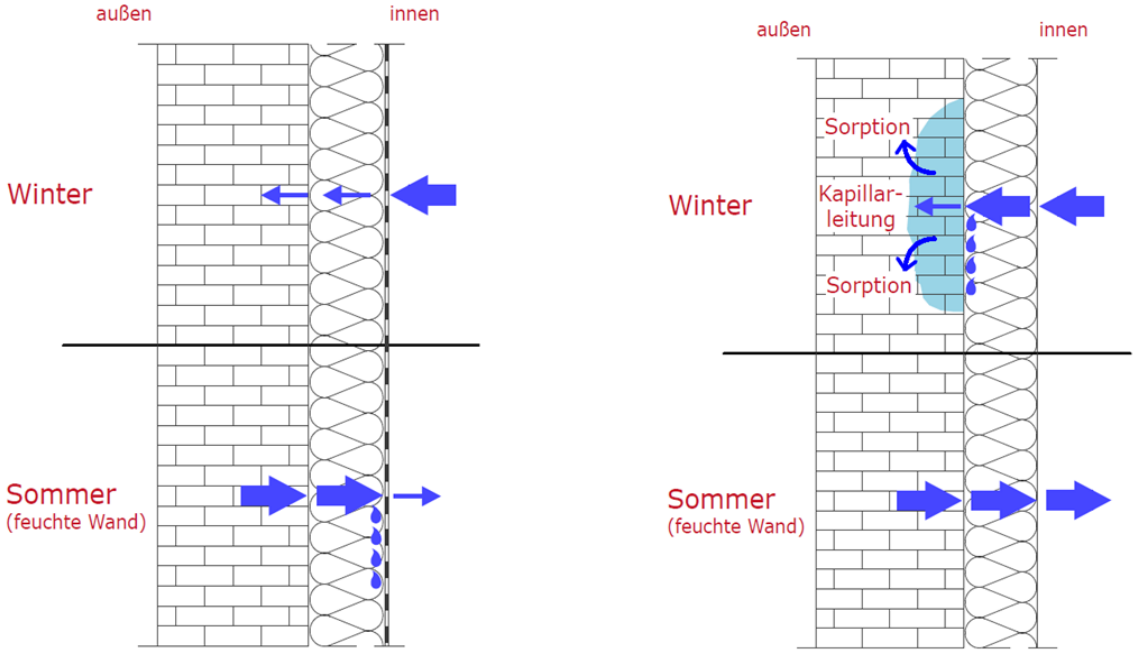


Abb. 2-29: Feuchtetransportvorgänge bei diffusionsoffenen Dämmstoffen – auf der linken Seite mit diffusionshemmender Schicht – auf der rechten Seite ohne diffusionshemmende Schicht.

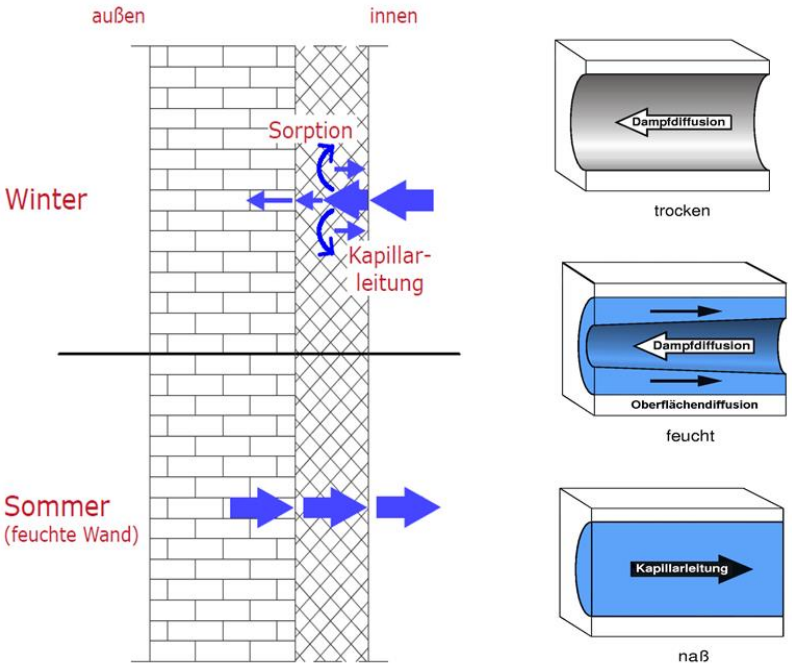
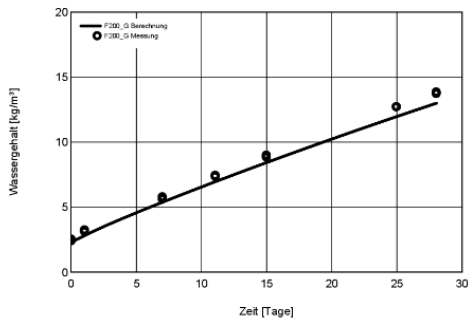
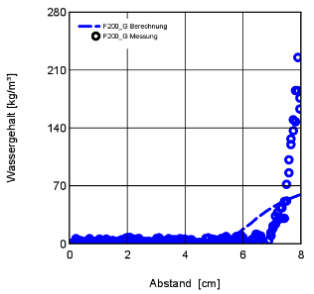
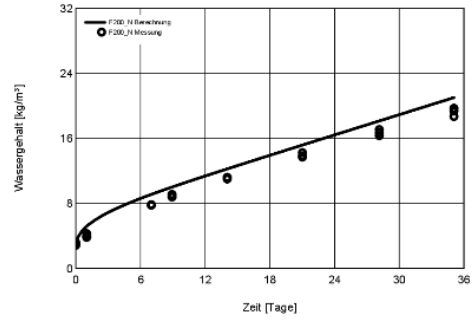
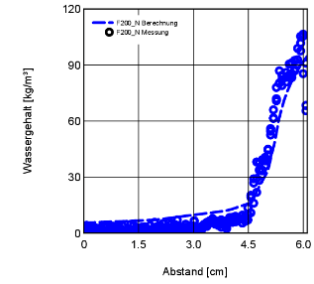
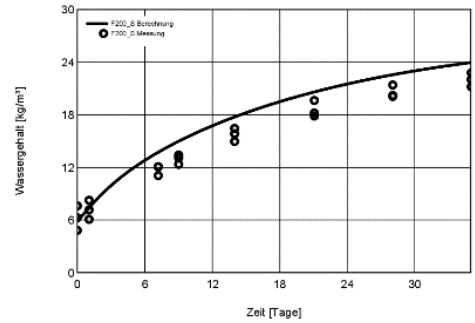
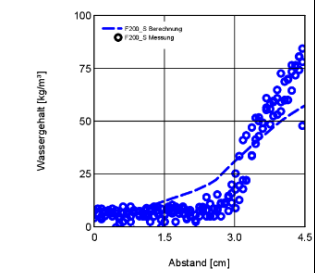
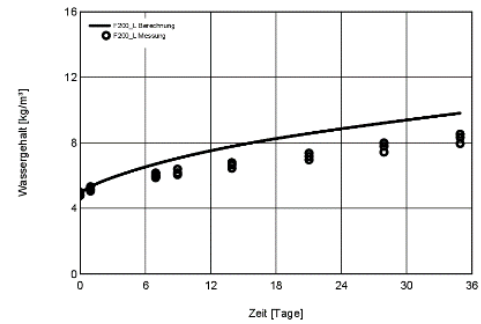
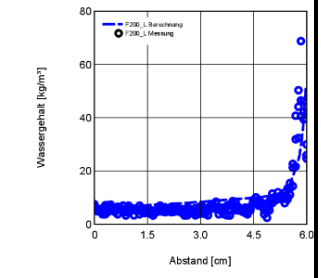


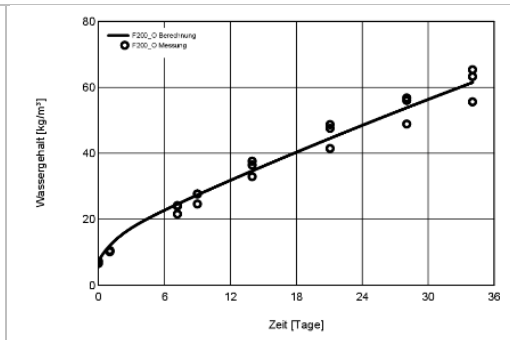
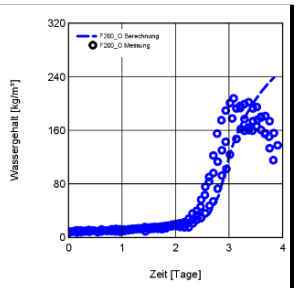
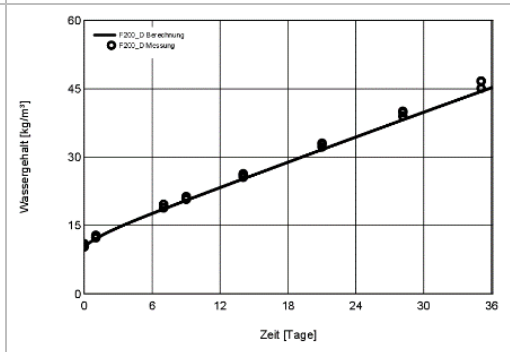
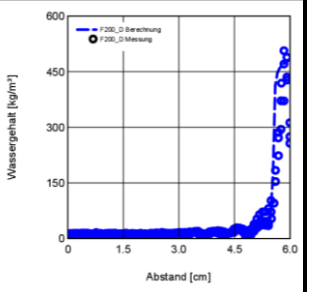
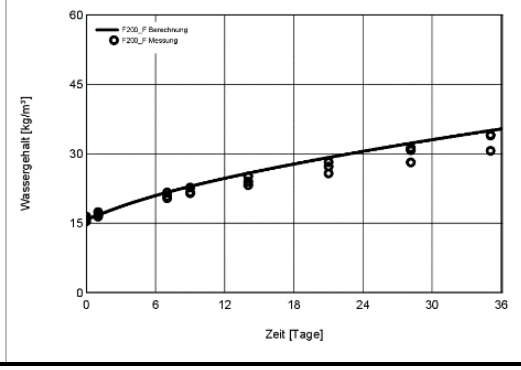
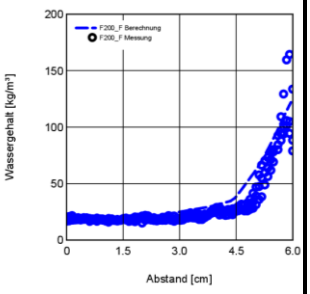
Abb. 2-30: Feuchtetransportvorgänge bei kapillaraktiven Dämmstoffen.

Der oben beschriebene KAPI –Test wurde speziell für solche Innendämmungen entwickelt. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sind von 12 verschiedenen Dämmstoffen die feuchtetechnischen Kennwerte ermittelt worden. Der KAPI-Test wurde an 7 Materialien durchgeführt. Zur Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten werden die gemessenen Feuchteprofile und –verläufe rechnerisch nachvollzogen. Dabei werden die Flüssigtransportkoeffizienten solange adaptiert, bis eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Profilen und Verläufen erreicht wird.

In Tab. 2-20 ist in der mittleren Spalte der gemessene Feuchteverlauf, dargestellt mit Punkten, über einen Zeitraum von 30 oder 36 Tagen aufgetragen. Die Berechnung ergibt den skizzierten Kurvenverlauf. Vergleicht man die Feuchteverläufe der Materialien untereinander, erkennt man deutliche Unterschiede. Beispielsweise zeigt sich bei der Mineraldämmplatte ein linearer Feuchteanstieg über den betrachteten Zeitraum. Auch der Hochleistungsdämmputz zeigt nach einem kurzen Anstieg zu Beginn des Versuchs einen linearen Verlauf über die betrachteten 36 Tage. Der Aerogel-Hochleistungsdämmputz dagegen zeigt einen degressiven Anstieg und nähert sich einem konstanten Wert an, d.h. das Material nimmt solange Feuchte auf, bis sich die Probe im Gleichgewicht befindet. Die Kork-Lehm-Dämmplatte zeigt ebenfalls einen degressiven Anstieg. Allerdings nimmt der Feuchtegehalt aufgrund des hohen Diffusionswiderstands nur sehr langsam zu.

Tab. 2-20: Feuchteverlauf und Feuchteprofil von verschiedenen Materialien.

Material	Feuchteverlauf	Feuchteprofil
Mineraldämmplatte		
Hochleistungs-Dämmputz		
Aerogel Hochleistungs-Dämmputz		
Kork-Lehm-Dämmplatte		

Hanf-Dämmplatte		
Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren)		
Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren)		

Vergleicht man die drei Faserdämmstoffe mit Hanf oder Holzfasern, erkennt man bei der Hanf-Dämmplatte nach anfänglichem stärkerem Anstieg eine lineare Feuchtezunahme über den Zeitraum von 36 Tagen. Die Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren) weist ebenfalls eine lineare Feuchtzunahme auf, die Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren) dagegen zeigt einen degressiven Verlauf. Außerdem wird von der Platte aus dem Nassverfahren deutlich weniger Feuchte aufgenommen.

Die Feuchteprofile, die mit Hilfe des NMR aufgenommen worden sind, sind in der rechten Spalte dargestellt. Die Dämmstoffdicke variiert je nach Material zwischen 4 cm und 8 cm und ist auf der Abszisse aufgetragen. Eine Feuchteanreicherung hat erwartungsgemäß auf der kalten Seite stattgefunden und das Maximum befindet sich an der Kontaktfläche und in den letzten 5 mm bis 10 mm der Probe. Lediglich bei der Hanfdämmplatte ist die maximale Feuchte etwas weiter in die Probe hinein verlagert und liegt nicht an der Kontaktfläche. Die Feuchteprofile konnten unterschiedlich gut mit den o.g. Kapillartransportkoeffizienten nachgerechnet werden. Abweichungen zeigen sich insbesondere bei der Mineraldämmplatte, bei der zwar der Feuchteverlauf gut wiedergegeben werden kann, aber beim Nachrechnen des Feuchteprofils keine gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Der Grund hierfür liegt darin, dass die

Mineraldämmplatte auch als Außendämmung eingesetzt wird und deshalb mit den Kapillartransportkoeffizienten auch das Austrocknungsverhalten nach Beregnung gut wiedergegeben werden muss. Die Kapillartransportkoeffizienten wurden deshalb so gewählt, dass beide Transportmechanismen ausreichend genau wiedergegeben werden können.

Eine sehr gute Übereinstimmung wird für den Hochleistungsdämmputz erzielt. Der Aerogel-Dämmputz zeigt wiederum etwas größere Abweichungen zur Messung. Bei der Nachrechnung wird die Feuchte stärker im Dämmstoff verteilt, als die Messung wiedergibt.

Die Kork-Lehm-Dämmplatte nimmt insgesamt aufgrund des relativ hohen Diffusionswiderstandes relativ wenig Feuchte auf. Die aufgenommene Feuchte befindet sich unmittelbar an der Kontaktfläche.

Die Feuchteprofile der beiden Holzfaserdämmstoffe unterscheiden sich deutlich. Während bei der hydrophobierten Platte (Trockenverfahren) die Feuchteanreicherung an der Kontaktfläche erfolgt, ist bei der Holzfaserdämmplatte im Nassverfahren eine breitere Verteilung zu erkennen. Bei der Hanf-Dämmplatte zeigt sich ebenfalls eine breitere Verteilung.

2.3.3 Klassifizierung der kapillaren Rückleitungseigenschaften

Seit der Einführung von diffusionsoffenen Dämmstoffen für die Innendämmung ohne Einsatz einer Dampfbremse spielen die Kapillarleitungseigenschaften des Dämmstoffs für eine schadensfreie Anwendung eine bedeutende Rolle. Dafür wurde der Begriff der diffusionsoffenen kapillaraktiven Dämmung geschaffen. Bisher gibt es aber kein Kriterium, nach dem eine Einstufung und Beurteilung der Kapillaraktivität erfolgen kann. Aus diesem Grund wird hier ein erster Ansatz zur Klassifizierung dieser Kapillaraktivität eingeführt.

Für den Feuchtehaushalt im Dämmstoff spielen dabei neben den Kapillartransportkoeffizienten, wie sie aus dem KAPI-Test ermittelt wurden, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und die freie Wassersättigung eine Rolle. Um die unterschiedlichen Dämmstoffe vergleichend bewerten zu können, werden mit den ermittelten Transportkoeffizienten für eine Standardprobendicke von 5 cm rechnerisch die Randbedingungen während des KAPI-Tests (raumseitig 23 °C und 65 % r. F. und 12 °C auf der Probenrückseite) über einen Zeitraum von 3 Jahren aufrechterhalten und die sich dabei ergebende Feuchteaufnahme sowie -verteilung beurteilt.

Wird die freie Wassersättigung am kalten Rand der Probe überschritten, kann davon ausgegangen werden, dass keine nennenswerte kapillare Rückleitung gegeben ist. Nach diesem Kriterium ergibt sich für die Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren) mit einer freien Wassersättigung von 574 kg/m³ eindeutig, dass keine relevante kapillare Rückleitung vorliegt (Abb. 2-31). Die Kork-Lehm-Dämmplatte fällt bei dieser Betrachtung insofern heraus, da es sich bei ihr mit einer Diffusionswiderstandszahl μ von über 25 um keine diffusionsoffene Dämmung handelt und daher eine derartige Einstufung trotz einer gewissen Kapillaraktivität nicht sinnvoll ist.

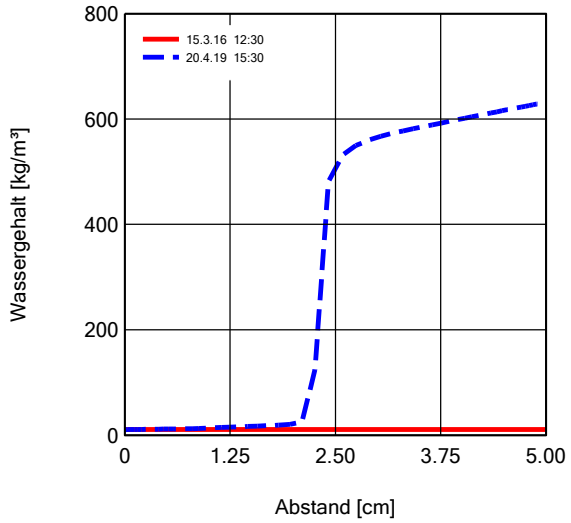


Abb. 2-31: Feuchteverteilung in der Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren), Standardszenario.

Ein weiteres Kriterium stellt der Zeitraum dar, bis sich annähernd ein Gleichgewichtszustand ergibt, also keine weitere Feuchtezunahme erfolgt (bei 90 % des Wassergehalts im eingeschwungenen Zustand). Da die Materialien unterschiedliche Diffusionswiderstände aufweisen, muss zur vergleichenden Bewertung diese Zeit durch die Diffusionswiderstandszahl dividiert werden. Um zu berücksichtigen, dass die stark unterschiedliche freie Wassersättigung der verschiedenen Materialien einen deutlichen Einfluss auf die einzubringende Feuchtemenge und die damit verbundene Zeit haben, wird das Ergebnis auch durch die freie Sättigung dividiert. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Abb. 2-32 dargestellt.

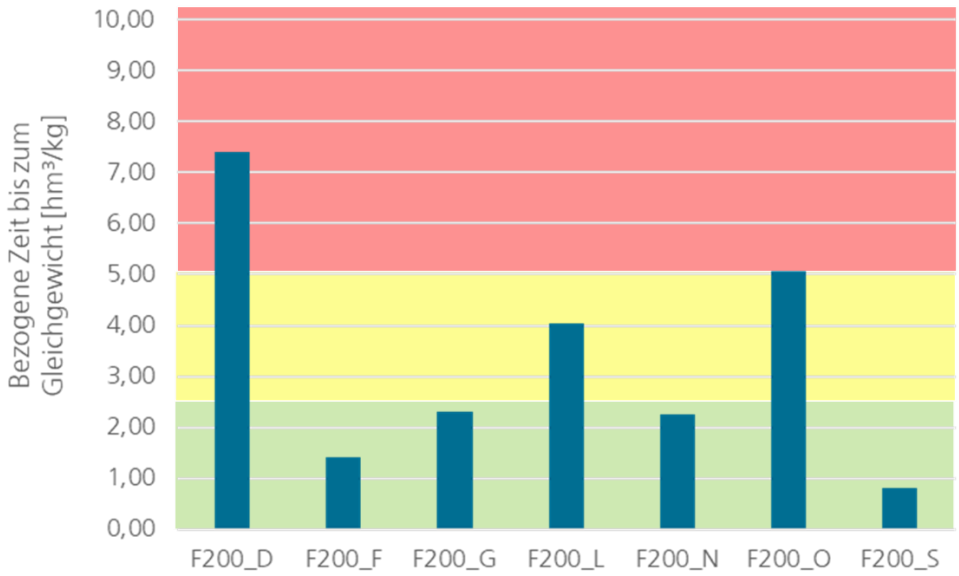


Abb. 2-32: Bezogene Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes.

Man erkennt, dass sich sehr unterschiedliche Werte ergeben, wobei die Probe F200 D (Holzfaserdämmplatte Trockenverfahren), die bereits als nicht kapillar aktiv eingestuft wurde, erwartungsgemäß den höchsten Wert erreicht. Materialien, die einen Wert kleiner 2,5 [hm³/kg] ergeben, zeigen nach unserer Einschätzung ein deutliches kapillar aktives Verhalten. Werte zwischen 2,5 und 5 [hm³/kg] bedeuten eine mittlere Kapillaraktivität. Dementsprechend werden die Materialien F200 F (Holzfaserdämmplatte Nassverfahren), F200 G (Mineraldämmplatte), F200 N (Hochleistungsdämmputz) und F200 S (Aerogel Hochleistungsdämmputz) als kapillaraktiv eingestuft; das Material F200 O (Hanf Dämmplatte) zeigt dagegen nur mittlere Kapillaraktivität. Die Kork-Lehm-Platte (F200 L) ist entsprechend der neuen Klassifizierung also kapillaraktiv, fällt aber wie oben schon erwähnt aufgrund des hohen Diffusionswiderstands aus der Definition „diffusionsoffen und kapillaraktiv“ heraus.

2.3.4 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des Projektes wurden von 12 Dämmstoffen die hygrischen Kennwerte im Labor des IBP ermittelt. An 7 Materialien wurde der KAPI-Test zur Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten durchgeführt und die zugehörigen Feuchteverläufe und Feuchteprofile dargestellt. Somit stehen für alle Materialien die genauen Kennwerte für deren Beurteilung mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen zur Verfügung, die im Kapitel 3 durchgeführt werden.

Darüber hinaus wurden zur Klassifizierung der kapillaren Rückleitungseigenschaften neue Kriterien eingeführt. Dabei wird für eine Standardprobendicke von 5 cm die Feuchtezunahme bei KAPI-Test-Randbedingungen über einen Zeitraum von 3 Jahren ermittelt. Wird die freie Wassersättigung im Lauf der Simulation überschritten, ist keine nennenswerte kapillare Rückleitung gegeben. Die auf den Diffusionswiderstand und das Niveau der freien Sättigung bezogene Dauer bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands beschreibt dabei die Stärke des kapillaren Rücktransports. Nach diesen Kriterien können vier Materialien als deutlich kapillar aktiv eingestuft werden: die Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren), die Mineraldämmplatte, der Hochleistungsdämmputz und der Aerogel-Hochleistungsdämmputz. Zwei weitere Materialien weisen demzufolge eine mittlere Kapillaraktivität auf und eines der getesteten Materialien ist kaum kapillaraktiv.

2.4 Ökologische Analyse

Neben den immer steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden zur Erreichung der Klimaschutzziele, werden im Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung auch Anforderungen und Zielsetzungen an die ökologische Bauweise definiert. So soll beispielsweise der Einsatz nachhaltiger Bau- und Dämmstoffe gestärkt werden. Außerdem sollen in zukünftigen Planungsprozessen die vor- und nachgelagerten Klimaschutzaspekte berücksichtigt werden. Das heißt, die Emissionen welche bei Herstellung, Verarbeitung, Entsorgung und Wiederverwertung entstehen, müssen beziffert werden. Dies setzt eine Einbeziehung der Lebenszyklusanalyse in die Baupraxis voraus. Aus diesen Gründen und zur ganzheitlichen

Bewertung von Innendämmstoffen und Systemen soll im Rahmen dieses Forschungsberichtes eine vergleichende ökologische Analyse durchgeführt werden.

2.4.1 Grundlagen der Lebenszyklusanalyse

Ein Bauprodukt durchläuft vor und nach seiner Verwendung im Gebäude viele verschiedene Prozesse. So sind vor der eigentlichen Herstellung des Produktes bereits viele Arbeitsschritte beim Rohstoffabbau und zur Aufbereitung notwendig. In Abb. 2-33 ist dieser beispielhaft dargestellt.

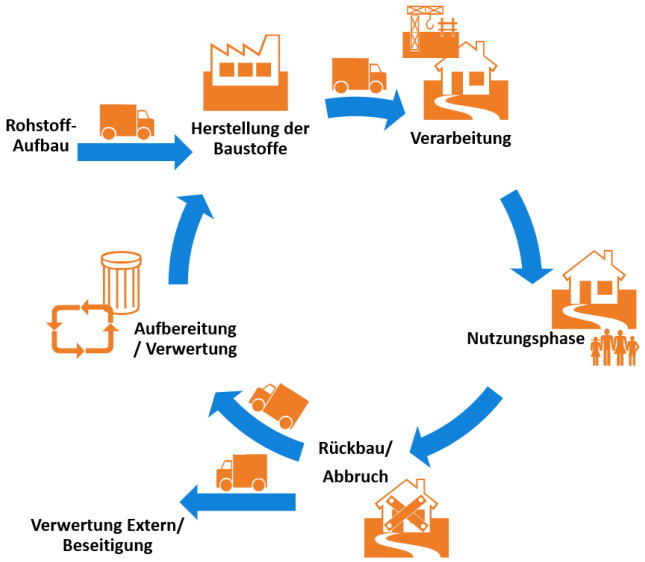


Abb. 2-33: Lebenszyklus eines Bauproduktes, Darstellung des FIW München in Anlehnung an PE International 2011).

2.4.1.1 Absicht und Zielsetzungen

Die Ökobilanz ist ein Instrument des Umweltmanagements, welches ursprünglich mit dem Ziel der Produktoptimierung entwickelt worden ist, heute aber auch bei Prozessen, Dienstleistungen und Verhaltensweisen angewendet wird. Es sollen die dabei die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung bewertet werden. Die Erstellung von Ökobilanzen kann daher in unterschiedlichsten Bereichen Anwendung finden:

- Aufzeigen von Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften eines Produktes in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus
- Information für Entscheidungsträgern bei strategischer Planung, Prioritätensetzung, Produkt- oder Prozessentwicklung oder entsprechender Neuentwicklung
- Auswahl relevanter Indikatoren der Umwelteigenschaften, einschließlich der zugehörigen Messverfahren

- Für Marketingzwecke, bspw. bei der Implementierung einer Umweltkennzeichnung, Treffen von Umweltaussagen oder beim Erstellen einer Umweltdeklaration für ein Produkt.

2.4.1.2 Normung und Ablauf

Es gibt zwei ISO Standards, welche die Durchführung von Ökobilanzen Regeln. In der DIN EN ISO 14040:2009-11 (Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen) ist ein Rahmenplan zur Struktur einer Lebenszyklusanalyse definiert. Weiter sind Maßstäbe bezüglich Transparenz, Datenqualität und der optionalen kritischen Nachbetrachtung für den Fall der Veröffentlichung der Ergebnisse definiert. Im Gegensatz dazu regelt die DIN EN ISO 14044:2006-10 (Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen) mehr technische Details zum Ablauf der Lebenszyklusanalyse.

Grundsätzlich ist der Ablauf einer Ökobilanz in vier Phasen gegliedert:

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz- Phase
- Phase der Wirkungsabschätzung
- Phase der Auswertung

Die Festlegung von Umfang und Ziel definiert das Produktsystem, die zu betrachtenden Prozesse und die Systemgrenzen. Eine detaillierte Masse- und Energiebilanz des definierten Systems führt zur Bestandsaufnahme. Die Ergebnisse der Bestandsaufnahme werden daraufhin in der Phase der Folgenabschätzung auf mögliche Umwelteinflüsse übertragen. Der gesamte Arbeitsprozess wird sowohl von der Interpretation der Zwischenergebnisse wie auch der Endergebnisse begleitet. Oftmals handelt es sich um einen iterativen Prozess, bei dem wieder ein Schritt zurückgegangen und Umfang und Ziel neu bestimmt werden müssen. Ein wichtiger Begleitschritt ist die Analyse der Fehleranfälligkeit - dort, wo wichtige Input-Parameter variiert und die Effekte der Ergebnisse evaluiert werden. Hierdurch können Anwender das untersuchte System besser einschätzen. In Abb. 2-34 ist das Prinzipschema zum Ablauf einer Ökobilanzierung gemäß DIN EN ISO 14040 dargestellt und wird nachfolgend genauer Erläutert.

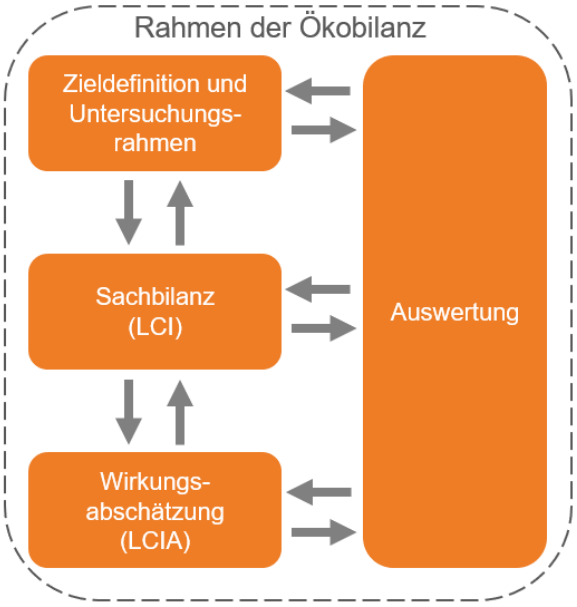


Abb. 2-34: Phasen der Ökobilanz, Eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14040.

Umfang und Ziel

Die Festlegung von Umfang und Ziel definiert das Produktsystem, die zu betrachteten Prozesse und die Systemgrenzen. Der Untersuchungsrahmen sollte hinreichend gut definiert werden, um sicherzustellen, dass die Breite, Tiefe und die Einzelheiten der Studie widerspruchsfrei und für das vorgegebene Ziel hinreichend sind.

Funktionelle Einheit

In diesem Zusammenhang muss die funktionelle Einheit der Ökobilanzierung definiert werden. Die funktionelle Einheit legt die Quantifizierung der angegebenen Funktionen des Produktes fest. Hauptsächlich dient eine funktionelle Einheit dazu, einen Bezug zu schaffen, auf den die Input- und Outputflüsse der Sachbilanz bezogen werden. Diese Bezugsbasis ist notwendig, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Ökobilanzen sicher zu stellen.

Sachbilanz

Nachdem die funktionelle Einheit definiert wurde, wird eine detaillierte Masse- und Energiebilanz durchgeführt. Sachbilanzen, im englischen Life Cycle Inventory (LCI), umfassen Datenerhebungen und Berechnungsverfahren zu Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems. Der Prozess der Sachbilanz ist iterativ. Während Daten gesammelt werden und das System näher untersucht wird, können neue Datenanforderungen oder Einschränkungen erkannt werden, die eine Änderung der Verfahren zu Datenerhebung erfordern, damit das Ziel der Studie noch erfüllt werden kann.

Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung der Ökobilanz wird die Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz angestrebt. Im Allgemeinen werden in diesem Schritt Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und

Wirkungsindikatoren verknüpft, wobei versucht wird, die hieraus resultierenden potenziellen Wirkungen zu erkennen.

Auswertung
In der Auswertungsphase der Ökobilanz werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam betrachtet. Die Auswertung sollte Ergebnisse liefern, die mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmen und die zur Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterungen von Einschränkungen und zum Aussprechen von Empfehlungen dienen.

2.4.2 Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten

Umweltproduktdeklarationen stellen umweltbezogene Daten auf der Grundlage festgelegter Parameter zur Verfügung. Die auch im Deutschen gebräuchliche Abkürzung EPD stammt vom englischen Begriff „Environmental Product Declarations“. Eine EPD beinhaltet als wesentliches Element Ökobilanzdaten. Dies umfasst Parameter zu Ressourcenbedarf, Abfällen und Umweltwirkungskategorien.
Neben den umweltbezogenen Daten und Informationen beinhaltet eine EPD die wesentlichen technisch-funktionalen Eigenschaften des Produkts. Damit können die Produktdaten als Bestandteile der Ökobilanz von Bauteilen und Gebäuden herangezogen oder funktionsäquivalente Produkte miteinander verglichen werden.

2.4.2.1 Normung

Die DIN EN 15804:2014-07 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“ liefert zentrale Regeln für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen (EPDs) von Bauprodukten. Die Regeln gelten für alle Bauprodukttypen („horizontale Norm“), um branchenspezifische („vertikale“) Abweichungen zu minimieren. Die Norm bildet somit auf europäischer Ebene eine wesentliche Grundlage dafür, dass Umweltwirkungen von Bauprodukten, Bauleistungen und Bauprozessen in einheitlicher Weise abgeleitet, verifiziert und dargestellt werden.

In der DIN EN 15804 sind verschiedene Phasen des Lebenszyklus des Bauproduktes oder der Bauleistung definiert. In Tab. 2-24 sin diese tabellarisch dargestellt. Je nachdem, welche Phasen bei der Ökobilanzierung berücksichtig werden, sind drei verschiedene Arten definiert.

Von der Wiege bis zum Werkstor / cradle to gate
Hierbei wird ausschließlich die Herstellungsphase von der Bereitstellung der Rohstoffe (A1), den Transport (A2), die Herstellung und die damit verknüpften Prozesse (A3) berücksichtigt. Daher wird diese EPD- Art „von der Wiege bis zum Werkstor“ bezeichnet.

Von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen
Dabei werden neben der Herstellungsphase als Pflichtteil weitere ausgewählte Phasen des Lebenszyklus berücksichtigt.

Von der Wiege bis zur Bahre / cradle to grave

Bei der umfassendsten Art der EPD wird der gesamte Lebenszyklus eines Produktes entsprechend den Systemgrenzen berücksichtigt. Enthalten ist dabei die Herstellungsphase, der Einbau ins Gebäude, die Nutzung und Inspektion, Wartung und Reinigung, Austausch und Ersatz, Abriss, Abfallbehandlung für die Wiederverwendung, Rückgewinnung, Recycling und Beseitigung.

Als eine wesentliche Neuerung durch DIN EN 15804 ist es nicht mehr erlaubt, die Vorteile durch Wiederverwendung, Rückgewinnung oder Recycling eines Produktes mit den Aufwendungen am Anfang des Lebenszyklus zu verrechnen und in Form eines einzelnen Wertes darzustellen. Stattdessen werden diese Potenziale in einem separaten Informationsmodul D abgebildet. Dadurch wird Klarheit geschaffen, zu welchem Zeitpunkt mit welchen Umweltbelastungen beziehungsweise -entlastungen zu rechnen ist.

A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	D
Herstellungsphase	Errichtungsphase	Nutzungsphase	Entsorgungsphase	Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen
A1 Rohstoffbereitstellung A2 Transport A3 Herstellung	A4 Transport A5 Bau / Einbau	B1 Nutzung B2 Instandhaltung B3 Reparatur B4 Austausch- Ersatz B5 Verbesserung, Modernisierung B6 Betrieblicher Energieeinsatz B7 Betrieblicher Wassereinsatz	C1 Abbruch C2 Transport C3 Abfallbewirtschaftung C4 Deponierung	D Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recycling- Potential
Von der Wiege bis zum Werkstor **"cradle to gate"**	-	-	-	-
Von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen	Optional	Optional	Optional	Optional
Von der Wiege bis zur Bahre **"cradle to grave"**				Optional

Abb. 2-35: Phasen des Lebenszyklus, Eigene Darstellung nach DIN EN 15804.

2.4.2.2 Deklarierte Umweltparameter

In der DIN EN 15804 sind insgesamt 24 verschiedene Parameter der Wirkungskategorien definiert, welche bei der Erstellung einer EPD angegeben werden müssen. Dabei handelt ist sich um

- Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen
- Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes
- Umweltinformationen, die verschiedene Abfallkategorien beschreiben
- Umweltinformationen, die Output- und Stoffflüsse beschreiben

Im Folgenden werden die wichtigsten Wirkungskategorien und Parameter kurz erläutert.

2.4.2.3 Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes

Primärenergieeinsatz

Unter Primärenergie wird die Energie oder Energieträger bezeichnet, welche direkt aus der Hydrosphäre, Atmosphäre oder Geosphäre entnommen wurde und keiner anthropogenen Umwandlung unterworfen wurde. Grundsätzlich wird weiter in nicht erneuerbare und erneuerbare Primärenergie unterschieden. Außerdem kann in Primärenergie zur stofflichen und in Primärenergie als Energieträger unterschieden werden. In Tab. 2-21 sind die verschiedenen Parameter und deren Zusammenhang dargestellt.

Tab. 2-21: Übersicht Parameter Primärenergie.

PERM Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	+	**PERE** Erneuerbare Primärenergie als Energieträger	=	**PERT** Total erneuerbare Primärenergie
+		+		+
PENRM Nicht- erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	+	**PENRE** Nicht- erneuerbare Primärenergie als Energieträger	=	**PENRT** Total nicht erneuerbare Primärenergie
=		=		=
PETM Primärenergie gesamt zur stofflichen Nutzung	+	**PETE** Primärenergie gesamt als Energieträger	=	**PET** Primärenergie gesamt

Total nicht erneuerbare Primärenergie – PENRT [MJ]

Dieser Wert charakterisiert den Einsatz der Energieträger Erdgas, Erdöl, Braunkohle, Steinkohle und Uran. Erdgas und Erdöl werden dabei sowohl zur Energieerzeugung (als Energieträger PENRE), als auch zur stofflichen Nutzung verwendet, z.B. von Kunststoffen. Dieser Anteil wird in der separaten Wirkungskategorie PENRM (nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung) angegeben.

Total erneuerbare Primärenergie – PERT [MJ]

Dieser Wert charakterisiert den Einsatz erneuerbarer Energien wie Wind- und Wasserkraft, Biomasse, Solarenergie und Erdwärme. Wie bei der nicht erneuerbaren Primärenergie gibt es auch für die Erneuerbare Primärenergie eine separate Wirkungskategorie um Anteile zur Nutzung als Energieträger (PERE) und zur stofflichen Nutzung (PERM) auszuweisen. Beispiel hierfür ist die Verwendung von Holz (Biomasse) zu konstruktiven Zwecken.

2.4.2.4 Parameter zur Beschreibung der Umweltwirkungen

Treibhausgaspotential – GWP

Der Wirkungsmechanismus des Treibhauseffektes, findet ähnlich wie in Gewächshäusern, auch auf globalen Maßstab statt. Wie in Abb. 2-36 dargestellt treffen die kurzwelligen Sonnenstrahlen

auf der Erdoberfläche auf und werden dort teilweise absorbiert und als Infrarotstrahlung reflektiert. Der reflektierende Anteil wird in der Troposphäre durch die sogenannten Treibhausgase absorbiert und richtungsunabhängig wieder abgestrahlt.

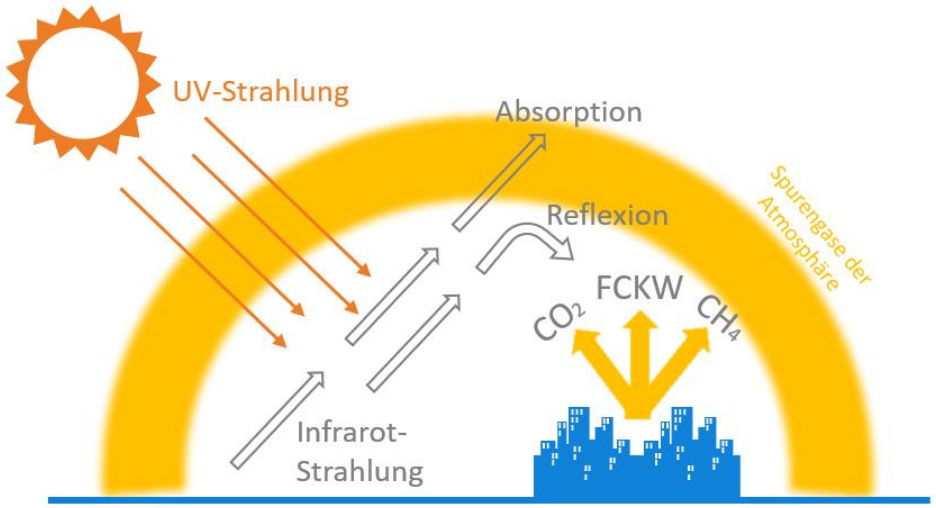


Abb. 2-36: Wirkungsmechanismus Treibhauseffekt, Darstellung des FIW München in Anlehnung an PE International 2011).

Dieser Effekt ist zu einem gewissen Grad ein natürliches Phänomen. Jedoch ist aufgrund menschlicher Aktivitäten freigesetzte zusätzliche Treibhausgase, wie Kohlendioxid, Methan und FCKW ein anthropogener Anteil am Treibhauseffekt zu verzeichnen.

Die Wirkungsabschätzung des Treibhauspotentials (Global Warming Potential – kurz GWP) wird in Kohlendioxid- Äquivalent [kgCO_2-Äq.] angegeben. Die Emissionen werden dafür bezüglich ihres potentiellen Treibhauseffektes zu CO_2 ins Verhältnis gesetzt. Da die Verweildauer der Gase in der Atmosphäre in die Berechnung mit einfließt, muss der für die Abschätzung betrachtete Zeitraum mit angegeben werden. Üblicherweise wird dabei von 100 Jahren ausgegangen.
Bei Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen, wie beispielsweise Holz, kann ein negatives Treibhauspotential bilanziert werden. Während des Wachstums nehmen Pflanzen CO_2 auf und speichern dieses. Erst bei Verrottung oder Verbrennung werden diese wieder in die Atmosphäre frei gegeben.

Abbau Potential der stratosphärischen Ozonschicht – ODP
Die Ozonschicht in der Stratosphäre (15-20 km Höhe) entsteht, wenn kurzwellige UV-Sonnenstrahlen auf Sauerstoff- Moleküle treffen. Ozon absorbiert die kurzwellige UV- Strahlung und gibt diese richtungsunabhängig mit größerer Wellenlänge wieder ab. Nur ein Teil der UV-Strahlung gelangt auf die Erde. Die Ozonschicht erfüllt damit für die Erde eine lebenswichtige Filterfunktion. Durch gewisse anthropogene Emissionen kommt es zum Abbau der Ozonschicht und trägt zum einen zur Erwärmung der Erdoberfläche bei, und zum anderen reagieren Organismen besonders empfindlich auf UV-A und B- Strahlung.

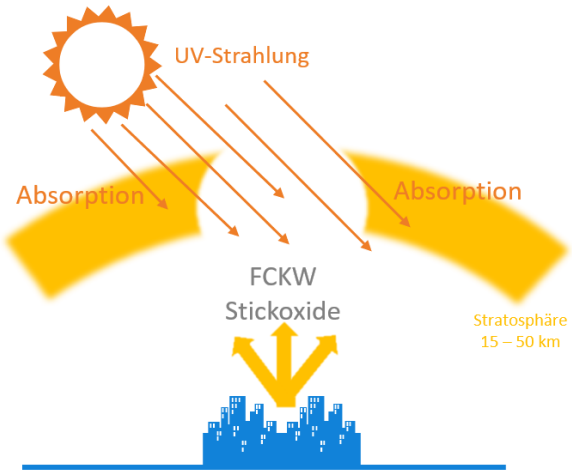


Abb. 2-37: Wirkungsmechanismus Ozonabbau, Darstellung des FIW München in Anlehnung an PE International 2011).

Wesentliche Auslöser für den Ozonabbau ist die Freisetzung von Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) und Stickoxide (NO_x). Als Referenzeinheit für die Wirkungsabschätzung des stratosphärischen Ozonabbaupotentials (Ozone Depletion Potenzial – kurz ODP) dient das FCKW- Kältemittel Trichlorfluormethan (R11). Damit sollen die langfristigen, globalen und zum Teil irreversiblen Auswirkungen beziffert werden.

Bildungspotential für troposphärisches Ozon – POCP

Im Gegensatz zur Schutzfunktion in der Stratosphäre ist bodennahes Ozon als schädliches Spurengas einzuordnen. Photochemische Ozonbildung in der Troposphäre, auch als Sommersmog bezeichnet, steht im Verdacht, zu Vegetations- und Materialschäden zu führen. Höhere Konzentrationen von Ozon sind humantoxisch. Unter Einwirkung von Sonnenstrahlung entstehen aus Stickoxid und Kohlenwasserstoffemissionen unter komplexen chemischen Reaktionen aggressive Reaktionsprodukte, wobei das wichtigste Reaktionsprodukt Ozon ist. Das Photooxidationspotenzial (POCP) wird in der Ökobilanz als Ethen- Äquivalent (C_2H_4-Äq.) angegeben.

Versauerungspotenzial von Boden und Wasser – AP

Die Versauerung von Böden und Gewässern entsteht überwiegend durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren. Daraus resultiert eine Verringerung des pH-Werts von Regenwasser und Nebel. Relevante Beiträge hierzu liefern Schwefeldioxid und Stickoxide mit ihren Säuren (H2SO4 und HNO3). Der „saure Regen“ schädigt sowohl Boden, Gewässer und Lebewesen, als auch Baustoffe und Bauwerke.

Das Versauerungspotenzial wird in Schwefeldioxid – Äquivalent (SO_2-Äq.) angegeben. Als Versauerungspotential (Acidification Potential - kurz AP) wir die Fähigkeit bestimmter Stoffe bezeichnet H+-Ionen zu bilden. Bestimmten Emissionen kann ein Versauerungspotenzial zugewiesen werden, indem die vorhandenen S-, N- und Halogenatome zur Molmasse der Emission ins Verhältnis gesetzt werden. Bezugssubstanz ist Schwefeldioxid. Bei der Bewertung der Versauerung ist zu berücksichtigen, dass es sich zwar um ein globales Problem handelt, die Effekte regional jedoch unterschiedlich ausfallen können

Eutrophierungspotenzial – EP
Bei diesem Kriterium wird das Überdünungspotential eines bestimmten Stoffes von Boden und Wasser beschrieben. Dazu tragen vor allem Phosphor- und Stickstoffverbindungen bei. Diese gelangen bei der Herstellung von Bauprodukten, vor allem aber durch Auswaschung von Verbrennungsemissionen und in der Landwirtschaft in die Umwelt. Dies führt zu verstärktem Algenwachstum und zur Abnahme der Biodiversität. Außerdem führen die Auswaschungsprozesse zu einem erhöhten Nitratgehalt im Grundwasser, und gelangen so ins Trinkwasser.

Das Eutrophierungspotential (Eutrification Potential – kurz EP) geht als Phosphat – Äquivalent (PO_4-Äq.) in die Bilanz ein. Wie beim Versauerungspotenzial ist auch beim Eutrophierungspotenzial zu berücksichtigen, dass die Effekte regional sehr unterschiedlich sind.

Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen – ADPE
Dieser Indikator beschreibt, wie stark durch die Herstellung eines Produktes der globale Bestand an nicht erneuerbaren Rohstoffen reduziert wird, zum Beispiel Metalle, Mineralien, Steine und Erden. Unter nicht erneuerbaren wird ein Zeitraum von 500 Jahren angesetzt.

Als Äquivalenz dient das Element Antimon (Stibium). Daher auch die Einheit [kg SB-Äq.]. Es zählt seit 2010 zu den 14 von der EU als kritisch eingestuften Rohstoffen. Antimon findet sich in vielen Produkten wieder oder wird für die Herstellung verwendet.

Potential für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe - ADPF
Mit dem abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe wird das Potential für den Abbau fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas dargestellt. Als nuklearer Brennstoff zählt Uran, das als radioaktives Schwermetall in natürlicher Form vorkommt und ebenfalls abgebaut wird.

Angegeben wird der spezifische Heizwert in [MJ].

2.4.3 Untersuchungsrahmen

Um die ökologischen Eigenschaften von Innendämmstoffen und Innendämmsystemen zu bewerten und zu vergleichen, sollen sowohl Untersuchungen an den verschiedenen Dämmstoffen und deren ökologischer Qualität durchgeführt werden, als auch an ganzen Innendämmsystemen.

2.4.3.1 Datensammlung

Als erster Schritt wurde eine umfassende Datenrecherche zu Ökobilanzen und EPDs für Dämmstoffe, welche Anwendung als Innendämmung finden, durchgeführt. Für die Betrachtung im gesamten System, sind neben den Daten für den Dämmstoff, auch noch Konstruktions- und Hilfsmittel, wie beispielsweise Trockenbaukonstruktionen, Putze, Anstriche, etc. notwendig.

Einen Großteil der Daten wurde aus der öffentlich zugänglichen Online- Datenbank Ökobaudat (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat) entnommen. Die Ökobaudat ist eine

verbindliche Datenbasis des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB). Die dort zur Verfügung stehenden EPDs diverser Bauprodukte stammen dabei von verschiedenen Quellen:

- IBU Institut für Bauen und Umwelt
- Ift Rosenheim
- Bau EPD GmbH
- Johann Heinrich von Thünen-Institut
- Thinkstep

Die auf der Ökobaudat veröffentlichten EPDs sind DIN EN 15804 konform und nach DIN EN ISO 14025 verifiziert. Generische Datensätze werden vor der Veröffentlichung einem „critical review“ durch einen externen Dritten unterzogen (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2017).

Neben den Werten aus der Ökobaudat wurden auf Literaturwerte aus Mötzl 2000 zurückgegriffen.

2.4.3.2 Systemgrenzen

Bei der Betrachtung der ökologischen Qualität von Innendämmmaterialen und –systemen wurden die Umweltauswirkungen von der Wiege zum Werkstor berücksichtigt (siehe Kapitel 2.4.3.2). Die Errichtung, Nutzung und Entsorgung wurden nicht betrachtet. Eine vollständige Bewertung des Lebenszyklus ist aufgrund der unzureichenden und unvollständigen Datenlage gegenwärtig nicht möglich.

2.4.3.3 Wahl der Wirkungskategorien

Zur Beurteilung der ökologischen Qualität wurden die beiden Wirkungskategorien Primärenergie nicht erneuerbar (PENRT), sowie das Treibhausgaspotential (GWP) betrachtet.

2.4.4 Ökologische Eigenschaften von Innendämmmaterialien

Als erster Schritt sollen die ökologischen Eigenschaften von Innendämmmaterialen ausgewertet und miteinander verglichen werden. Damit soll ein Überblick der vorhandenen Datengrundlage erhalten werden. Außerdem können so Rückschlüsse über mögliche Schwankungsbandbreiten der Kennwerte innerhalb einer Produktgruppe aufgezeigt werden.

2.4.4.1 Funktionseinheit

Wie bereits in Kapitel 2.4.1.2 dargestellt, muss zu Beginn einer Ökobilanz die funktionale Einheit definiert werden. Nun verhält es sich so, dass als funktionale Einheit in den betrachteten EPDs der Innendämmstoffe teilweise die Masse in kg, das Volumen in m³ oder die Fläche in einer bestimmten Plattenstärke in m² gewählt wurde. Um die Kennwerte miteinander vergleichen zu können, muss eine einheitliche Basis definiert, und die angegebenen Kennwerte umgerechnet werden.

Die zentrale Funktion eines Wärmedämmstoffes ist die Wärmedämmung. Als Funktionseinheit wird daher jene Menge an Dämmstoff herangezogen, welche für einen

Wärmedurchlasswiderstand von R = 1 m²K/W notwendig ist. Der Wärmedurchlasswiderstand ist definitionsgemäß gleich dem Quotienten aus der Dicke d und der Wärmeleitfähigkeit λ:

$$R = {}^{d}/_{\lambda}$$

Die recherchierten Kennwerte der Primärenergie „nicht erneuerbar“ und des Treibhausgaspotentials wurden für alle betrachteten Dämmstoffe auf den Dämmwert von R = 1 m²K/W umgerechnet.

2.4.4.2 Untersuchungsumfang

Bei dieser Analyse wurden sämtliche Dämmstoffe untersucht, welche zur Anwendung als Innendämmung möglich sind. Zu folgenden Materialien wurden die Kennwerte aus den in Kapitel 2.4.3.1 aufgeführten Quellen zusammengetragen:

Tab. 2-22: Übersicht der untersuchten ID-Materialien.

Material	Abkürzung	Produktgruppe	Rohdichte [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
Schaumglas	GC	Mineralisch	100 - 165	0,038 – 0,082
Steinwolle	MiWo	Mineralisch	28 - 94	0,035 – 0,04
Glaswolle	GWo	Mineralisch	18 - 40	0,032 – 0,04
Perlite		Mineralisch	60 - 90	0,042 – 0,06
Mineralschaum	M-Schaum	Mineralisch	115	0,042
Expandiertes Polystyrol	EPS	Synthetisch	16 - 30	0,031 – 0,035
Polyurethan	PU	Synthetisch	30 -32	0,023 - 0,027
Extrudiertes Polystyrol	XPS	Synthetisch	32 - 37	0,033 - 0,035
Holzfaser	WF	Natürlich	50 - 240	0,037 – 0,050
Zellulose - lose	ZF	Natürlich	28 - 65	0,039 – 0,045
Zellulose - Platten	ZP	Natürlich	80	0,04
Kork	KO	Natürlich	80 - 120	0,045 – 0,05
Hanf	HF	Natürlich	25 - 41	0,038 – 0,045

2.4.4.3 Auswertung innerhalb der Produktgruppen

Um einen Überblick der durchgeführten Datenerhebung zu erhalten, wurde eine graphische Auswertung der Kennwerte für die Erstellungsphase A1-3 durchgeführt. Dabei wurden die Kennwerte jeweils einer der folgenden Produktgruppen zugeordnet.

- Mineralische Innendämmmaterialien
- Synthetische Innendämmmaterialien
- Natürliche Innendämmmaterialien

In den nachfolgenden Abbildungen sind pro Materialgruppe die Einzelwerte als Punkte für PENRT in orange und GWP in blau dargestellt. Die Mittelwerte pro Materialgruppe und Indikator sind in Dreiecken abgebildet. Innerhalb der Produktgruppe unterscheiden sich die Materialien oft auch in ihrer Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit. Dies ist bei der Umrechnung auf die funktionale Einheit von R=1m²K/W zu beachten.

Mineralische Innendämmmaterialien

In Abb. 2-38 sind die Kennwerte für die mineralischen Innendämmmaterialien zusammengefasst. Die Datengrundlage für Schaumglas (GC), Mineralwolle (MiWo), Glaswolle (GWo) und Perlite ist recht groß. Innerhalb derselben Produktgruppe unterscheiden sich die Indikatoren PENRT und GWP teils sehr stark. Dies ist auf die unterschiedlichen Rohdichteklassen innerhalb der Produktgruppe zurückzuführen. Bei der Auswahl der Datengrundlage zur Ökobilanzierung ist daher darauf zu achten, dass das die Eigenschaften des gewählten Produktes möglichst mit dem der EPD übereinstimmen.

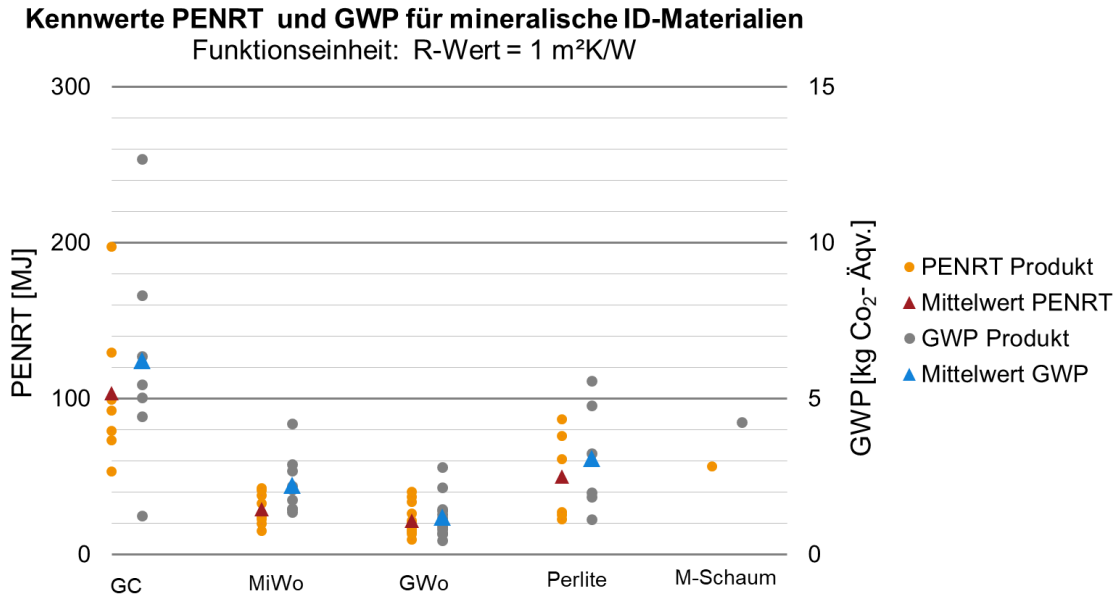


Abb. 2-38: PENRT und GWP für mineralische ID- Materialien.

Zusammenfassend kann man bei den betrachteten mineralischen Dämmstoffen feststellen, dass im Mittel die Umweltbelastungen der Schaumgläser im Vergleich am höchsten sind. Dies ist wohl auf die etwas schlechtere Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen. Die Werte für Mineralwolle, Glaswolle, Perlite und den Mineralschaum bewegen sich etwa im selben Bereich.

Synthetische Innendämmmaterialien

In Abb. 2-39 sind die Kennwerte für die synthetischen Innendämmmaterialien zusammengefasst. Auch bei dieser Produktgruppe ist eine gute Datengrundlage vorhanden. Die Kennwerte für XPS Dämmstoffe liegen im Mittel etwas über denen von EPS und PU. Im Allgemeinen unterscheiden sich die drei betrachteten synthetischen Dämmstoffe in Hinblick auf deren Umweltbelastungen für die Herstellung kaum.

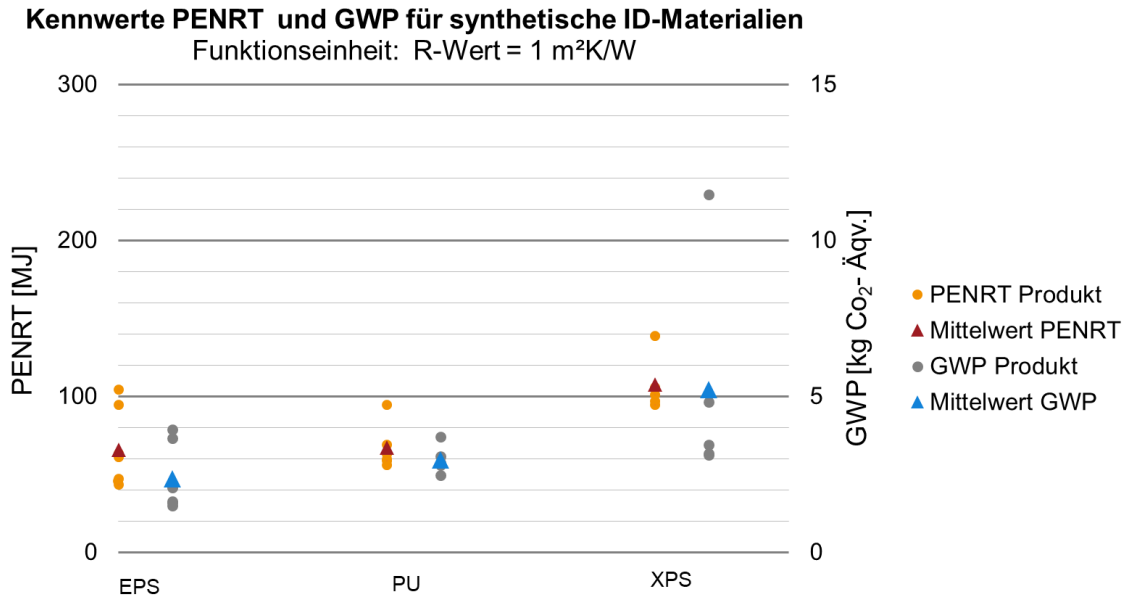


Abb. 2-39: PENRT und GWP für synthetische ID-Materialien.

Natürliche Innendämmmaterialien

Die Kennwerte für PENRT und GWP für die natürlichen ID-Materialien unterscheiden sich gleich auf den ersten Blick deutlich von den mineralischen und synthetischen. Dies liegt an den zum größten Teil negativen Werten für das Treibhauspotential. Die Gutschrift in der Herstellungsphase für diese Materialien ist auf das während des Wachstums der Rohstoffe eingebundene CO_2 zurückzuführen (siehe auch Erklärung Kapitel 2.4.2.4). Folgende natürliche Dämmstoffe werden betrachtet:

- Holzfaser (WF)
- Zellulose lose (ZF)
- Zelluloseplatten (ZP)
- Kork (KO)
- Hanf (HF)

Bei den betrachteten Holzfaserprodukten ist Schwankungsbreite sehr groß. Dies ist wiederum auf die großen Unterschiede der Rohdichte der verschiedenen Produkte zurückzuführen. Auch unterscheiden sich die Zelluloseprodukte. So weisen die zu Platten verpresste Faser etwas schlechtere Werte auf, als die losen Einblasprodukte.

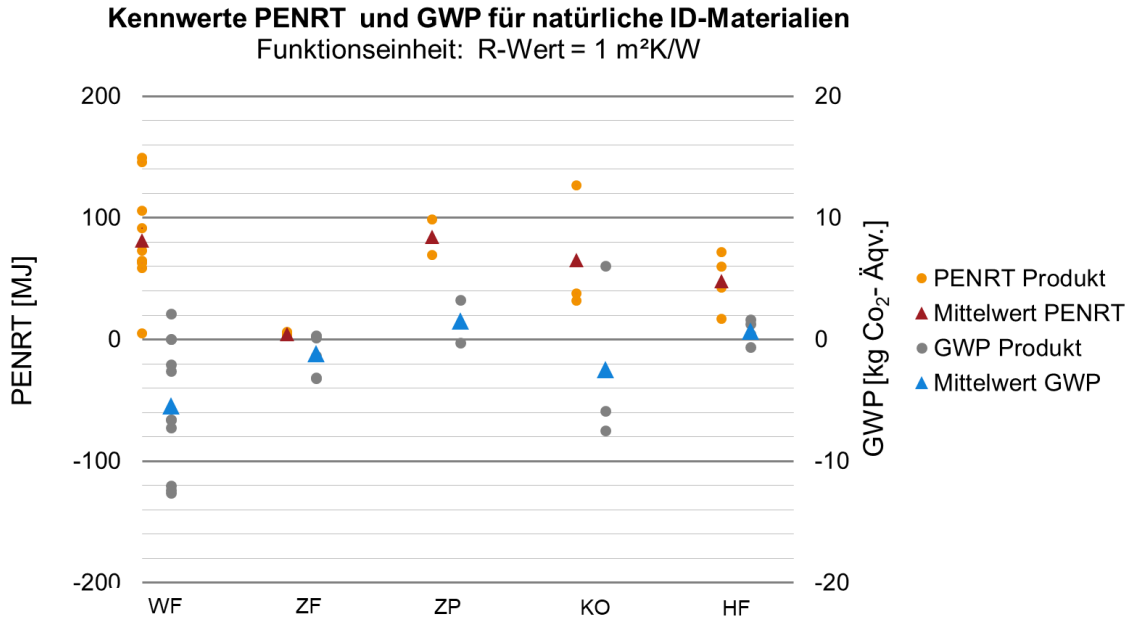


Abb. 2-40: PENRT und GWP für natürliche ID- Materialien.

2.4.5 Ökologische Qualität von Innendämmsystemen im Vergleich

Weiterführend zur Analyse der Datengrundlage und den unterschieden der einzelnen Produktgruppen, sollen in einer weiteren Untersuchung verschiedene Innendämmsysteme bilanziert und verglichen werden. Bei den betrachteten Systemen wurde in folgende drei Typen eingeordnet:

- Innendämmsysteme mit Vorsatzschale
- Innendämmsysteme mit Platten
- Plastische Innendämmsysteme

Bei der Auswahl der Dämmsysteme wurde darauf geachtet, dass sowohl erprobte und typische Systeme, welche bereits Anwendung in der Praxis finden, als auch Systeme mit neuen und innovativen Materialen, betrachtet werden.

2.4.5.1 Funktionseinheit Referenzwand

Oftmals wird bei Untersuchungen zur Ressourcenintensität als funktionale Einheit eine Fläche von 1 m² betrachtet. Diese Funktionseinheit liefert jedoch nur in begrenzten Bereichen hinreichend prüffähige Ergebnisse der einzelnen Wirkstoffgrößen. Bei der Wahl der funktionalen Einheit wurde sich daher an dem Vorgehen der TU Darmstadt (Technische Universität Darmstadt 2013) orientiert. In dieser Studie wurde die Funktionseinheit auf eine Wandfläche von 18 m² (B/H = 6 x 3 m) festgelegt. Da es sich vor allem bei den betrachteten Innendämmsystemen mit Vorsatzschale um inhomogene Konstruktionen handelt, können mit einer repräsentativen Fläche von 1m² folgende Einflussfaktoren nur bedingt erfasst werden:

- Ständerabstand
- Verbindungsmittel
- Anschlussausbildungen an Decke und Boden

Um die einzelnen Systeme besser miteinander vergleichen zu können, wurde bei dieser Betrachtung, im Gegensatz zu vorherigen Auswertungen, der Fokus auf die Konstruktionsstärke gelegt, und nicht auf die thermischen Eigenschaften. Es wurde daher pro Konstruktionstyp eine einheitliche Dämmstärke angenommen.

2.4.5.2 Mengenermittlung

Grundlage für eine Ökobilanzierung ist eine detaillierte Mengenermittlung. In Tab. 2-23 sind die festgelegten und recherchierten Berechnungsgrundlagen zusammengefasst. Diese Kenngrößen wurden zum Teil selbst definiert und zum Teil aus Produktdatenblättern übernommen.

Tab. 2-23: Grundlagen und Annahmen für Mengenermittlung.

Berechnungsgrundlage	
Größe Referenzwand (3x6m)	18 m²
Laufmeter CW-Ständer (11x3m)	33 lfm
Laufmeter UW-Ständer (2x6m)	12 lfm
Verschnitt Trockenbauständer	15 %
Verschnitt Plattenwerkstoffe	10 %
Bedarf Fugenspachtel[1]	0,3 kg/m²
Bedarf Leichtmörtel für Verklebungen[2]	3,5 kg/m²
Bedarf Innenputz für 10 mm[3]	11 kg/m²
Bedarf Schnellbauschrauben[4]	192 Stck. à 1,45 g
Ergiebigkeit Armierungsputz[5]	0,8 l/kg
Bedarf Armierungsgewebe[6]	1,1 m²/m²
Bedarf Bitumenkleber[7]	4 kg/m²

2.4.5.3 Datengrundlage

Für eine transparente und nachvollziehbare Dokumentation werden im Folgenden die für die weiteren Bilanzierungen der gewählten Ökobilanz Kennwerte sowie deren Datengrundlage für die Erstellungsphasen A1 – A3 aller notwendigen Materialien und Komponenten zusammengefasst. In Tab. 2-24 sind dabei die Konstruktionsmaterialien sowie Hilfsmittel, in Tab. 2-25 die Innendämmstoffe zusammengefasst. Wie im vorangegangenen Kapitel 2.4.4

[1] Materialverbrauch gemäß Produktdatenblatt „VARIO Fugenspachtel“, Stand 08.01.2013

[2] Materialverbrauch gemäß Verarbeitungsanleitung „Ytong Mulitpor Dämmplatte, Ausgabe 04/2012

[3] Materialverbrauch 8-11 kg/m² gemäß EPD Gipsputz Bundesverband Gipsindustrie (EPD-BVG-20140073-IAG1-DE)

[4] Schraubenabstand: CW-Ständer = 0,25m, UW-Ständer = 0,20 m

[5] Ergiebigkeit 0,80 – 0,95 l/kg gemäß EPD Putzmörtel-Armierungsputz des IWM (EPDIWM20130245IBG1DE)

[6] Materialverbrauch gemäß Produktdatenblatt „webertherm A 100 WDVS“

[7] Materialverbrauch 3,5 – 4,5 kg/m² gemäß Produktdatenblatt „Foamglas PC 56 Bitumenkaltkleber“, Stand 26.11.2015

dargestellt, gibt es, je nach Dämmstoff, unterschiedlichste Datenquellen mit teils sehr unterschiedlichen Kennwerten für die Ökobilanzierung.

Bei der Auswahl der Daten wurde daher darauf geachtet, dass das Produkt in seiner Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit einem typischen Innendämmmaterial entspricht.

Tab. 2-24: Kennwerte PENRT und GWP für Herstellungsphasen A1 – A3 – Trockenbau, Kleber, Mörtel, Putze.

Material	Datengrundlage	Deklarierte Einheit	PENRE [MJ]	GWP [kg Co2-Äqv.]
CW-/UW- Profile	EPD-PTW-20130218-ICB1-DE	lfm	21,40	1,52
Gipskartonplatte	EPD-BVG20140075-IAG1-DE	m²	32,21	2,09
Dampfbremse	Ökobaudat	m²	14,39	0,45
Schrauben	EPD-EJO-20140112-IBC1-DE	kg	41,40	2,91
Fugenspachtel	EPD-BVG20140072-IAG1-DE	kg	1,66	0,11
Leichtmörtel	EPD-IWM-20130244_iBG1-DE	kg	3,36	0,38
Armierungsgewebe	EPD-VIT-20160008-IAC1-DE	m²	9,89	0,55
Innnenputz	EPD-BVG20140073-IAG1-DE	kg	2,12	0,14
Bitumen Kaltkleber	Ökobaudat	kg	51,61	0,66
Lehmputz	Ökobaudat	kg	1,097	0,14
Armierungsputz	EPD-IWM-20130245-IBG1-DE	kg	5,04	0,45

Tab. 2-25: Kennwerte PENRT und GWP für Herstellungsphasen A3–A3 – Innendämmstoffe.

Material	Datengrundlage	Deklarierte Einheit	PENRT [MJ]	GWP [kg Co2-Äqv.]
Mineralwolle	EPD-ISOVER-2014-1	m³	543,00	31,90
Zellulose	ECO EPD Ref. No. 00000055	m³	165,40	-81,10
Hanf	Ökobaudat	m³	1592,00	36,23
Aerogel	S-P-00725	m² (d=10mm)	231,00	12,80
Mineraldämmplatte	EPD-XEL-20140218-CAD1-DE	m³	1350,00	101,00
Holzfaser	EPD-GTX-20140222-IBC2-DE	m³	1563,01	-123,24
EPS weiß	EPD-IVH-20140138-IBB1-DE	m³	1810,00	59,50
EPS grau	EPD-IVH-20140137-IBB1-DE	m³	1420,00	49,70
Schaumglas	EPD-PCE-20150042-IBA1-DE	kg	19,80	1,26
Vakuumpaneel	EPD-POR-20140214-IBC1-DE	m² (d=25mm)	728,73	42,20
PUR	EPD-IVP_20160147-IBE1-DE	kg	16,55	15,05
XPS	EPD-FPX-20140157-IBE1-DE	kg	293,65	9,88
PUR alukaschiert	EPD-IVP-20140207-IBE1-DE	kg	78,00	3,75
Expandierter Kork	Ökobaudat	m³	635,80	-117,80
Aerogel- Dämmputz	AEPDFIX15001	kg	66,10	4,25
Mineralischer Dämmputz	EPD-IWM-20130246-IBG1-DE	kg	7,94	0,97

2.4.5.4 Ergebnisse der Ökobilanzierung

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Ökobilanzierungen sowohl in tabellarischer Form mit Einzelergebnissen der jeweiligen Komponenten als auch graphisch im Vergleich dargestellt.

Ökologische Analyse von Konstruktionen mit Vorsatzschale
Bei dieser Konstruktionsart wird die Dämmschicht mit Hilfe einer Vorsatzkonstruktion in Trockenbauweise angebracht. Dabei wird das in der Regel weiche und flexible Dämmmaterial zwischen die Trockenbauständerkonstruktion eingeklemmt. Um Wärmebrücken möglichst zu vermeiden, werden die Ständer nicht direkt an die Außenwand montiert. Für einen besseren Wärmeschutz, kann auch eine zusätzliche Dämmebene zwischen Bestandswand und Ständerkonstruktion ausgeführt werden. Eine vollflächige angebrachte feuchtevariable Dampfbremse verleiht der Konstruktion Schutz vor zusätzlichem Feuchteeintrag von der Raumseite. Den raumseitigen Abschluss bildet eine Beplankung aus Gips- oder Gipsfaserplatten. In Abb. 2-41 sind die beiden Versionen kurz skizziert.

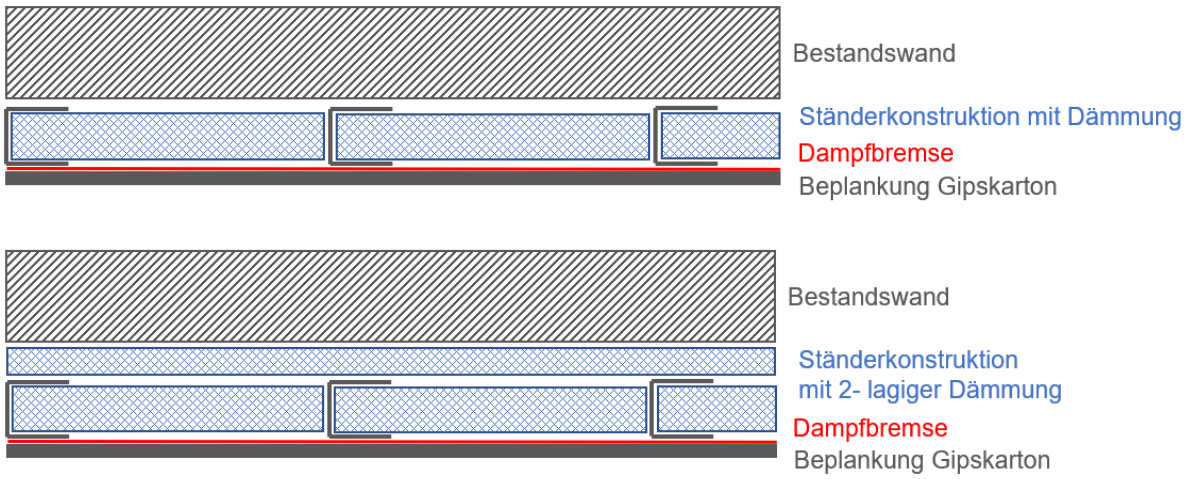


Abb. 2-41: Prinzip Skizze Konstruktion mit Vorsatzschale, Quelle: eigene Darstellung FIW München.

Diese Konstruktionsart bietet den Vorteil, dass bei einer Sanierung der Raum in der Dämmebene für Installationsleitungen verwendet werden kann. Zudem kann, bei korrektem Einbau, die Schalldämmung der Bestandskonstruktion verbessert werden. Bei Verwendung von ausschließlich nicht brennbaren Materialien, leistet die Vorsatzschale darüber hinaus einen wertvollen Beitrag zum vorbeugenden Brandschutz.

Bei der Bilanzierung der betrachteten fünf Konstruktionen mit Vorsatzschale wurde eine einheitliche Dämmstärke von 6 cm bei den Aufbauten mit Mineralwolle, Zellulose und Hanf angenommen. Bei den beiden Hochleistungsdämmstoffen Aerogel und Vakuumpaneel wäre diese Dämmstärke nicht realistisch und aufgrund der sehr geringen Wärmeleitfähigkeit auch nicht notwendig. Bei diesen Dämmstoffen wurde eine praxisgerechte Dämmstärke von 3, bzw. 2,5 cm angesetzt. In Tab. 2-26 bis Tab. 2-30 sind die Ergebnisse der Ökobilanzen für die Konstruktionen mit Vorsatzschale zusammengefasst.

Tab. 2-26: Ökobilanz Vorsatzschale mit Mineralwolle.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Mineralwolle	0,06	m³	1,23[8]	666,59	39,16
CW-/UW- Profile	-	lfm	51,75	1.107,45	78,66
Dampfbremse	-	m²	19,80	284,92	8,84
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Schrauben	-	kg	0,28	11,53	0,81
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**2.717,21**	**169,45**

Tab. 2-27: Ökobilanz Vorsatzschale mit Zellulose.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Zellulose	0,06	m³	1,19	196,50	-96,35
CW-/UW- Profile	-	lfm	51,75	1.107,45	78,66
Dampfbremse	-	m²	19,80	284,92	8,84
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Schrauben	-	kg	0,28	11,53	0,81
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**2.247,11**	**33,94**

Tab. 2-28: Ökobilanz Vorsatzschale mit Hanf.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Hanf	0,06	m³	1,23	1.954,34	44,48
CW-/UW- Profile	-	lfm	51,75	1.107,45	78,66
Dampfbremse	-	m²	19,80	284,92	8,84
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Schrauben	-	kg	0,28	11,53	0,81
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**4.004,96**	**174,77**

[8] Annahme: Übermaß für weiche Faserplatten= 2 cm pro Ständerzwischenraum

Tab. 2-29: Ökobilanz Vorsatzschale mit Aerogeldämmstoff.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Aerogel	0,03	m²	59,40	13.721,40	760,32
CW-/UW- Profile	-	lfm	51,75	1.107,45	78,66
Dampfbremse	-	m²	19,80	284,92	8,84
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Schrauben	-	kg	0,28	11,53	0,81
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**15.772,02**	**890,61**

Tab. 2-30: Ökobilanz Vorsatzschale mit VIP.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Vakuumpaneel	0,025	m²	16,76[9]	12.212,06	707,19
PUR- Rahmen	0,025	kg	40,99[10]	678,44	616,96
XPS - Beschichtung	2 x 0,005	kg	6,23	1.828,85	61,53
CW-/UW- Profile	-	lfm	51,75	1.107,45	78,66
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Schrauben	-	kg	0,28	11,53	0,81
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**16.485,05**	**1.507,13**

Die Ergebnisse der PENRT aus den vorangegangenen Tabellen sind in Abb. 2-42 dargestellt. Dabei wurden die Ergebnisse der Trockenbauelemente kumuliert in orange und die der Dämmebene in blau dargestellt. So kann man den Anteil des Dämmstoffes an der Gesamtkonstruktion ablesen. Die Anteile der Trockenbauteile verhalten sich in allen Varianten in etwa gleich. Bei den Dämmstoffen sind jedoch deutliche Unterschiede erkennbar. Vor allem die beiden Hochleistungsdämmstoffe weisen sehr hohe PENRT Werte für die Herstellungsphase auf, obwohl diese im Vergleich zu den anderen Konstruktionen deutlich geringere Dämmstärken aufweisen. Um die jeweilige Dämmleistung des gesamten Innendämmsystems aufzuzeigen, sind die jeweiligen Wärmedurchgangswiderstände der gesamten Konstruktion auf des Sekundärachse in grauer Farbe aufgetragen. Bei den Ergebnissen des Treibhauspotentials in Abb. 2-43 verhält es sich ähnlich wie bei PENRT.

[9] Entspricht 93,1% der Fläche

[10] Entspricht 6,9% der Fläche

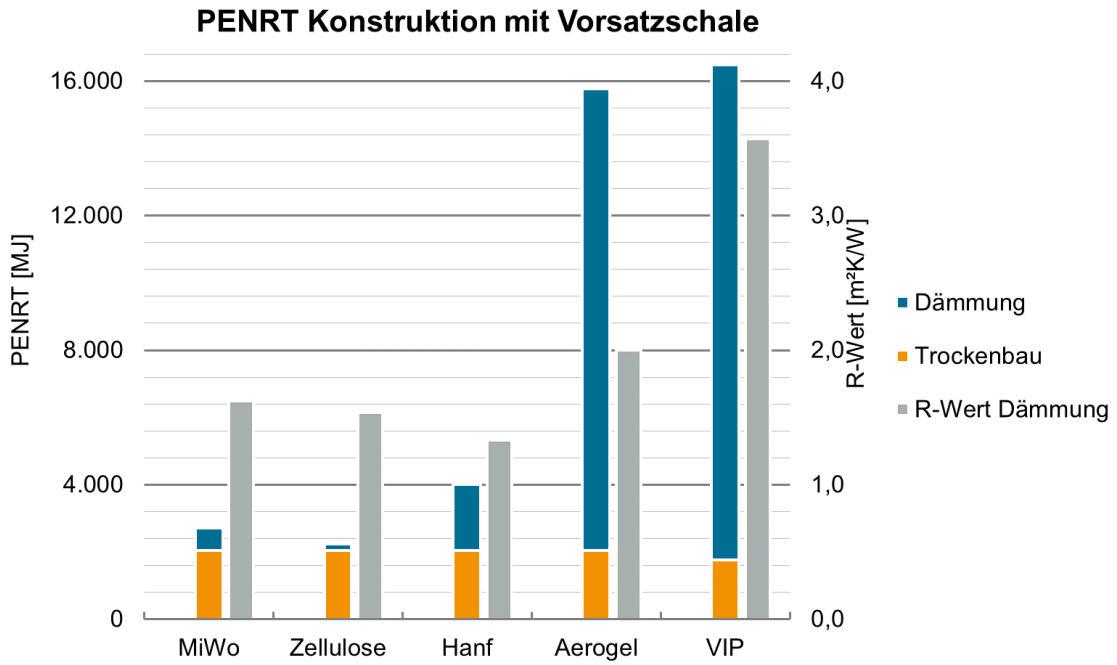


Abb. 2-42: Ergebnisse PENRT Konstruktionen mit Vorsatzschale.

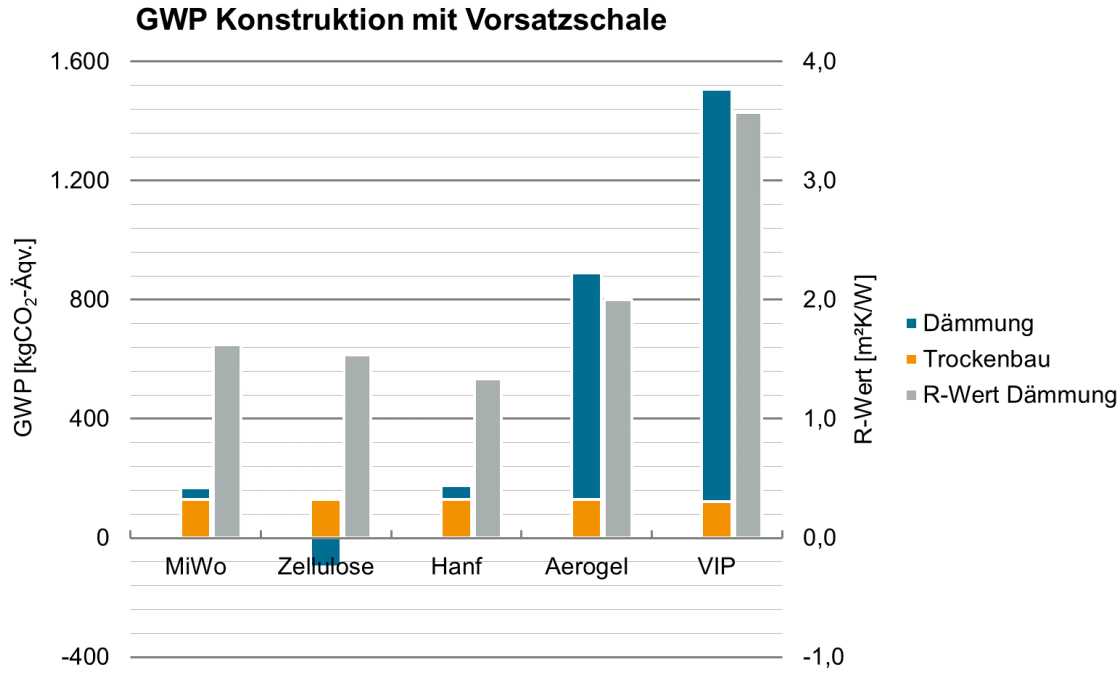


Abb. 2-43: Ergebnisse GWP Konstruktionen mit Vorsatzschale.

Ökologische Analyse von Innendämmsystemen mit Plattendämmstoffen

Bei Innendämmkonstruktionen mit Plattenwerkstoffen wird das Dämmmaterial direkt auf der Bestandswand befestigt. In den allermeisten Fällen wird der Dämmstoff dabei verklebt.

Feuchteregulierende Innendämmsysteme (z.B. Holzfaser) müssen raumseitig austrocknen können. Eine hoch diffusionsoffene Beschichtung ist hier unbedingt notwendig. Nicht feuchteregulierende oder gar dampfdichte Varianten (z.B. Schaumglas) sind in ihrer Belegung völlig frei und bieten in ihrer Oberfläche viel Gestaltungs- und Nutzungsfreiraum. In Abb. 2-44 sind die einzelnen Schichten der Konstruktion schematisch dargestellt. Ein Vorteil dieser Konstruktionsart liegt im geringen Platzverbrauch (im Vergleich zu Konstruktionen mit Vorsatzschale).

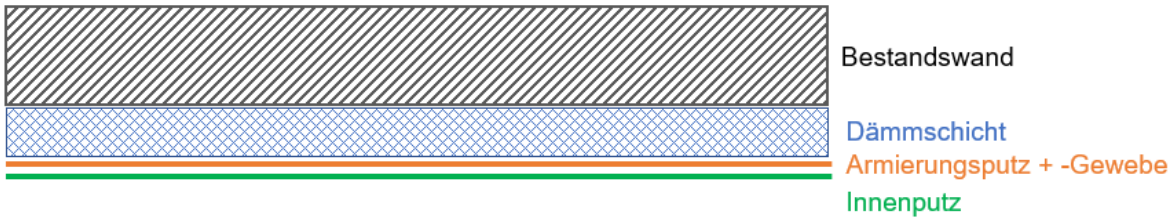


Abb. 2-44: Prinzip Skizze Konstruktion mit Plattendämmstoff.

In den Tab. 2-31 bis Tab. 2-37 sind die Ergebnisse der Ökobilanzierungen für die Herstellungsphasen A1 – A3 dargestellt.

Tab. 2-31: Ökobilanz Konstruktion mit Mineraldämmplatte.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Leichtmörtel	-	kg	63,00	211,68	23,69
Mineraldämmplatte	0,06	m³	1,19	1.603,80	119,99
Armierungsputz	0,005	kg	112,50	567,00	50,51
Armierungsgewebe	-	m²	19,80	195,82	10,87
Innenputz	0,01	kg	198,00	419,76	27,72
Summe				**2.998,06**	**232,78**

Tab. 2-32: Ökobilanz Konstruktion mit Holzfaser.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Leichtmörtel	-	kg	63,00	211,68	23,69
Holzfaser	0,06	m³	1,19	1.856,85	-146,41
Armierungsputz	0,005	kg	112,50	567,00	50,51
Armierungsgewebe	-	m²	19,80	195,82	10,87
Innenputz	0,01	kg	198,00	419,76	27,72
Summe				**3.251,11**	**-33,61**

Tab. 2-33: Ökobilanz Konstruktion mit EPS- Verbundplatte weiß.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Leichtmörtel	-	kg	63,00	211,68	23,69
EPS weiß	0,06	m³	1,19	2.1250,28	70,69
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**3.008,68**	**136,35**

Tab. 2-34: Ökobilanz mit EPS- Verbundplatte grau.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Leichtmörtel	-	kg	63,00	211,68	23,69
EPS grau	0,06	m³	1,19	1.686,96	59,04
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**2.545,36**	**124,71**

Tab. 2-35: Ökobilanz Innendämmung mit Schaumglas.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Bitumenkleber	-	Kg	72,00	3.716,10	48,00
Schaumglas	0,06	Kg	118,80	2.352,24	149,69
Armierungsputz	0,005	Kg	112,50	567,00	50,51
Armierungsgewebe	-	m²	19,80	195,82	10,87
Innenputz	0,01	kg	198,00	419,76	27,72
Summe				**7.250,92**	**286,79**

Tab. 2-36: Ökobilanz Innendämmung mit PUR.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Leichtmörtel	-	kg	63,00	211,68	23,69
PUR alukaschiert	0,06	kg	36,83	2.872,58	138,11
Gipskartonplatte	0,0125	m²	19,80	637,76	41,38
Fugenspachtel	-	kg	5,40	8,96	0,59
Summe				**3.730,99**	**203,77**

Tab. 2-37: Ökobilanz Innendämmung mit Kork.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Leichtmörtel	-	kg	63,00	211,68	23,69
Expandierter Kork	0,06	m³	1,19	755,33	-139,95
Lehmputz	0,015	kg	243,00	266,57	33,58
Summe				**478,25**	**57,27**

In Abb. 2-45 und Abb. 2-46 sind die Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Herstellungsphasen A1-A3 für Innendämmkonstruktionen mit Plattenwerkstoffen graphisch dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse für PENRT und GWP wurden dabei in zwei Teile geteilt. Zum einen wurde der Anteil, welcher auf die Befestigung und der Verputzung entfällt in orange dargestellt. Zum anderen wurde der Anteil des Dämmstoffs in blauer Farbe dargestellt. So erhält man einen schnellen Eindruck vom Verhältnis der Umwelteinflüsse dieser beiden Komponenten. Da bei dieser Betrachtung die Funktionseinheit auf 1 m² mit einer identischen Dämmstärke von 6 cm definiert ist, wurde der jeweilige R-Wert der Dämmung in grauer Farbe noch angegeben.
Beim Betrachten der beiden Grafiken fällt auf, dass die Ergebnisse für PENRT für die Mineraldämmplatte, Holzfaser, EPS weiß und grau, sowie PUR nur in etwa im selben Bereich liegen. Der deutlich höhere Wert für die Schaumglaskonstruktion ist vor allem auf die Bitumenabdichtung zurückzuführen.
Bei den GWP fallen die negativen Werte der Dämmschichten bei den beiden nachwachsenden Materialien Holzfaser und Kork auf.

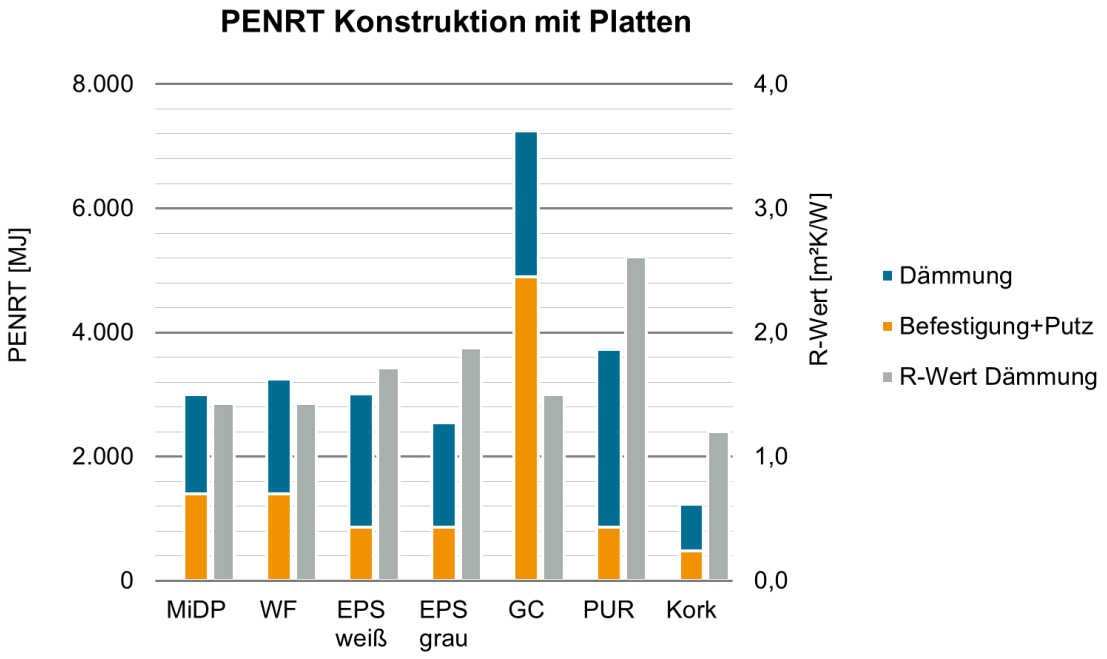


Abb. 2-45: Vergleich PENRT der Innendämmkonstruktionen mit Plattenwerkstoffen.

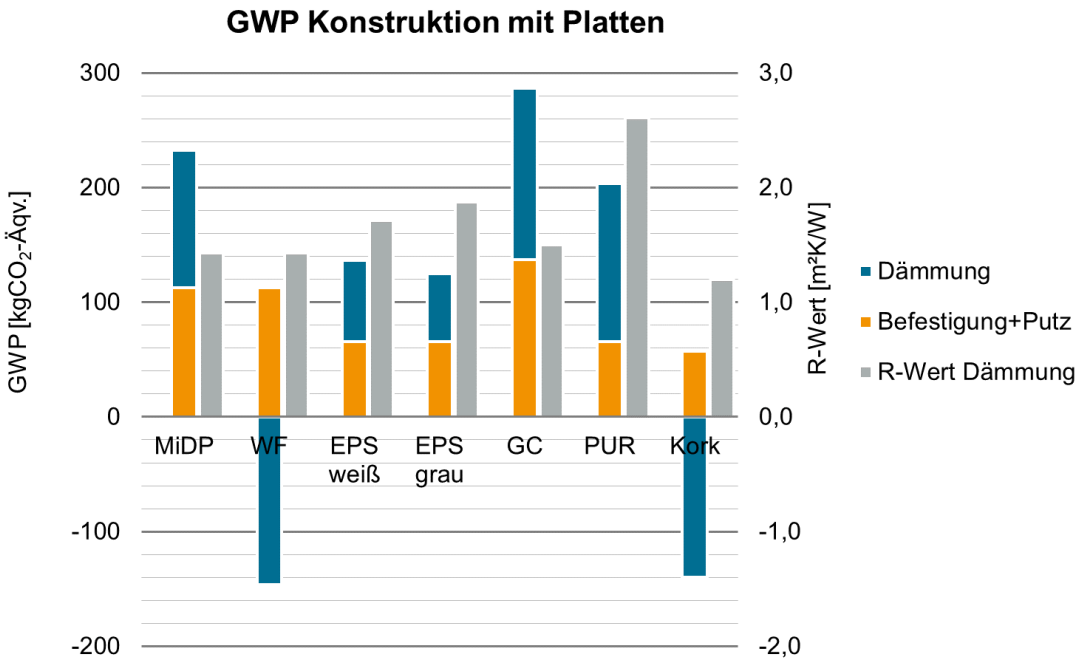


Abb. 2-46: Vergleich GWP der Innendämmkonstruktionen mit Plattenwerkstoffen.

Ökologische Analyse von plastischen Innendämmsystemen

Bei den plastischen Innendämmsystemen handelt es sich um mineralische Wärmedämmputze, bestehend aus einem bis zu 100 mm dicken wärmedämmenden Unterputz, einer Armierungsschicht und einem mineralischen Oberputz. Mit Wärmedämmputzsystemen können fugenlose und homogene Dämmschichten ausgeführt werden. Aufgrund der flexiblen Schichtdicke können Untergrundebenheiten gut ausgeglichen werden. Die Systeme sind kapillaraktiv und diffusionsoffen.

In Tab. 2-38 sind die Ergebnisse der Ökobilanz für einen Hochleistungsdämmputz zusammengefasst. Dabei handelt es sich um einen mineralischen Putz mit Zuschlägen aus Aerogelgranulat. In Tab. 2-39 sind die Ergebnisse für einen konventionellen mineralischen Dämmputz aufgeführt. Es wurde in beiden Fällen von einer Schichtdicke des Dämmputzes von 4 cm ausgegangen.

Tab. 2-38: Ökobilanz Innendämmung mit Aerogel- Dämmputz.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Aerogel- Dämmputz	0,04	kg	158,40	10.470,24	673,20
Armierungsputz	0,005	kg	112,50	567,00	50,51
Armierungsgewebe	-	m²	19,80	195,82	10,87
Innenputz	0,01	kg	198,00	419,76	27,72
Summe				**11.652,82**	**762,30**

Tab. 2-39: Ökobilanz Innendämmung mit mineralischem Dämmputz.

Schicht / Bauteil	Dicke [m]	Deklarierte Einheit	Menge für Referenzwand	PENRT [MJ]	GWP [kgCO_2-Äqv.]
Mineralischer Dämmputz	0,04	kg	432,00	3.430,08	418,61
Armierungsputz	0,005	kg	112,50	567,00	50,51
Armierungsgewebe	-	m²	19,80	195,82	10,87
Innenputz	0,01	kg	198,00	419,76	27,72
Summe				**4.612,66**	**507,71**

In Abb. 2-47 und Abb. 2-48 sind die Ergebnisse nochmals graphisch ausgewertet. Wieder wurden die Ergebnisse für den Dämmputz an sich separat von denen für „Hilfsstoffe, in diesem Fall für die Armierungsschicht und den Innenputz, dargestellt. Aufgrund der Aerogelzuschläge weist der Hochleistungsdämmputz deutlich höhere Ergebnisse für PENRT und GWP auf. Im Gegenzug können mit der gewählten Dämmstärke von 4 cm etwa sieben Mal höhere Wärmedurchgangswiderstände erreicht werden.

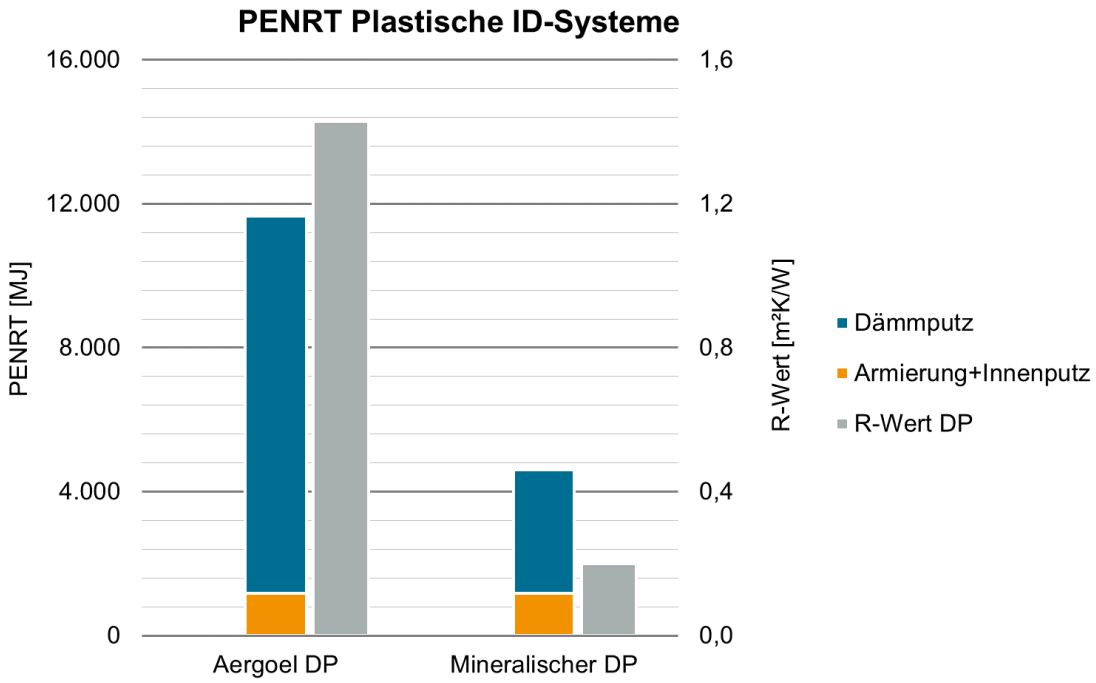


Abb. 2-47: Vergleich PENRT plastischer Innendämmsysteme.

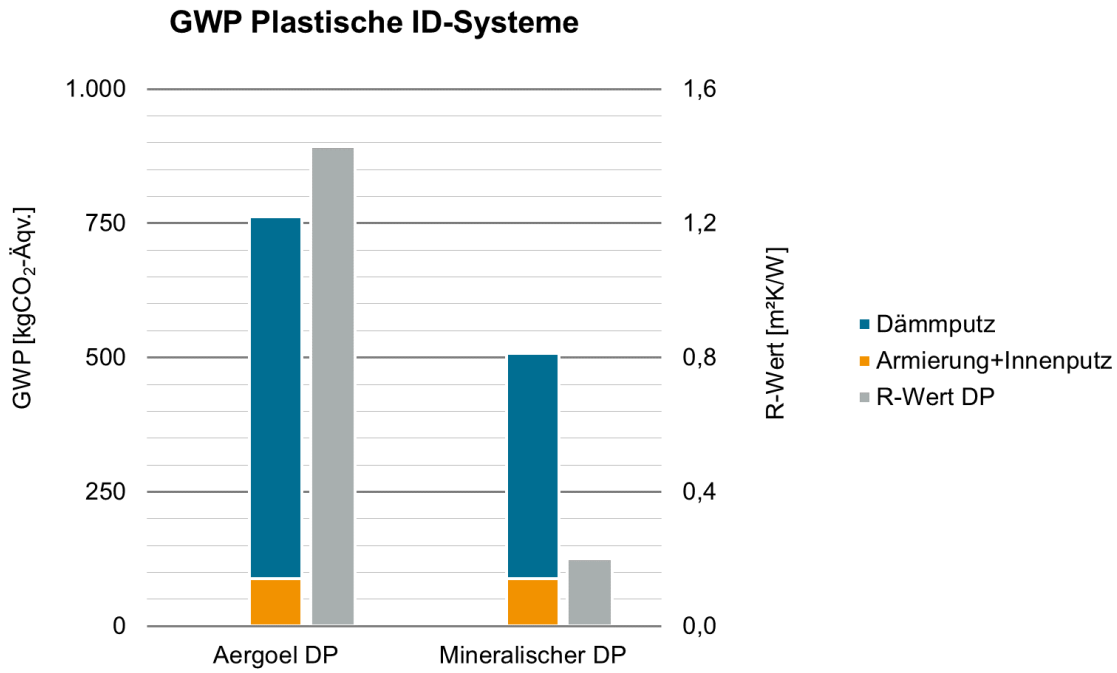


Abb. 2-48: Vergleich GWP plastische Innendämmsysteme.

2.4.6 Zusammenfassung und Fazit

Wie die Auswertungen in Kapitel 2.4.4 zeigen, ist eine sehr große Datengrundlage an Produktdeklarationen für verschiedenste Dämmstoffe vorhanden. Allerdings beschränken sich die deklarierten Kennwerte vor allem auf die Lebenszyklusphasen der Herstellungsphase (A1-A3). Für die darauffolgenden Phasen der Errichtung, Nutzung, Entsorgung, sowie der Wiederverwendung sind nur sehr wenig Daten vorhanden. Eine vollumfängliche Bewertung und Vergleich der verschiedenen Materialien über den Lebenszyklus sind daher nur schwer möglich.

Wie die Auswertungen in 2.4.4.3 zeigen, sind die Unterschiede innerhalb einer Produktgruppe teils recht groß. Dies ist vor allem auch auf die teilweise sehr unterschiedlichen Rohdichten zurückzuführen. Die Datensätze sollten daher sorgefältig ausgewählt werden und die physikalischen Eigenschaften mitberücksichtigt werden.

Für die Bewertung und den Vergleich von ganzen Innendämmsystemen (Kapitel 2.4.5) ist die Wahl der Funktionseinheit entscheidend für die Aussagekraft. So können abweichende Ergebnisse erzielt werden, je nachdem ob die Konstruktion nach ihrer Dämmleistung oder Ihrer Konstruktionsdicke bewertet werden. Auch sollten neben der sorgsamen Auswahl der Kennwerte für die Dämmstoffe auch die Konstruktionsmaterialien mit Bedacht gewählt werden. Diese haben, je nach Konstruktionstyp, einen sehr hohen Anteil am Gesamtsystem.

2.5 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Anzahl der auf dem Markt verfügbaren Dämmstoff-Produkte je Materialgruppe. 9
Abb. 2-2: Anteile der untersuchten Dämmstoffe, Unterscheidung nach Art der Rohstoffe (organisch oder anorganisch) bzw. nach Art der Herstellung (natürlich oder synthetisch). 10
Abb. 2-3: Marktanteile verschiedener Materialien am gesamtem Dämmstoffmarkt in Deutschland (links) und Anteile verwendeter Dämmmaterialien bei 33 Referenzobjekten mit Innendämmungen (rechts). 11
Abb. 2-4: Wärmeleitfähigkeiten [W/mK] der einzelnen Materialgruppen für Innendämmungen. .13
Abb. 2-5: Wasserdampfdiffusionswiderstand [-] sowie Kapillaraktivität der einzelnen Materialgruppen für Innendämmungen. 16
Abb. 2-6: Unterschiedliche Phasen der Feuchtespeicherung und damit verbundene Speicher- und Transportmechanismen. 24
Abb. 2-7: Links: Wärmeübertragung in einem porösen Material (λc,g = Wärmeleitfähigkeit in der Gasphase, λc,s = Wärmeleitfähigkeit des Feststoffs, λr = Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung in den Porenräumen, λco = Wärmeübertragung durch Konvektion (in Anlehnung an Schild und Willems 2011); Rechts oben: Verringerung des Wärmeübergangswiderstandes zwischen zwei Partikeln durch adsorbiertes Wasser; Rechts unten: Kurzschluss zwischen Partikeln durch adsorbiertes oder flüssig vorliegendes Wasser. 25
Abb. 2-8: Prinzipskizze zum Zweiplattenverfahren. 28
Abb. 2-9: Prinzipskizze zum Wärmestrommessplattengerät. 28
Abb. 2-10: Exemplarischer Verlauf der Wärmeströme bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von feuchten Stoffen unter stationären Temperaturbedingungen, Phase konstanter Verdunstung auf der Warmseite ohne Rücktransport (A), Übergangsphase (B) und Phase konstanter Wärmeströme bei abgeschlossener Umlagerung des Feuchteprofils (C) (eigene Darstellung des FIW München in Anlehnung an ISO 10051:1996) 30
Abb. 2-11: Funktionsprinzip einer kondensattolerierenden, diffusionsoffenen Innendämmung: Exemplarischer Temperaturverlauf und möglicher Tauwasseranfall in einem nachträglich innengedämmten Mauerwerk. 33
Abb. 2-12: Feuchtespeicherfunktionen der untersuchten Materialien (Orange = Material 1, Blau = Material 2, Grau = Material 3). 34
Abb. 2-13: Wassergehalt [kg/m³] im Jahresverlauf in jedem Zentimeter Dämmschicht am Standort Holzkirchen bei 8 cm Dämmstärke für alle drei Materialien; Pos1 = Erster Zentimeter der Dämmung, Kaltseite; Pos 8 = Achter Zentimeter Dämmung, Warmseite; Mean = Mittelwert über die gesamte Dämmstoffschicht; Links: Normale innere Feuchtelast; Rechts: Hohe innere Feuchtelast. 43
Abb. 2-14: Wärmeleitfähigkeit der drei Materialien in Abhängigkeit des Feuchtegehalts von trockenem Zustand bis zum völligen Untertauchen. 45
Abb. 2-15: Wärmeleitfähigkeit von Material 1 in Abhängigkeit des Feuchtegehalts im Jahresverlauf in der kritischen Dämmstoffschicht (Kaltseite) sowie Wärmeleitfähigkeit trocken (hellrote Linie) und Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. (dunkelrote Linie). 46

Abb. 2-16: R-Wert [m²K/W] der gesamten Dämmstoffschicht für Material 1 sowie prozentuale Änderung der Varianten gegenüber dem Referenzwert (80 % r.F.). 47
Abb. 2-17: Wärmeleitfähigkeit von Material 2 in Abhängigkeit des Feuchtegehalts im Jahresverlauf in der kritischen Dämmstoffschicht (Kaltseite) sowie Wärmeleitfähigkeit trocken (hellrote Linie) und Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. (dunkelrote Linie).....50
Abb. 2-18: R-Wert [m²K/W] der gesamten Dämmstoffschicht für Material 2 sowie prozentuale Änderung der Varianten gegenüber dem Referenzwert (80 % r.F.) für unterschiedliche Feuchtezuschläge (b). 51
Abb. 2-19: Wärmeleitfähigkeit von Material 3 in Abhängigkeit des Feuchtegehalts im Jahresverlauf in der kritischen Dämmstoffschicht (Kaltseite) sowie Wärmeleitfähigkeit trocken (hellrote Linie) und Wärmeleitfähigkeit bei 80 % r.F. (dunkelrote Linie). 55
Abb. 2-20: R-Wert [m²K/W] der gesamten Dämmstoffschicht für Material 3 sowie prozentuale Änderung der Varianten gegenüber dem Referenzwert (80 % r.F.) für unterschiedliche Feuchtezuschläge (b). 56
Abb. 2-21: Heliumpyknometer zur Bestimmung der Reindichte. 61
Abb. 2-22: Aluminiumschalen mit Dämmstoffen im Klimaraum. 62
Abb. 2-23: Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit im Feuchtbereich. 64
Abb. 2-24: Abgedichtete Probe im Wasserbad während der Messung. 65
Abb. 2-25: Abgedichtete Probe bei der Messung des Trocknungsverlaufs. 66
Abb. 2-26: Versuchsanordnung für den KAPI Test. 68
Abb. 2-27: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (KAPI-Test). 69
Abb. 2-28: Sorptionsisothermen der Dämmstoffe. 71
Abb. 2-29: Feuchtetransportvorgänge bei diffusionsoffenen Dämmstoffen – auf der linken Seite mit diffusionshemmender Schicht – auf der rechten Seite ohne diffusionshemmende Schicht. 72
Abb. 2-30: Feuchtetransportvorgänge bei kapillaraktiven Dämmstoffen. 73
Abb. 2-31: Feuchteverteilung in der Holzfaserdämmplatte (Trockenverfahren), Standardszenario. 77
Abb. 2-32: Bezogene Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes. 77
Abb. 2-33: Lebenszyklus eines Bauproduktes, Darstellung des FIW München in Anlehnung an PE International 2011). 79
Abb. 2-34: Phasen der Ökobilanz, Eigene Darstellung nach DIN EN ISO 14040. 81
Abb. 2-35: Phasen des Lebenszyklus, Eigene Darstellung nach DIN EN 15804. 83
Abb. 2-36: Wirkungsmechanismus Treibhauseffekt, Darstellung des FIW München in Anlehnung an PE International 2011). 85
Abb. 2-37: Wirkungsmechanismus Ozonabbau, Darstellung des FIW München in Anlehnung an PE International 2011). 86
Abb. 2-38: PENRT und GWP für mineralische ID- Materialien. 90
Abb. 2-39: PENRT und GWP für synthetische ID-Materialien. 91
Abb. 2-40: PENRT und GWP für natürliche ID- Materialien. 92
Abb. 2-41: Prinzip Skizze Konstruktion mit Vorsatzschale, Quelle: eigene Darstellung FIW München. 96
Abb. 2-42: Ergebnisse PENRT Konstruktionen mit Vorsatzschale. 99
Abb. 2-43: Ergebnisse GWP Konstruktionen mit Vorsatzschale. 99
Abb. 2-44: Prinzip Skizze Konstruktion mit Plattendämmstoff. 100

Abb. 2-45: Vergleich PENRT der Innendämmkonstruktionen mit Plattenwerkstoffen. 102
Abb. 2-46: Vergleich GWP der Innendämmkonstruktionen mit Plattenwerkstoffen. 103
Abb. 2-47: Vergleich PENRT plastischer Innendämmsysteme. 104
Abb. 2-48: Vergleich GWP plastische Innendämmsysteme. 105

2.6 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Organische Materialgruppen für Innendämmstoffe. 7
Tab. 2-2: Anorganische Materialgruppen für Innendämmstoffe. 8
Tab. 2-3: Gruppierung der Materialgruppen anhand des Medians ihrer Wärmeleitfähigkeit. 14
Tab. 2-4: Gruppierung der Materialgruppen anhand des Medians ihres Diffusionswiderstandes. 18
Tab. 2-5: Übersicht über die untersuchten Innendämmmaterialien. 19
Tab. 2-6: Konstruktionsaufbau und Materialeigenschaften für Dämmung mit Material 1. 35
Tab. 2-7: Konstruktionsaufbau und Materialeigenschaften für Dämmung mit Material 2. 35
Tab. 2-8: Konstruktionsaufbau und Materialeigenschaften für Dämmung mit Material 3. 35
Tab. 2-9: Klimaanalyse Standort Holzkirchen (WUFI). 36
Tab. 2-10: Klimaanalyse Standort Fichtelberg (WUFI) als Extremklima auf Basis des Lokalklimagenerators des Fraunhofer IBP. 38
Tab. 2-11: Matrix der 36 Simulationsvarianten. 39
Tab. 2-12: Auswertung der Feuchtegehalte in der Dämmschicht für die verschiedenen Materialien und Dämmstärken: In der kritischen Schicht („_k“) sowie im Mittel über die gesamte Dämmschicht („_m“). Fall „HN“ in Orange, „HH“ in Blau, „FN“ in Grau und „FH“ in Rot. 41
Tab. 2-13: Simulierter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Material 2 für die verschiedenen Feuchtezuschläge bei 80 % relativer Feuchte (u_{80}) sowie bei maximalem Wassergehalt (u_{max}). 48
Tab. 2-14: Simulierter Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Material 3 für die verschiedenen Feuchtezuschläge bei 80 % relativer Feuchte (u_{80}) sowie bei maximalem Wassergehalt (u_{max}) 53
Tab. 2-15: Auswahl der untersuchten Innendämmmaterialien. 59
Tab. 2-16: Gemessene Feuchtestufen für die Sorptionsisotherme. 62
Tab. 2-17 Diffusionswiderstand der Innendämmmaterialien. 70
Tab. 2-18: Wasseraufnahmekoeffizienten der Innendämmmaterialien. 70
Tab. 2-19: Sorptionsfeuchtegehalte. 71
Tab. 2-20: Feuchteverlauf und Feuchteprofil von verschiedenen Materialien. 74
Tab. 2-21: Übersicht Parameter Primärenergie. 84
Tab. 2-22: Übersicht der untersuchten ID-Materialien. 89
Tab. 2-23: Grundlagen und Annahmen für Mengenermittlung. 93
Tab. 2-24: Kennwerte PENRT und GWP für Herstellungsphasen A1 – A3 – Trockenbau, Kleber, Mörtel, Putze. 95
Tab. 2-25: Kennwerte PENRT und GWP für Herstellungsphasen A3–A3 – Innendämmstoffe. 95
Tab. 2-26: Ökobilanz Vorsatzschale mit Mineralwolle. 97
Tab. 2-27: Ökobilanz Vorsatzschale mit Zellulose. 97

Tab. 2-28: Ökobilanz Vorsatzschale mit Hanf. 97
Tab. 2-29: Ökobilanz Vorsatzschale mit Aerogeldämmstoff. 98
Tab. 2-30: Ökobilanz Vorsatzschale mit VIP. 98
Tab. 2-31: Ökobilanz Konstruktion mit Mineraldämmplatte. 100
Tab. 2-32: Ökobilanz Konstruktion mit Holzfaser. 100
Tab. 2-33: Ökobilanz Konstruktion mit EPS- Verbundplatte weiß. 101
Tab. 2-34: Ökobilanz mit EPS- Verbundplatte grau. 101
Tab. 2-35: Ökobilanz Innendämmung mit Schaumglas. 101
Tab. 2-36: Ökobilanz Innendämmung mit PUR. 101
Tab. 2-37: Ökobilanz Innendämmung mit Kork. 102
Tab. 2-38: Ökobilanz Innendämmung mit Aerogel- Dämmputz. 103
Tab. 2-39: Ökobilanz Innendämmung mit mineralischem Dämmputz. 104

2.7 Literaturverzeichnis

Binder, Andrea: Entwicklung eines Testverfahrens zur Quantifizierung des kapillaren Rücktransports kapillaraktiver Innendämmstoffe.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): ÖKOBAUDAT Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung.

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hg.): ÖKOBAUDAT. Online verfügbar unter https://www.oekobaudat.de/, zuletzt geprüft am 25.06.2018.

Cammerer, Walter (1995): Wärme- und Kälteschutz im Bauwesen un din der Industrie. 5. Aufl. Berlin: Springer.

Dorsch, Lutz; Kaiser, Christian; Niklasch, Werner; Schöpgens, Hamlet; Spitzendorfer, Josef (2008): Markübersicht: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen. Gülzow-Prüzen: FNR. Online verfügbar unter https://mediathek.fnr.de/dammstoffe-aus-nachwachsenden-rohstoffen.html.

Fachverband Innendämmung e.V. (Hg.) (2016): Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung - Konstruktion - Details - Beispiele. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG.

Geburtig, Gerd; Gänßmantel, Jürgen (2013): Innendämmungen in der Praxis - Energetische Sanierung von innen: Handbuch für die sichere Planung und Ausführung. Geislingen: Maurer Druck und Verlag.

Gesamtverband Dämmstoffindustrie (2005): Baumarktstatistik 2005.

Holm, Andreas; Krus, Martin (1998): Bestimmung der Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung. In: *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* (4).

Holm, Andreas; Krus, Martin; Künzel, Hartwig (2002): Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbaren Kennwerten. (IBP-Mitteilungen, 29, Nr. 406).

Holm, Andreas H.; Sprengard, Christoph; Treml, Sebastian (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen.

Jenisch, Richard (1996): Schadenfreies Bauen - Band 16: Tauwasserschäden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Krus, Martin (1996): Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. Theoretical Principles and New Test Methods. Stuttgart: IRB-Verlag.

Krus, Martin; Holm, Andreas; Schmid, Th. (1997): Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert. In: *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* (3).

Mötzl, Hildegund (Hg.) (2000): Ökologie der Dämmstoffe. Grundlagen der Wärmedämmung ; Lebenszyklusanalyse von Wärmedämmstoffen ; optimale Dämmstandards. Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie. Wien: Springer.

DIN EN 15804, Juli 2014: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

Oswald, Rainer; Liebert, Géraldine; Sous, Silke (2011): Baupraktische Detaillösungen für Innendämmungen (nach EnEV 2009). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Bauforschung ind er Praxis, 98).

PE International (Hg.) (2011): Methodische Grundlagen. Ökobilanzbasierte Umweltindikatoren im Bauwesen.

DIN EN 13755, 2088: Prüfverfahren für Naturstein.

Schild, K.; Willems, W. (2011): Wärmeschutz. Grunlagen - Berechnung - Bewertung. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg und Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Sprengard, Christoph; Spitzner, Martin (2011): Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen. In: *Bauphysik* 33 (4).

Technische Universität Darmstadt (2013): Vergleichende Ökobilanzbetrachtung und Lebenszyklusanalyse mit erweiterten Betrachtungen. Ökologische Potentialbetrachtung für Konstruktionen nichttragender Innenwände und tragender Außenwände.

DIN EN ISO 14040, November 2009: Umweltmanagement - Ökobilanz- Grundsätze und Rahmenbedingungen.

DIN EN ISO 14044, Oktober 2006: Umweltmanagement - Ökobilanzierung - Anforderungen und Anleitungen.

DIN EN ISO 15148, März 2003: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bausteoffen und Bauprodukten.

DIN EN ISO 12571, Dezember 2013: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten.

DIN EN ISO 12572, Juli 2015: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten.

DIN EN ISO 12087, Juni 2013: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen.

DIN EN 12086, Juni 2013: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen.

DIN EN 1602, Mai 2013: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Rohdichte.

DIN 4108-10, Dezember 2015: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe.

3 Energetische und feuchtetechnische Bemessung durch hygrothermische Simulation

3.1 Hintergrund

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Innendämmsysteme in einer Parameterstudie auf Ihre Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen untersucht. Dabei werden die betrachteten Dämmsysteme unter kritischen, repräsentativen Randbedingungskombinationen auf ihre Funktionsfähigkeit hin überprüft. Dies erfolgt mit Parameterstudien im Regelquerschnitt durch hygrothermische Simulationen. Diese werden mit Hilfe des am Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahrens zur Berechnung des gekoppelten instationären Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® Pro Version 6 (Künzel 1994b) durchgeführt. Das Programm WUFI® entspricht u.a. den Anforderungen der WTA (WTA Merkblatt 6-2-01/D), der europäischen DIN EN 15026:2007-08 sowie des ASHRAE Standards 160 für hygrothermische Simulationen.

3.2 Auswahl repräsentativer Bestandskonstruktionen

Zunächst werden Bestandskonstruktionen ausgewählt, die einen möglichst großen Teil des relevanten Gebäudebestandes sowohl bezüglich der Bauweisen als auch der verschiedenen Baualtersklassen abdecken. Die Anforderungen an die Konstruktionen sind dabei:

- Repräsentativ für verschiedenen Baualtersklassen
- Möglichst große Variationsbreite in Bezug auf die feuchtetechnischen Eigenschaften
- Möglichst großes Verbreitungsgebiet innerhalb Deutschlands

Die zu betrachtende U-Wert Bandbreite wurde auf den in der Praxis für Innendämmungen relevantesten und eher kritischen Bereich von 1,3 W/m²K bis 1,5 W/m²K festgelegt. Aufgrund der geringen Bandbreite beim Bestands-U-Wert sind die thermischen Verhältnisse bei den Varianten zudem recht ähnlich und damit gut vergleichbar. Für die Auswahl der Konstruktionen über die verschiedene Baualtersklassen wird die Arbeitshilfe der Deutschen Energie-Agentur (DENA) zur energetischen Bewertung von Bestandsgebäuden (DENA 2004) herangezogen. Mit Hilfe dieser Quelle wird eine Vorauswahl der insgesamt am häufigsten eingesetzten Konstruktionen getroffen und diese dann in einem weiteren Schritt auf eine möglichst große regionale Verbreitung überprüft. Hierzu wird die Online-Fassung des Katalogs regionaltypischer Materialien und Bauweisen des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) (ZUB 2009) herangezogen.

Die online veröffentlichte Fassung (ZUB 2010) stellt die aktuellste Fortschreibung des ursprünglichen Print-Katalogs dar und erlaubt eine schnelle Suche und Filterung der Ergebnisse. Dort sind ca. 700 in Deutschland häufig eingesetzte Konstruktionen einzelnen Postleitzahlbereichen (PLZ) zugeordnet. Basierend auf der Vorauswahl der Konstruktionen aus DENA 2004 wurden automatisiert ähnliche Konstruktionsaufbauten ausgewählt und einzelnen PLZ-Bereichen zugewiesen. Darüber hinaus wurden gleiche Konstruktionen in unterschiedlichen PLZ-Bereichen zusammengefasst und etwaige Duplikate entfernt. Für die

Definition der PLZ-Bereiche wurde auf die Einteilung des statistischen Bundesamtes zurückgegriffen. Die für die Bearbeitung herangezogene Open-Source-Software R (R Core Team 2016) erlaubt eine schnelle Bearbeitung, Auswertung und Visualisierung von großen Datenmengen. Im Laufe dieses Vorgehens wurden vier Konstruktionen identifiziert, die die oben genannten Anforderungen am besten erfüllen. Um die U-Werte der Konstruktionen möglichst vergleichbar zu halten, wurden die im Katalog ZUB 2010 angegebenen Wärmeleitfähigkeiten leicht abgeändert. Dadurch ergibt sich für drei Konstruktionen ein U-Wert von 1,3 W/m²K am unteren Ende der zuvor definierten Bandbreite und für eine Konstruktion (für die ehemaligen sog. winterwarmen Gebiete) mit einem U-Wert von 1,5 W/m²K am oberen Rand der Bandbreite. Zur Darstellung inwieweit die Bauweisen in Deutschland mit den gewählten Konstruktionen abgedeckt werden, sind die PLZ-Bereiche, in denen eine der Konstruktionen laut der ZUB-Datenbank (ZUB 2009, 2010) üblich ist, in Abb. 3-1 rechts grün eingefärbt. Zum Vergleich sind alle in der Datenbank enthaltene Regionen links braun dargestellt.

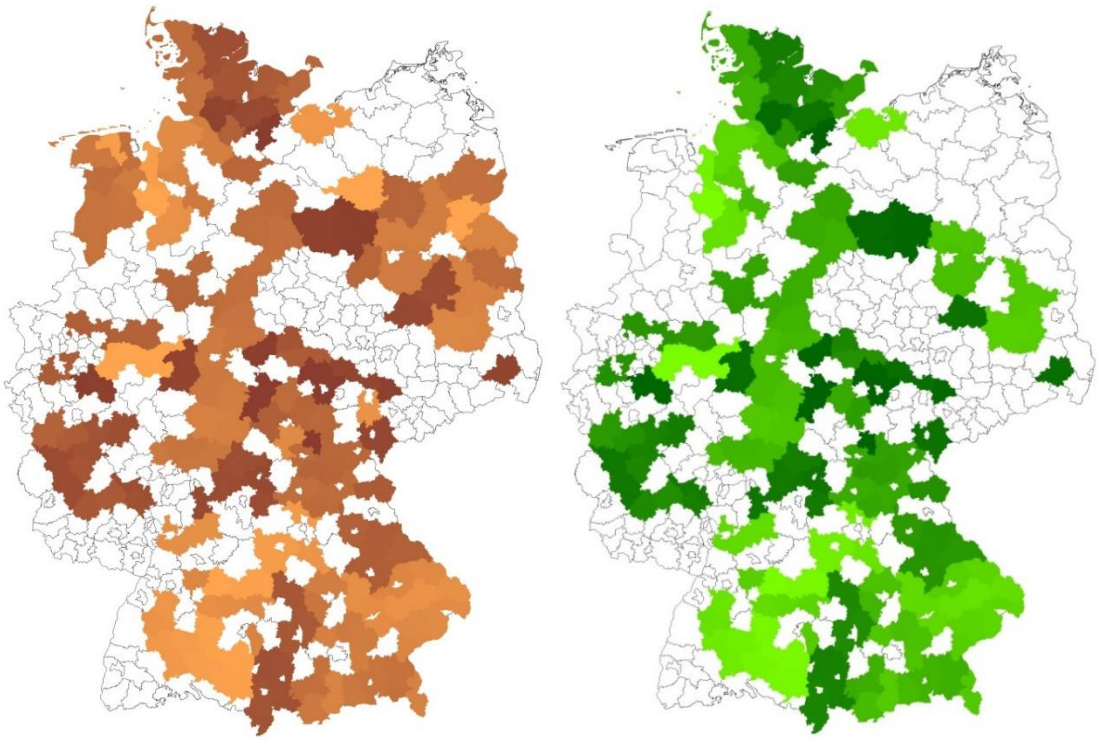


Abb. 3-1: In der linken Deutschlandkarte sind alle PLZ Bereiche braun markiert, zu denen in der Datenbank des ZUB (ZUB 2010) überhaupt Einträge vorhanden sind. Auf der rechten Seite sind die Verbreitungsgebiete der gewählten Bauteilaufbauten für Deutschland basierend auf den Verbreitungsdaten aus ZUB 2010, 2009 in grün dargestellt.

Wie Abb. 3-1 verdeutlicht, wird durch die gewählten vier Konstruktionen sowohl ein großer Teil des Bundesgebietes, als auch ein Großteil der in der ZUB-Datenbank (ZUB 2010) enthaltenen PLZ Regionen abgedeckt. Im Folgenden werden die vier ausgewählten Konstruktionen näher beschrieben.

Für die Bewertung einer Innendämmmaßnahme ist die Schlagregenbelastung der Außenoberfläche oft ein entscheidender Faktor (WTA Merkblatt 6-5). Für die betrachteten

verputzen Konstruktionen wurde jeweils einheitlich ein w-Wert der Bestandswand von 0,5 kg/(m²√h) verwendet, was nach der früheren Fassung der DIN 4108-3 der Anforderung „wasserabweisend“ entspricht.

3.2.1 Vollziegelwand

Die erste Konstruktion ist eine Vollziegelwand, wie sie bis 1957 vorwiegend in den norddeutschen Küstenregionen errichtet wurde. Da es sich hier bezogen auf die winterlichen Temperaturen um eine eher gemäßigte („winterwarme“) Region handelt, hat die Konstruktion einen vergleichsweise höheren U–Wert von 1,5 W/(m²K). Die beidseitig verputzte Konstruktion ist in Abb. 3-2 dargestellt. Die einzelnen Bauteilschichten sind in Tab. 3-1 aufgeführt.

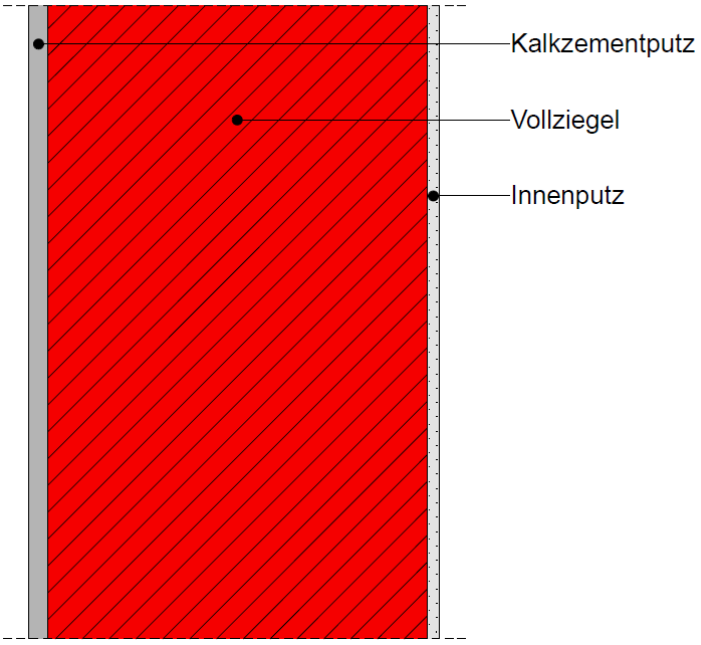


Abb. 3-2: Bauteilaufbau der Vollziegelwand.

Tab. 3-1: Bauteilschichten der Konstruktion Vollziegelmauerwerk.

Nr.	Material	Dicke [cm]
1)	Kalkzementputz	1,5
2)	Vollziegel	30
3)	Innenputz	1

3.2.2 Zweischaliges Mauerwerk

Bei der nächsten Konstruktion handelt es sich um ein zweischaliges Mauerwerk wie es in Norddeutschland und den Küstenregionen bis etwa zum Jahr 1978 verbreitet war. Laut der Datenbank des ZUB (ZUB 2010) entspricht die Konstruktion in Ihren Grundsätzen der Typologie

„Schleswig–Holstein“ der DIN 4108 aus dem Jahr 1969. Es besteht aus einer Tragschale aus Vollziegeln und einer Wetterschale aus Klinkern und ist in Abb. 3-3 dargestellt. Der U–Wert der Konstruktion liegt bei 1,3 W/m²K. Der genaue Aufbau ist in Tab. 3-2 aufgeführt.

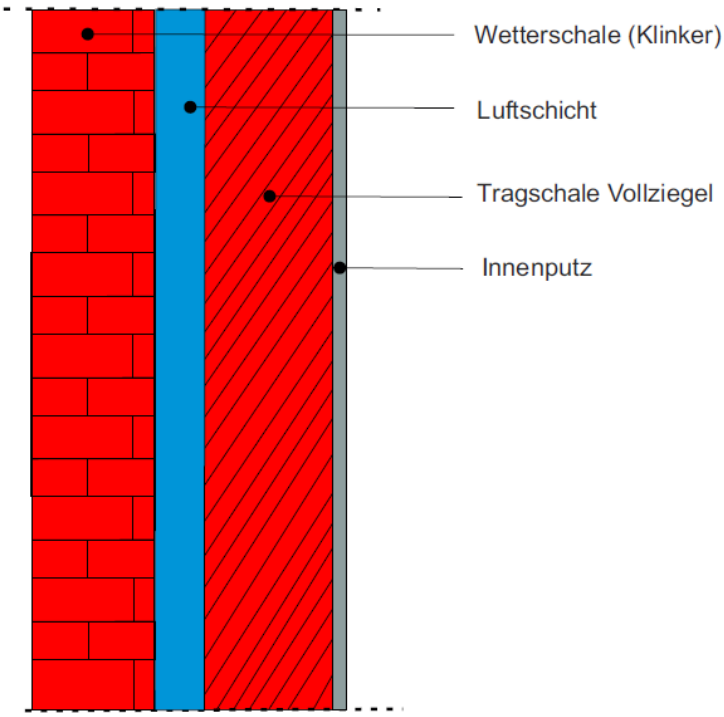


Abb. 3-3: Bauteilaufbau des zweischaligen Mauerwerks.

Tab. 3-2: Bauteilschichten der Konstruktion "zweischaliges Mauerwerk".

Nr.	Material	Dicke [cm]
1)	Wetterschale (Klinker)	12
2)	Luftschicht	6
3)	Tragschale (Vollziegel)	12
4)	Innenputz	1

3.2.3 Hochlochziegel-Mauerwerk (HLZ)

Bei der dritten betrachteten Konstruktion handelt es sich um ein massives Mauerwerk aus Hochlochziegel (HLZ) wie es bis 1980 vor allem in Süddeutschland und dem Ruhrgebiet ausgeführt wurde; dargestellt ist es in Abb. 3-4.

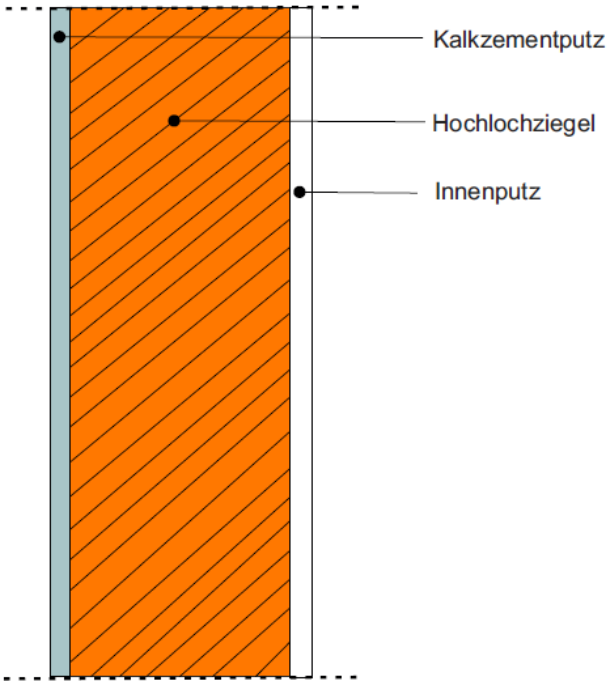


Abb. 3-4: Bauteilaufbau des Hochlochziegel-Mauerwerks.

Nach der ZUB-Datenbank (ZUB 2010) entspricht der Aufbau der Typologie „Bayern“ der DIN 4108:1952. Der Aufbau der Konstruktion ist in Tab. 3-3 aufgeführt.

Tab. 3-3: Bauteilschichten der Konstruktion "Hochlochziegel Mauerwerks".

Nr.	Material	Dicke [cm]
1)	Kalkzementputz	1,5
2)	Hochlochziegel (HLZ)	30
3)	Innenputz	1

3.2.4 Betonhohlblock-Mauerwerk

Ergänzend wurde noch eine Betonhohlblock-Konstruktion ausgewählt, wie sie in dieser Form bis 1994 häufig ausgeführt wurde. Diese Bauweise war überall in Deutschland üblich. Der Betonhohlblock wird beidseitig verputzt (vgl. Abb. 3-5).

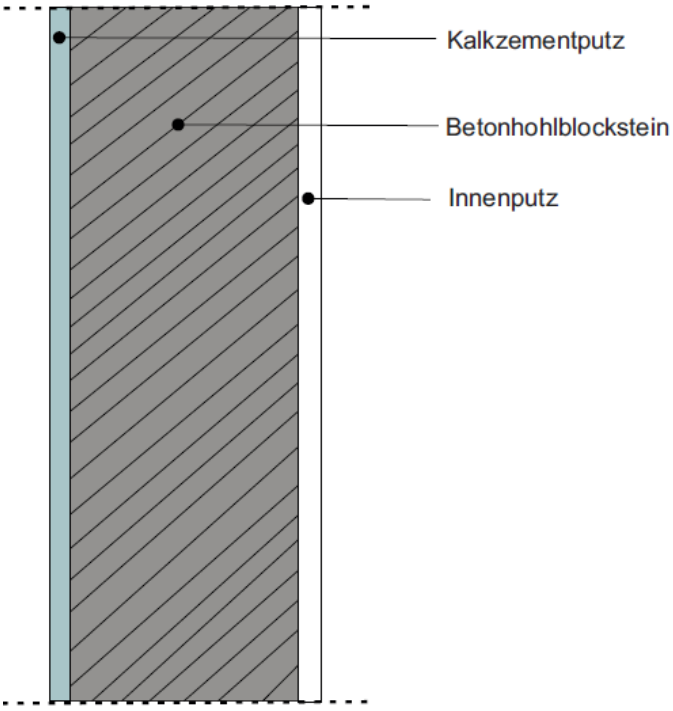


Abb. 3-5: Bauteilaufbau des Außenwandaufbaus mit Betonhohlblocksteinen.

Nach der ZUB-Datenbank (ZUB 2010) entspricht diese Konstruktion in ihren Grundsätzen der Typologie „Sachsen“ der DIN 4108:1952. Das Mauerwerk hat ebenfalls einen U–Wert von 1,3 W/(m²K), der Schichtaufbau ist in Tab. 3-4 aufgeführt.

Tab. 3-4: Bauteilschichten der Konstruktion "Betonhohlblock-Mauerwerk“.

Nr.	Material	Dicke [cm]
1)	Kalkzementputz	1,5
2)	Betonhohlblock	30
3)	Innenputz	1

3.3 Schlagregenbelastung und Schlagregenschutz

3.3.1 Bestimmung der Schlagregenbelastung von Fassaden

Ältere und historische Bauteile weisen oft nur einen unzureichenden Schlagregenschutz auf. Wird auf ein solches Bauteil eine Innendämmung aufgebracht, bleibt es im Winter deutlich kühler als bisher. Die aufgenommene Schlagregenmenge kann dementsprechend schlechter trocknen und der Feuchtegehalt im Bestandsteil der Wand steigt gegenüber dem ungedämmten Zustand an. Dies kann u.U. zu Feuchteproblemen und Frostschäden führen. Dementsprechend ist eine genaue Betrachtung der tatsächlichen Schlagregenbelastung der Bauteile im Kontext einer Sanierung mit Innendämmungen erforderlich.

Die Schlagregenbelastung hängt dabei neben den klimatischen Parametern (Wind und Niederschlagsmenge) auch von der lokalen Exposition und Umgebung der einzelnen Fassade ab. Dieser Einfluss wird nachfolgend näher betrachtet.

3.3.1.1 Stand der Forschung

Um sich ein aktuelles Bild bezüglich des Forschungsstands zur Schlagregenverteilung auf der Oberfläche von unterschiedlich stark exponierten Fassaden zu machen, wurde zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt. Dafür wurden insgesamt 60 Publikationen herangezogen. Einige der ausgewerteten Quellen beschränken sich auf die Messung von Schlagregen (Marzen et al. 2016) oder auf die reine Simulation von Schlagregenintensitäten mit Hilfe von CFD-Modellen (Computational fluid dynamics) (Abuku et al. 2009). Größere Relevanz für die aktuelle Fragestellung haben aber Kombinationen aus Messungen und CFD-Simulationen, die bereits eine Validierung enthalten und teilweise auch eine Extrapolation der Ergebnisse erlauben. Von Kubilay et al. 2014 wurden beispielsweise Schlagregenmessungen an idealisierten Probekörpern auf einer Freilandversuchsfläche der eidgenössischen Material Prüfanstalt (EMPA) in Dübendorf bei Zürich durchgeführt. Die betrachteten würfelförmigen Flachbauten hatten je 2 m Kantenlänge und wurden im Abstand von 2 m zueinander aufgestellt. Die in einem 3x3 Raster aufgestellten Quader beeinflussen sich gegenseitig hinsichtlich Ihrer Schlagregenbelastung. Von den Autoren wird in der Folge ein Simulationsmodell aufgestellt und basierend auf der lokalen Schlagregenexposition der Oberfläche validiert. Generell konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten und der gemessenen Schlagregenintensität erreicht werden.

Für die in diesem Forschungsprojekt relevanten Bebauungssituationen ist jedoch eher Kubilay et al. 2015 relevant. Hier wurde ein eingeschossiges längliches Gebäude vor einem zweigeschossigen Gebäude platziert und das in (Kubilay et al. 2014) entwickelte Berechnungsmodell angewandt.

Zusammenfassend kann auch für dieses Setup gesagt werden, dass die Simulation gut mit den Messwerten übereinstimmt. Die durchschnittliche Abweichung der Regenereignisse beträgt 6,9 % im Februar und 4,9 % im August. Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass die Größe der Gebäude und die Gebäudekonfigurationen die Schlagregenintensität beeinflussen. Grund dafür sind laut den Autoren folgende Faktoren: sog. Rezirkulationsbereiche, geschützte Positionen an der Oberfläche, Windblockierungseffekte und Beschleunigung des Windes über dem Dach. Diese Faktoren wirken sich allerdings widersprüchlich auf die Fangverhältnis-verteilung vor allem des hinteren Gebäudes aus. Das Fangverhältnis gibt an, wieviel des theoretisch möglichen Schlagregens auf der Oberfläche auftrifft. So wird das Fangverhältnis des hinteren Gebäudes, durch Rezirkulationsbereiche und Beschleunigung des Windes über dem Dach des vorderen Gebäudes, erhöht. Die Windblockierung und der Schutz verringern jedoch das Fangverhältnis. Die Schlagregenbelastung des vermeintlich geschützten Gebäudes in der zweiten „Bebauungsreihe“ kann daher an einigen Positionen sogar ansteigen.

Einen ähnlichen Aufbau wie zuvor beschrieben verwirklichten auch Blocken et al. 2009. Dabei wurde ein hohes Gebäude von einem niedrigeren Gebäude abgeschirmt. Der Abstand der

beiden Gebäude betrug dabei 25m. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass das niedrige Gebäude das höhere Gebäude nicht schützt, sondern es sorgt im Gegenteil dafür, dass die Schlagregenbelastung am hinteren Gebäude höher wird. Grund dafür ist, dass das niedrige Gebäude zu einer Erhöhung der Windanströmung des höheren Gebäudes führt. Die Schlagregenintensität am hohen Gebäude stieg dabei vor allem im oberen Bereich für einige Fälle um mehr als den Faktor 2 an. Auch das niedrige Gebäude wird vom hohen beeinflusst. Die Schlagregenbelastung am niedrigen Gebäude wird um circa 25 % verringert. Der Grund hierfür ist der Windblockierungseffekt durch das hohe Gebäude.

Einige Autoren (Blocken und Carmeliet 2006; Fülle 2011) weisen in ihren Veröffentlichungen darauf hin, dass nicht nur die Simulationen sondern auch die Schlagregenmessungen mit Unsicherheiten behaftet sind. Die Autoren geben auch Hinweise zur Fehlervermeidung. Da diese für das Kapitel zur Bestimmung des Schlagregenschutzes der Fassade relevant sind werden die Hinweise nachfolgend kurz aufgeführt. Mögliche Fehlerquellen nach Fülle 2011 sind demnach:

- „Evaporation von Adhäsionswasser auf der Sammelfläche,
- Evaporation aus dem Reservoir,
- Spritzen von Tropfen auf die Sammelfläche,
- Kondensation an der Sammelfläche sowie
- windinduzierte Fehler“

Diese Fehlerarten führen dazu, dass bei der Messung zu wenig Schlagregen gemessen wird und es somit zu negativen Abweichungen kommt. Ausgenommen ist hierbei die Kondensation auf der Sammelfläche (Fülle 2011). Fülle gibt in ihrer Dissertation wieder, wie die Fehler bei der Schlagregenmessung vermieden werden können:

- „Wahl eines 10-min-Messintervalls, um die Schlagregenstromdichte in ihrer zeitlichen Schwankung genügend genau zu erfassen,
- Minimierung des Messfehlers durch Evaporation (Verdunstung) von Adhäsionswasser durch Wahl eines geeigneten Materials oder einer Oberflächenversiegelung (Scheibenglas besser als PMMA und PVC; von PTFE ist abzuraten) sowie einer geeigneten Konstruktion,
- geeignete Auswahl von Messdaten zur Validierung: Wahl von Messwerten hoher Schlagregenstromdichte bzw. Wahl von Messwerten ohne größere Zeiträume von Evaporation.“

Des Weiteren gibt es laut Blocken und Carmeliet 2006 fünf Richtlinien für die Gestaltung der Schlagregenmessgeräte, die eingehalten werden sollten, um die Messfehler zu minimieren:

- „Minimierung der Menge an Adhäsionswasser in der Sammelfläche durch: Konstruieren spezieller Schlagregenmessgeräte (load-cell-suspended or with wiper) und wählen eines geeigneten Materials des Messgerätes oder der Oberflächenbeschaffenheit, um übliche Schlagregenmessgeräte zu konstruieren. Für

die letztgenannten Messgeräte wird Glas gegenüber Kunststoffscheiben aus PMMA und PVC bevorzugt.

- Menge an Adhäsionswasser am unteren (horizontalen) Teil des Messgerätes im Entleerungsrohr begrenzen durch: Eine gute Drainage vom Unterteil zum Rohr, ein kurzes Entleerungsrohr und Auswahl des Materialtyps für minimales Adhäsionswasser.
- Verdunstungsverluste vom Reservoir können verringert werden durch: Aussetzten einer kleinen Wasseroberfläche mit der Umgebungsluft, minimieren der Belüftungsrate in dem Reservoir und regelmäßiges Hinzufügen einiger Tropfen Leichtöl.
- Reduzieren der Verdunstungsverluste und Vermeiden der Verdunstungsverluste durch Sonneneinstrahlung durch: Leiten des gesammelten Regenwassers in das Innere des Gebäudes. Das Reservoir befindet sich an der Innenwandfläche, wodurch Frostschäden am Reservoir vermieden werden.
- Begrenzung der Höhe des Messgerätrandes, um die windinduzierten Fehler zu reduzieren.

Nicht nur die Schlagregenmessung kann Fehler beinhalten, sondern auch die Auswahl der Schlagregenmessdaten. Blocken und Carmeliet 2006 geben fünf Richtlinien für die Auswahl von präzisen Schlagregenmessdaten. Für geringe Fehler sollten die Daten nach den folgenden Richtlinien ausgewählt werden:

- „Auswahl von Regenereignissen mit großen Schlagregenwerten zur Reduzierung des relativen Adhäsions-Wasser-Verdampfungsfehler. Abschätzen des Adhäsions-Wasser-Verdampfungsfehlers durch Annahme eines Worst-Case-Szenarios.
- Messung der Verdunstung aus dem Reservoir und korrigieren der Messungen für diesen Fehler.
- Auswahl von Regenereignissen mit geringen oder nicht vorhandenen „Spritzfehlern“, das heißt Regenereignisse, die wie folgt gekennzeichnet sind:
  - Referenzwindgeschwindigkeit: $U_{10} < 10 \frac{m}{s}$
  - Horizontale Niederschlagsintensitäten mit geringer Möglichkeit für große Tropfen: $R_h < 20 \frac{mm}{h}$
- Bewertung möglicher Verdunstungsfehler für die meteorologischen Bedingungen durchführen. Wenn diese Fehler signifikant sind und nicht leicht aus den Daten entfernt werden können, auswählen von Regenereignissen mit geringen Fehlern.
- Auswahl von Regenereignissen, bei denen die Windrichtung während des Regens senkrecht zur Fassade ist. Dadurch wird der windinduzierte Fehler begrenzt.“

Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wurden eigene Messungen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Holzkirchen durchgeführt. Deren Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

3.3.1.2 Eigene Freilandmessungen

Aufgrund der in der Literatur teilweise widersprüchlichen und teilweise kaum übertragbaren Angaben zur Abminderung der Schlagregenbelastung wurde der Einfluss der Umgebungsbebauung auf die Schlagregenbelastung von Fassaden am IBP nochmals messtechnisch betrachtet. Hierfür wurde zunächst die Schlagregenverteilung auf einer westlich orientierten ca. 3,4 m hohen Versuchswand betrachtet, welche nicht von zusätzlicher Umgebungsbebauung abgeschirmt wird. Im zweiten Schritt wurden dann unterschiedliche Bebauungssituation, wie sie auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen vorhanden sind, analysiert. Als Referenzwert dient hierzu die am Wetterturm (vgl. Abb. 3-6) des IBP bestimmte Normalregenmenge bzw. der aus dem Normalregen und dem Wind errechnete Schlagregen auf freiem Feld.



Abb. 3-6: Wetterturm auf der Freilandversuchsfläche des IBP in Holzkirchen.

Die Schlagregenmessung an den jeweiligen Oberflächen erfolgte kumuliert für die einzelnen Schlagregenereignisse über auf der Oberfläche aufgebrachte Schlagregenmesser. Der Schlagregenmesser besteht aus einer Metallplatte mit einem umgebenden Falz. Das ablaufende Regenwasser wird über einen Schlauch in eine verschlossene Messflasche weitergeleitet. Durch Wägung kann dann die bei einem Schlagregenereignis aufgetretene Schlagregenmenge ermittelt werden. Exemplarisch ist einer dieser Schlagregenmesser nachfolgend in Abb. 3-7 dargestellt.



Abb. 3-7: Verwendeter Schlagregenmesser auf einer Versuchsfassade des Freilandversuchsgeländes in Holzkirchen.

Schlagregenverteilung auf Fassaden

Im Rahmen der Schlagregenmessungen wurde zunächst die Schlagregenverteilung auf einer westlich exponierten Außenwand betrachtet. Die Fassade ist ca. 3,4 m hoch und nach Westen frei exponiert, die nächste Bebauung ist mehrere hundert Meter entfernt, sodass der Schlagregen ungehindert auf die Fassade treffen kann. Nach den Ergebnissen von Künzel 1994b wird davon ausgegangen, dass die Schlagregenmenge in 2 m Höhe etwa 4 % und in 3 m Höhe um etwa 22 % größer ist als in 1 m Höhe. Dem trägt der betrachtete Messaufbau auf dem Freilandversuchsgelände Rechnung. Gemessen von der Geländeoberkante bis zur Unterkante des Schlagregenmessers ergeben sich Höhen von 0,8 m, 1,4 m und 2,1 m Höhe. Bei einer Messfläche von 10 cm² ergibt sich damit eine Messhöhe von 0,9 m, 1,5 m und 2,2m. Der betrachtete Versuchsaufbau ist nachfolgend in Abb. 3-8 dargestellt. Die übrigen auf der Fassade aufgebrachten automatischen Schlagregenmesser dienen zur Validierung und Überprüfung der manuellen Messungen.

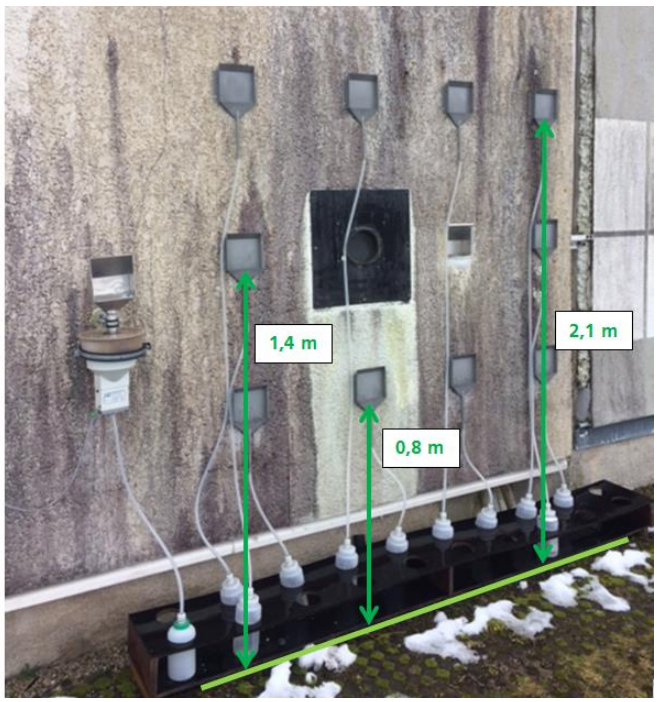


Abb. 3-8: Verteilung von 10 Schlagregenmessern auf der westlich orientierten Außenwand in drei unterschiedlichen Höhen.

Wie bereits in Künzel 1994b dargelegt führt die veränderliche Windanströmung der Fassade auch innerhalb geringer Höhenunterschiede zu deutlich unterschiedlichen gemessenen Schlagregenmengen. Um diese Schwankungsbreite zu minimieren wird über die jeweils in einer Höhe angebrachten Schlagregenmesser gemittelt. Die Messungen wurden für einen Zeitraum von November 2016 bis Dezember 2017 durchgeführt. Die Ergebnisse werden nachfolgend in Abb. 3-9 als Boxplot dargestellt.

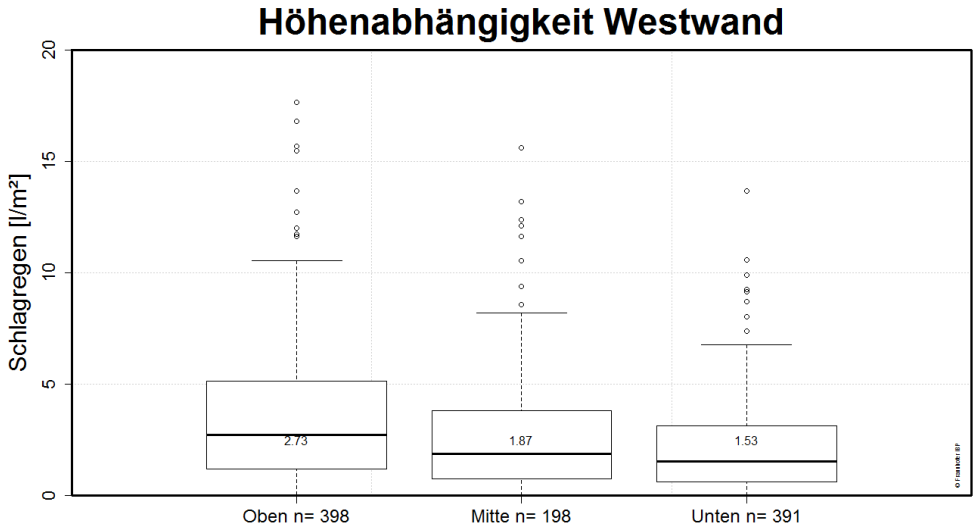


Abb. 3-9: Boxplot der Schlagregenmessungen für die drei unterschiedlichen Höhen von 0,8 m, 1,4 m und 2,1 m. Der Median des jeweiligen Datensatzes ist auf zwei Stellen gerundet im Interquartilsbereich dargestellt.

Die geringere Anzahl an Messpunkten im mittleren Fassadenbereich ist darauf zurückzuführen, dass hier nur im Randbereich gemessen wurde und somit zwei Messplatten weniger verbaut wurden (vgl. Abb. 3-8). Bereits innerhalb der betrachteten 2 m Fassadenhöhe ergibt sich ein deutlicher Unterschied in der Schlagregenbelastung. Mit zunehmendem Abstand zur Geländeoberkante nimmt die gemessene Schlagregenmenge deutlich zu, die Schwankungsbreite der Messungen steigt ebenfalls mit zunehmender Höhe an. Bezogen auf den Median der jeweiligen Messreihe liegen die Werte in 2,1 m Höhe um 78% über den Messungen in 80 cm Höhe. In 1,4 m Höhe liegen die Werte um ca. 22 % über dem Median in 80 cm Höhe und damit deutlich über dem, was man aufgrund der Literatur erwarten würde.

Einfluss der Umgebungsbebauung

Im zweiten Schritt wurde der Einfluss verschiedener Expositionen auf die auf der Fassade auftreffende Schlagregenbelastung näher betrachtet. Wie die Literaturrecherche im vorherigen Kapitel gezeigt hat, hat die Umgebungsbebauung einen erheblichen Einfluss auf die Schlagregenbelastung einer Fassade. Um dies zukünftig besser abschätzen zu können wurden verschiedene Bebauungssituation hinsichtlich Ihres Einflusses auf die Schlagregenbelastung analysiert. Die einzelnen Bebauungssituationen lassen sich dabei wie folgt beschreiben:

- Schlagregenbelastung eines niedrigen Gebäudes hinter einem gleichhohen Gebäude
- Schlagregenbelastung eines niedrigen Gebäudes hinter einem hohen Gebäude
- Schlagregenbelastung eines hohen Gebäudes hinter einem niedrigen Gebäude

Die betrachteten Messstationen sind über das Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen wie in Abb. 3-10 dargestellt verteilt.

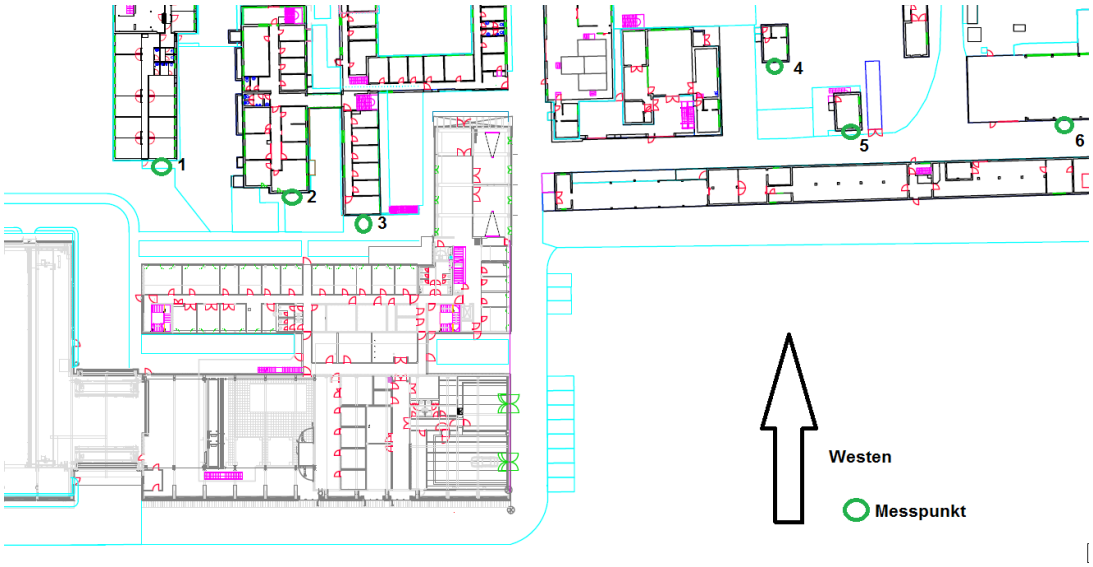


Abb. 3-10: Übersichtsdarstellung der Schlagregenmessstationen auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen.

Die Messpositionen 1 und 2 stellen die Bebauungssituation einer nach Westen orientierten Fassade dar, welche von einem deutlich höheren Gebäude abgeschirmt wird. Schematisch lassen sich die beiden Messpunkte wie in Abb. 3-11 und Abb. 3-12 dargestellt klassifizieren.

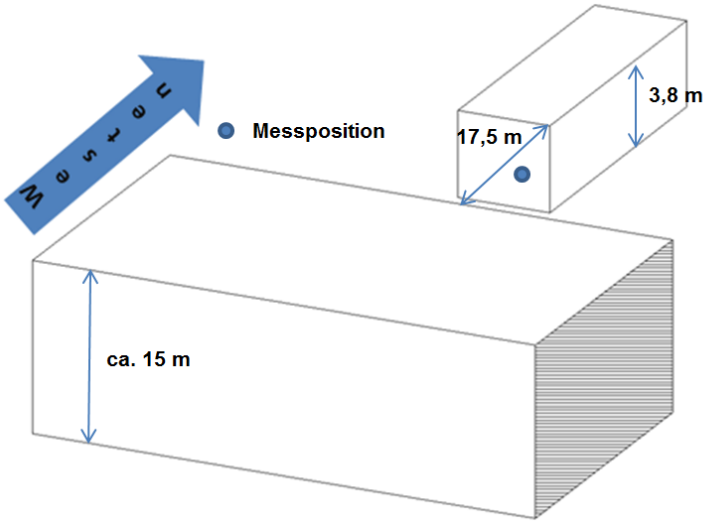


Abb. 3-11: Umgebungsbebauung der Messposition 1.

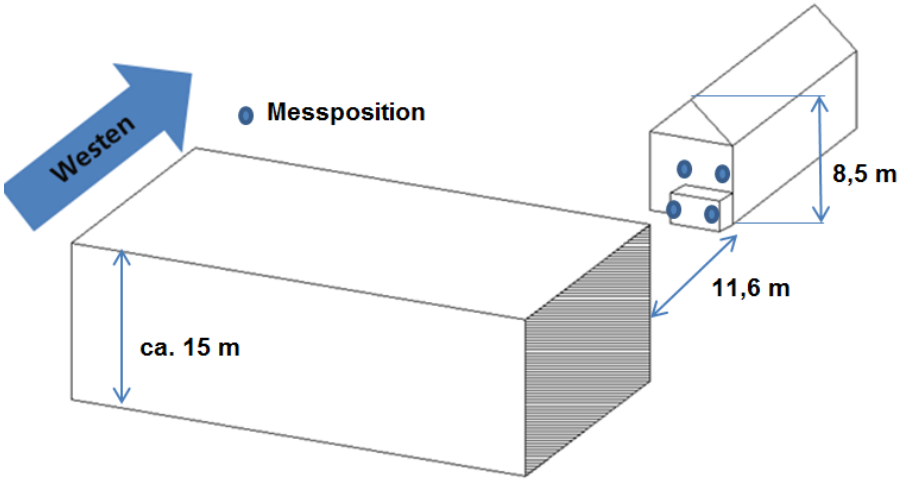


Abb. 3-12: Umgebungsbebauung der Messposition 2.

An Messposition 1 wurde in einer Höhe von 1,65 m gemessen, an Position 2 sowohl im Bereich des Erkers in 1,65 m Höhe als wie auch in ca. 5 m Höhe.

Für die Auswertung wurde der Expositionsanpassungsfaktoren (R_2) verwendet wie sie u.a. in Künzel 1994a eingeführt werden. Hierfür wird der Quotient aus Schlagregen zu Normalregen gebildet und über der mittleren Windgeschwindigkeit dargestellt. Beide Größen stehen zusammen in guter Näherung in einem linearen Zusammenhang (Künzel 1994a). Die Steigung der jeweiligen Geraden entspricht hierbei R_2. Wertepaare bei denen entweder der Regenkoeffizient oder die Windgeschwindigkeit Null sind werden aus der Auswertung entfernt. Für die Messposition 1 ist diese Auswertung in Abb. 3-13 dargestellt.

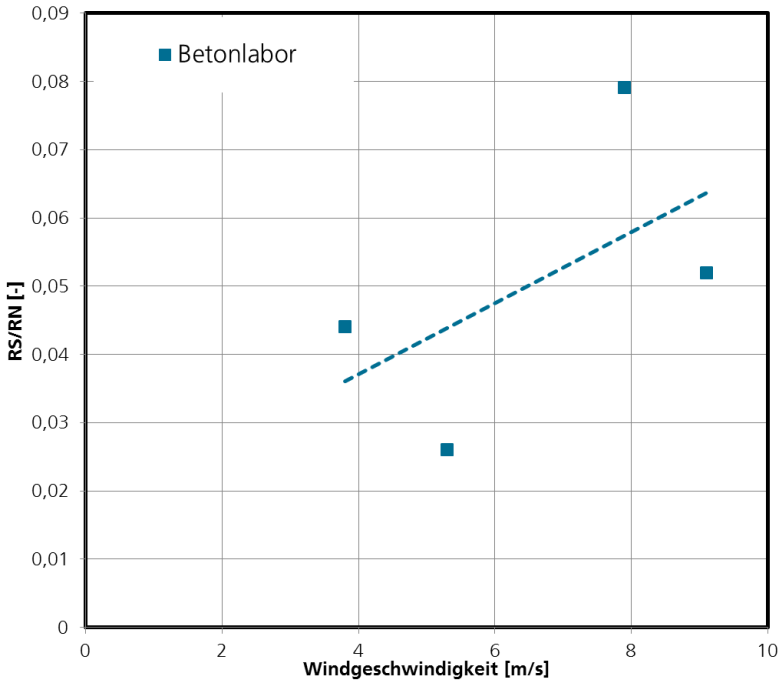


Abb. 3-13: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 1 im Bereich der Gebäudekante des Betonlabors.

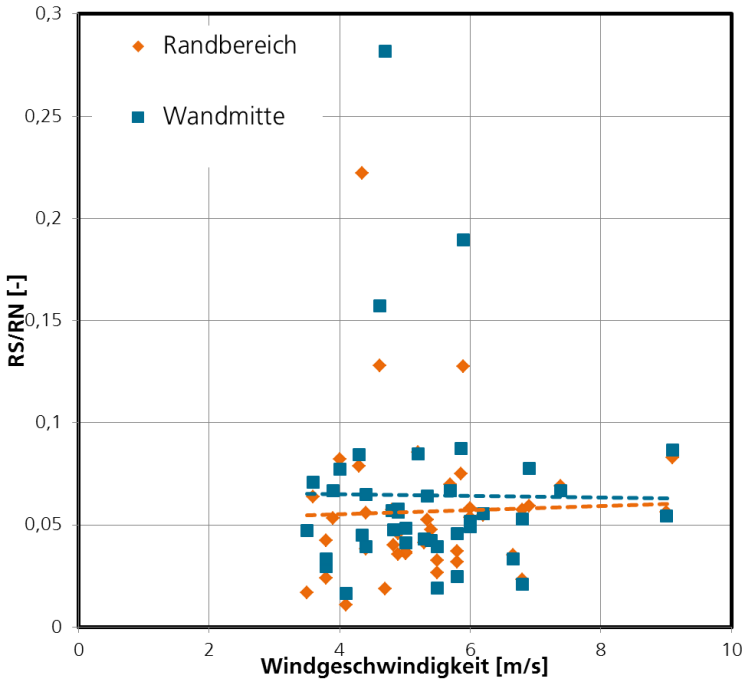


Abb. 3-14: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 2 im Erdgeschoss im Bereich des Erkers.

Im Vergleich zum Standard R_2-Faktor für diese Position von 0,07 ergibt sich aus Abb. 3-13 ein R_2 von 0,005, auf Grund der sehr geringen Anzahl an Messwerten liegt das Bestimmtheitsmaß

jedoch lediglich bei 0,33. Die geschützte Lage würde hier also zu einem Abminderungsfaktor führen, der bei lediglich 7 % des Standard R_2-Faktors liegt. Das gleiche Vorgehen wird auch für die Messposition 2 im Bereich es Erkers im Erdgeschoss des zweiten Gebäudes verwendet. Darüber hinaus wird in Abb. 3-14 zwischen der Position an der Gebäudekante und in der Bauteilmitte unterschieden.

Wie Abb. 3-14 zeigt, ist für die Position in Wandmitte kein Anstieg festzustellen, die Steigung im Randbereich liegt bei 0,001 und aufgrund des extrem geringen Bestimmtheitsmaßes kann hier kein sinnvoller R_2-Faktor angegeben werden. Der Grund für das schlechte Bestimmtheitsmaß ist die Schwankung bei starken Regenereignissen (R_S/R_N > 0,1). Hier wirkt das abschirmende Gebäude offenbar nicht mehr so stark wie bei Regenverhältnissen < 0,1.

In Übereinstimmung mit den im vorherigen Kapitel ausgewerteten Untersuchungen bestätigt dies, dass sich die Schlagregenexposition für niedrige Gebäude in zweiter Baureihe deutlich reduziert. Die Abhängigkeit von der Höhe der Schlagregenbelastung muss noch durch umfangreichere Messreihen näher betrachtet werden. Der Effekt scheint aber nur bei starken Regenereignissen eine relevante Rolle zu spielen.

Für die Messung in 5 m Höhe wird nur die Position in Wandmitte ausgewertet, da im Randbereich zu wenige Zeitpunkte zur Verfügung stehen, zu denen überhaupt Regen erfasst werden konnte. Das Ergebnis für die Position in Wandmitte ist nachfolgend in Abb. 3-15 dargestellt.

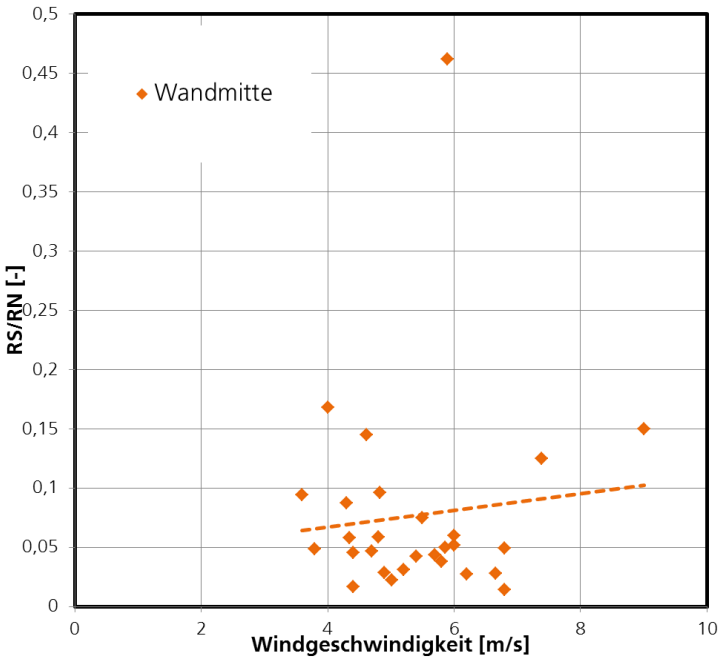


Abb. 3-15: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 2 in 5m Höhe in Wandmitte.

Für den in Abb. 3-15 dargestellten Verlauf liegt die Steigung und damit der potentielle R_2-Faktor bei 0,007. Damit liegt der R_2-Faktor zwar deutlich über dem im Bereich des EGs aber auch um den Faktor 10 niedriger als für das gleiche Gebäude in nicht abgeschirmter Lage.

Auf Grund des für alle drei Messpositionen geringen Bestimmtheitsmaßes und der großen Varianz der Ergebnisse kann die absolute Größe der Reduktion nicht abschließend festgelegt werden. Die Ergebnisse legen zwar eine Reduktion auf ein Zehntel des Standardwertes nahe, jedoch haben die lokale Anströmung und die Stärke des jeweiligen Regenereignisses einen entscheidenden Einfluss. Daher sollte eine Reduktion nur basierend auf lokalen in-situ Messungen erfolgen.

Messposition 3 ist nach Westen und Süden von einem ca. 15 m hohen Gebäude umbaut, darüber hinaus ist es nach Norden hin von einem ca. 12 m hohen Haus abgeschirmt (vgl. Abb. 3-10). Durch diese geschützte Lage konnte an der Oberfläche des Messpunktes 3 kein Schlagregen gemessen werden. Dies weist darauf hin, dass durch die hier betrachtete Art der Umgebungsbebauung die Schlagregenbelastung nahezu aufgehoben wird. Im Sinne der Sicherheitsüberlegung wird hier jedoch keine „Modellanpassung“ vorgenommen. Im Rahmen einer Parametervariation kann dies aber in einer etwaigen Simulationsstudie berücksichtigt werden.

Die beiden Messpositionen 4 und 5 entsprechen der Situation eines Gebäudes in der zweiten Bebauungsreihe mit einem vorgelagerten gleichhohen Gebäude. Zusätzlich ist die Situation einer direkt angrenzenden Bebauung wie z.B. durch eine Garage (Position 5) berücksichtigt. Nachfolgend sind in Abb. 3-16 und Abb. 3-17 die beiden Bebauungssituationen schematisch dargestellt.

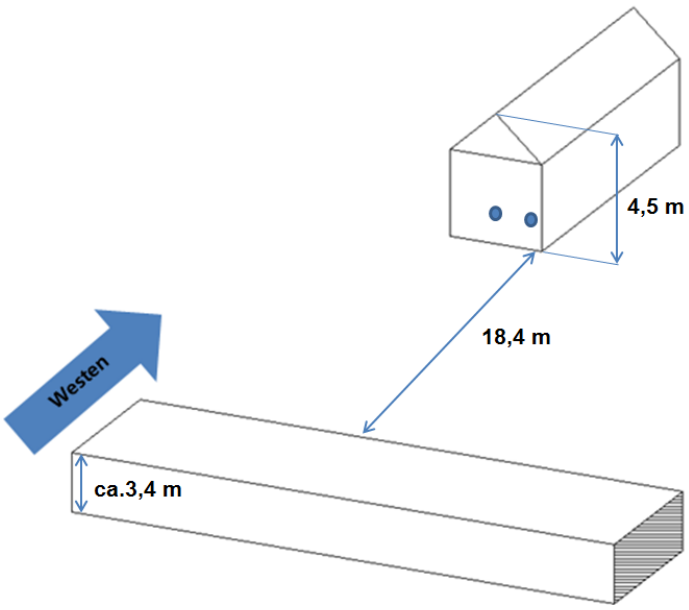


Abb. 3-16: Umgebungsbebauung der Messposition 4.

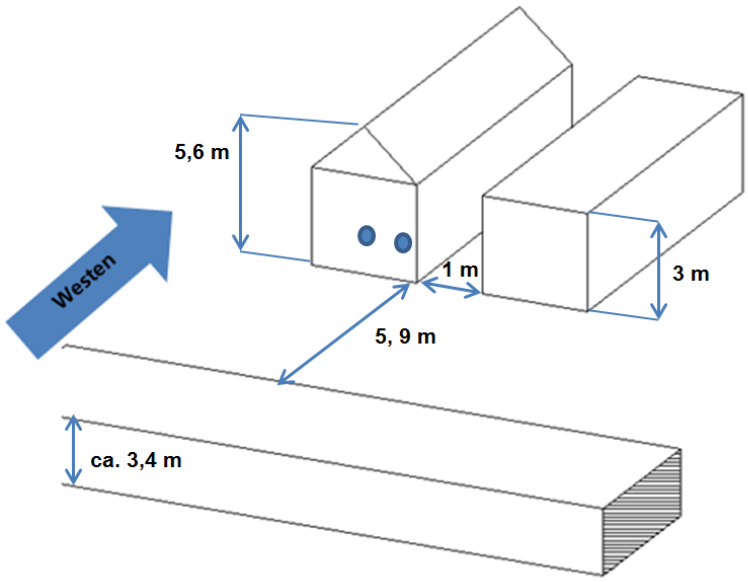


Abb. 3-17: Umgebungsbebauung der Messposition 5.

Zunächst werden für die Messposition 4 die beiden Messpunkte in Wandmitte und im Randbereich in Abb. 3-18 ausgewertet.

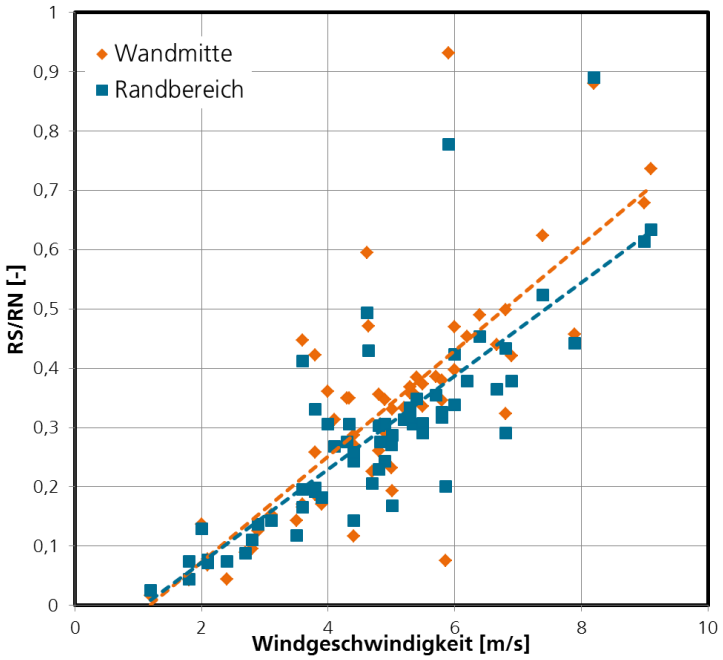


Abb. 3-18: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 4.

Für die beiden in Abb. 3-18 dargestellten Regressionsgeraden ergibt sich eine Steigung von 0,09 in Wandmitte und von 0,08 im Randbereich der Wand. Berücksichtigt man das Bestimmtheitsmaß von ca. 0,66 für beide Bereiche liegt dieser R_2-Faktor leicht über dem

Standardwert von 0,07. Die 18,4 m Distanz zu dem nächsten vorgelagerten Gebäude führen hier offenbar nicht zu einer Reduktion der Schlagregenbelastung auf der jeweiligen Fassade. Verallgemeinert lässt sich sagen, dass bei großen Abständen (hier ≥ 18,4m) der beiden Bebauungsreihen keine Reduktion von R_2 sinnvoll ist.

Messposition 5 befindet sich mit ca. 6 m deutlich näher an der nächsten Bebauungsreihe. Das Verhältnis von Schlagregen zu Normalregen ist in Abb. 3-19 über der Windgeschwindigkeit dargestellt.

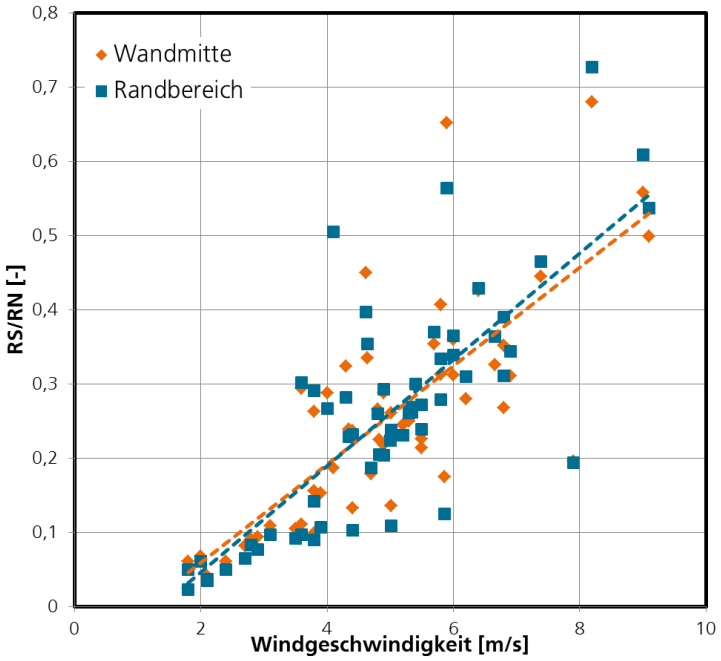


Abb. 3-19: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 5.

Mit 0,066 im Randbereich zum nächsten gleichhohen Gebäude und mit 0,07 in der Wandmitte liegen die Geradensteigungen in etwa in der Größenordnung der ungestörten Wand in der ersten Baureihe. Das Bestimmtheitsmaß liegt für beide Datensätze bei 0,62. Das im Randbereich angrenzende Gebäude hat eine leichte Reduktion des R_2-Faktors zur Folge. Eine Veränderung des R_2 Wertes lässt sich auf Grund dieser Messungen nicht herleiten. Ein Abstand von ca. 6 m zu einem Gebäude gleicher Höhe führte in diesem Versuch nicht zu einer verringerten Schlagregenbelastung.

Abschließend wird noch die Messposition 6 betrachtet, welche schematisch in Abb. 3-20 dargestellt ist und ein hohes Gebäude hinter einem niedrigeren eingeschossigen Gebäude bewertet.

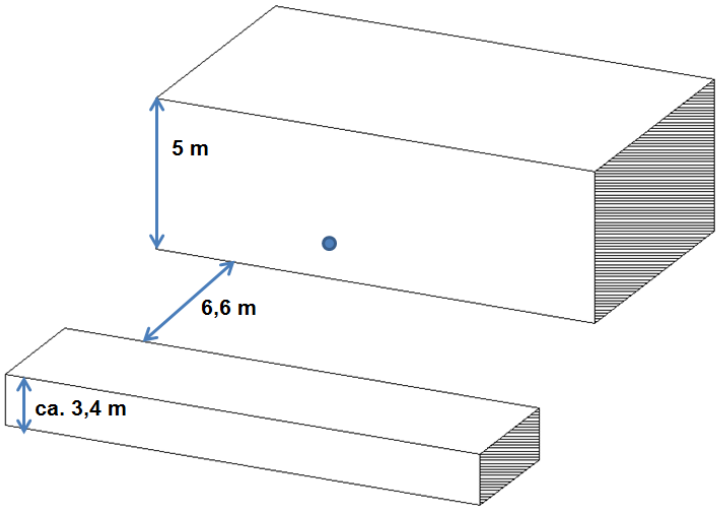


Abb. 3-20: Umgebungsbebauung der Messposition 6.

Die letzte betrachtete Position lässt sich charakterisieren als ein hohes Gebäude hinter einem niedrigeren Bauwerk. Der Vergleich des Regenverhältnisses über der Windgeschwindigkeit für Messposition 6 ist in Abb. 3-21 dargestellt.

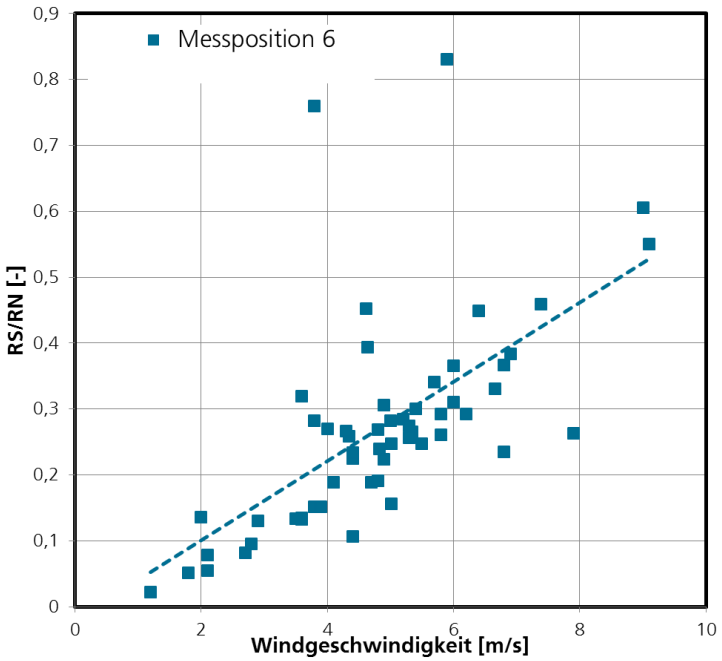


Abb. 3-21: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 6.

Für die in Abb. 3-21 dargestellte Gerade ergibt sich eine Steigung von 0,06 und damit ein um ca.15 % niedrigerer R_2 Wert. Dies steht im Einklang mit den Simulationsergebnissen aus Blocken und Carmeliet 2015, welche bereits darauf hingewiesen haben, dass es aufgrund der veränderten Strömungsverhältnisse in diesem Fall zu verminderter Schlagregenbelastung des höheren Gebäudes und zu einer erhöhten Schlagregenbelastung des niedrigeren Gebäudes kommt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Bestimmung des Schlagregenfaktors (R2) auf Fassaden mit den vorgestellten Messplatten gut und vergleichsweise einfach möglich ist. Da aber nur ganze Schlagregenereignisse verglichen werden, sind längere Messperioden als z.B. bei einer kontinuierlichen stündlichen Messdatenerfassung notwendig, um belastbare Aussagen treffen zu können. Für die einzelne Bebauungssituation ergab sich für den Fall eines niedrigen Gebäudes hinter einem hohen Bauwerk eine deutliche Reduktion. Bei Abständen von 6 – 18 m zwischen der ersten und zweiten (etwa gleichhohen) Bebauungsreihe ergab sich hinsichtlich des R2-Faktors kein relevanter Unterschied zur ungestört exponierten Lage. Für den Fall eines höheren Gebäudes in zweiter Bebauungsreihe ergab sich eine leichte Reduktion der Schlagregenexposition an dem höheren Gebäude. Bei ähnlich hohen Gebäuden mit Abständen < 6 m ist tatsächlich von einer deutlichen Reduktion der Schlagregenbelastung auszugehen. Die im Rahmen des Projekts erfasste Messdatenbasis ist aber nicht ausreichend, um verlässliche Faktoren festlegen zu können - hier besteht also noch weiterer Untersuchungsbedarf. In vergleichbaren Situationen, bei denen die Schlagregenbelastung tatsächlich zum limitierenden Faktor für den Einsatz einer Innendämmung wird, wäre allerdings eine genauere Analyse der Verhältnisse, ggf. mit in situ Messungen lohnend, um einen situationsspezifischen Abminderungsfaktor zu ermitteln. Bei den hier durchgeführten Messungen lag die Belastung um einen Faktor 10 niedriger als beim ungeschützten Gebäude.

3.3.2 Bestimmung des Schlagregenschutzes von Fassaden

Im vorherigen Kapitel wurde die Schlagregenbelastung unterschiedlich stark exponierter Fassaden betrachtet. Das theoretisch zur Verfügung stehende Schlagregenangebot auf der Außenoberfläche ist aber nur der eine Teil, der zur Beurteilung des Bauteilverhaltens notwendig ist. Der zweite wichtige Punkt ist die Aufnahme des flüssigen Wassers durch die Fassadenoberfläche. Die Aufnahme des Wassers über die Zeit lässt sich durch den w-Wert ausdrücken. Dieses Unterkapitel beschäftigt sich mit der in-situ Bestimmung des w-Wertes.

3.3.2.1 Grundlagen

Unter In-situ-Messverfahren versteht man Messmethoden, die sich mit vergleichsweise geringem Aufwand direkt vor Ort am Gebäude umsetzen lassen. Der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) beschreibt dabei die Wasseraufnahmefähigkeit von flüssigem Wasser durch eindimensionales Saugen. Die verschiedenen in-situ-Messverfahren bestimmen alle die in einer festgelegten Zeitspanne aufgenommene Wassermenge einer definierten Prüffläche. Sie unterscheiden sich jedoch wesentlich in ihrem Aufbau und in der Größe der Prüffläche. Die gemessene flächenbezogene Wasseraufnahme ist proportional zur Wurzel der Zeit und wird als w-Wert bezeichnet. Berechnet werden kann der w-Wert nach Niemeyer Rolf 2013 wie folgt:

$$w = \frac{m}{A \cdot t^{0,5}} \qquad 3.1$$

mit:

w	[kg/(m^2·h^{0,5})]	Wasseraufnahmekoeffizient
m	[kg]	Aufgenommene Wassermenge
A	[m^2]	Prüffläche
t	[h]	Zeit

Durch das Auftragen der flächenbezogenen Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit entsteht eine Gerade; der w-Wert entspricht der Steigung dieser Geraden. Zur Veranschaulichung ist dies nachfolgend in Abb. 3-22 dargestellt.

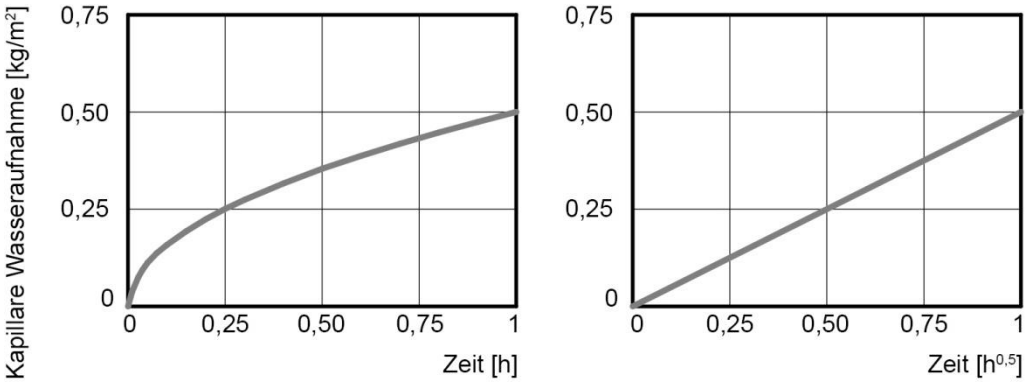


Abb. 3-22: Schematische Darstellung des w-Wertes über der Messzeit bzw. über der Wurzel der Zeit aus Haindl 2017.

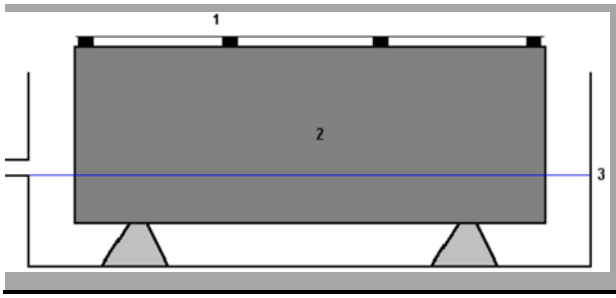
Die Bestimmung des w-Werts ist darüber hinaus auch durch die Labormessung von Bohrkernen oder Produktionsproben möglich. Die Randbedingungen der Produktprüfung regelt, abhängig vom Material, die jeweilige Prüfnorm. Einige der Normen sind mit Ihren wichtigsten Randbedingungen in Tab. 3-5 aufgeführt.

Tab. 3-5: Gegenüberstellung ausgewählter Prüfnormen zur Bestimmung des w-Werts aus Haindl 2016.

	DIN EN 772-11:2011	DIN EN 1015-18:2018	DIN EN ISO 15148:2002
Anwendungsbereich	Ziegel, Beton, Porenbeton, Natursteine	mineralische Bindemittel, Festmörtel	Putze oder Beschichtungen in Verbindung mit dem Untergrund
Probenanzahl	6	3	3
Abmessung	Stein	160 x 40 x 40 mm³	> 50 cm²
Eintauchtiefe	5 ± 1 mm	5 – 10 mm	5 ± 2 mm
Tauchzeit	Ziegel: 1 min Porenbeton: 10,30,90 min Betonstein: 10 min Naturstein: bis zu 24 oder 72 h	10, 90 min 24h bei Sanierputzen	bis 24 h z.B.: nach 5, 20 min bis zu 24 h
Trocknung	70°C/105°C	95°C/65°C	18°C - 28°C
Wasseraufnahme-koeffizient	Beton: $C_{w,s}$ [g/(m²·s)] Porenbeton: $C_{w,s}$ [g/(m²·s^{0,50})] Naturstein: $C_{w,s}$ [g/(m²·s^{0,50})] Ziegel: $C_{wi,s}$[kg/(m²·min)]	C [kg/(m²·s^{0,5})] Sanierputz: C [kg/m²]	A_w [kg/(m²·s^{0,5})] W_w [kg/(m2·h^{0,5})]

Nachfolgend beschränken wir uns auf die genauere Betrachtung der DIN EN ISO 15148:2002, da diese für die zu beurteilenden Fassadenbeschichtungen maßgeblich ist und den Bedingungen der in–situ-Messverfahren (eindimensionaler Saugvorgang) am nächsten kommt. Für die Labormessung werden die Seiten der Probe mit einer wasser- und dampfundurchlässigen Paraffinschicht versehen. Dies soll verhindern, dass es zu einem

mehrdimensionalen Saugvorgang kommt. Die so präparierte Probe wird dann in ein Wasserbad gelegt und beschwert, um das Auftreiben zu verhindern. Schematisch ist dies in Abb. 3-23 dargestellt.



1 Gitter mit Auflast gegen Probenauftrieb (falls nötig)
2 Probekörper
3 Wasserspiegel

Abb. 3-23: Prüfanordnung eines Wasseraufnahmeversuchs nach DIN EN ISO 15148 (Haindl 2017).

Die Probe wird dann in regelmäßigen Abständen (vgl. Tab. 3-5) aus dem Wasserbad entnommen und gewogen, um die aufgenommene Wassermenge zu ermitteln. Die Messzeit beträgt maximal 24 Stunden, wobei die anfängliche Stabilisierungs-Phase nicht betrachtet wird. Die zum jeweiligen Zeitpunkt bestimmten Wassermengen können dann über der Wurzel der Zeit aufgetragen werden bzw. nach Formel 3.1 in einen w-Wert umgerechnet werden. Anforderungen an den w-Wert einer Außenoberfläche werden aktuell für Deutschland nur von der DIN 4108-3:2014 in Abhängigkeit von der Schlagregenbeanspruchung gestellt. Das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wird dafür in drei Schlagregenbeanspruchungsgruppen aufgeteilt. Für die Gruppen 2 und 3, mit mittlerer und hoher Schlagregenbeanspruchung, wird ein wasserabweisender Außenputz gefordert. Die Norm definiert dabei wasserabweisend über einen w-Wert < 0,5 kg/m²$h^{0.5}$ und einen s_d-Wert < 2 sowie zusätzlich über ein Produkt aus w-Wert und Wasserdampfdiffusionswiderstand (s_d-Wert) ≤ 0,2 kg/m²$h^{0.5}$ (vgl. Abb. 3-24). Für Innendämmungen wird in der DIN 4108-3 explizit auf die schärferen Anforderungen in WTA Merkblatt 6-4 und WTA Merkblatt 6-5 der Wissenschaftlich-technische Arbeitsgruppe Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) verwiesen. Diese definieren einen wasserabweisenden Außenputz für den Anwendungsfall der Innendämmung analog zum Ansatz in der DIN 4108-3, allerdings mit jeweils niedrigeren Grenzwerten: mit einem maximalen w-Wert ≤ 0,2 kg/m²$h^{0.5}$ einem maximalen s_d-Wert von 1 m und einem Produkt aus w-Wert und s_d-Wert ≤ 0,1 kg/m²$h^{0.5.}$ Dieses Kriterium ist nachfolgend in Abb. 3-24 den Grenzwerten der DIN 4108-3:2014 gegenübergestellt.

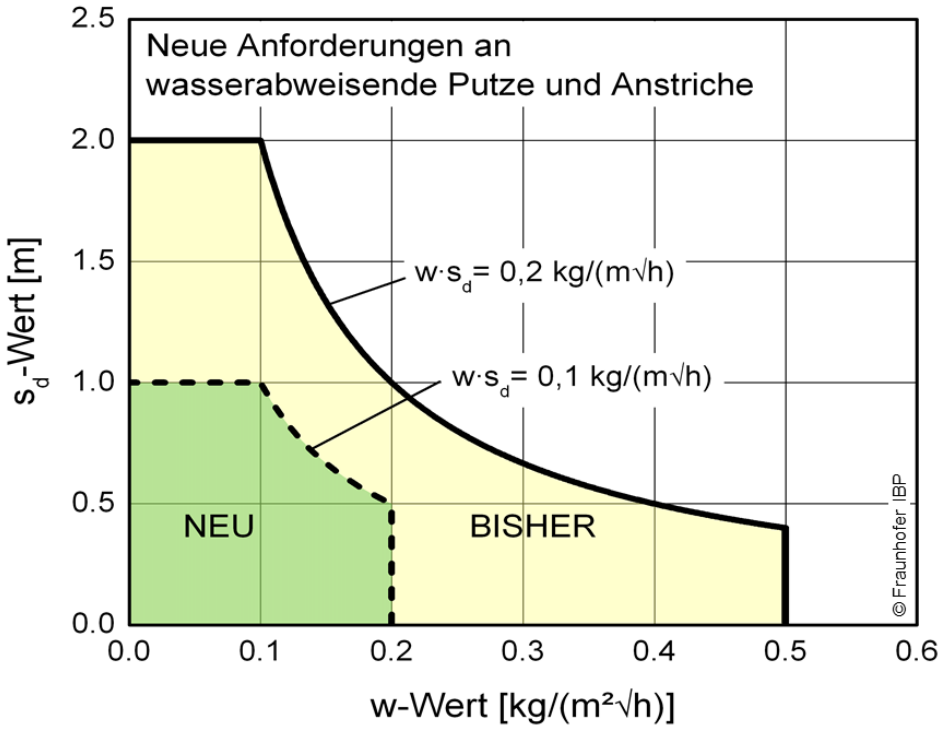


Abb. 3-24: Vergleich der Anforderungen an eine Außenwand bei Verwendung einer Innendämmung nach WTA Merkblatt 6-4 mit den Kriterien der DIN 4108-3:2014.

Generell können Baustoffe grob nach den unterschiedlichen w-Werten in Saugfähigkeitsgruppen klassifiziert werden. In Zürcher und Frank 2010 werden dabei vier Klassen definiert, die in Tab. 3-6 dargestellt sind.

Tab. 3-6: Klassifizierung von Baustoffen (Zürcher und Frank 2010).

Verhalten gegenüber Wasser	w-Wert [kg/(m^2·h^{0,5})]
Stark saugend	w > 2,0
Wasserhemmend	0,5 < w ≤ 2,0
Wasserabweisend	0,001 < w ≤ 0,5
Wasserdicht	w ≤ 0,001

3.3.2.2 Übersicht gebräuchlicher In-Situ-Messverfahren

Im nachfolgenden werden die einzelnen in-situ Messverfahren genauer vorgestellt.

Prüfrohr nach Karsten

Das Karsten'sche Prüfröhrchen besteht aus einem Glaszylinder mit einem Durchmesser von 30 mm. Auf diesem ist ein weiteres Glasröhrchen mit Messskala angebracht. Die Prüffläche wird dicht auf den zu messenden Untergrund aufgebracht und das vertikale Röhrchen

anschließend mit Wasser gefüllt. In Karsten 1997 wird empfohlen, pro Prüfbereich zehn Messungen durchzuführen und daraus einen Mittelwert zu bilden. Zudem wird empfohlen, bei niedrigen Wasseraufnahmewerten jeweils erst ab einer Minute nach Beginn der Wassereinwirkung die aufgenommene Wassermenge zu ermitteln, um die Oberflächenbenetzung nicht in die Messung miteinzubeziehen.

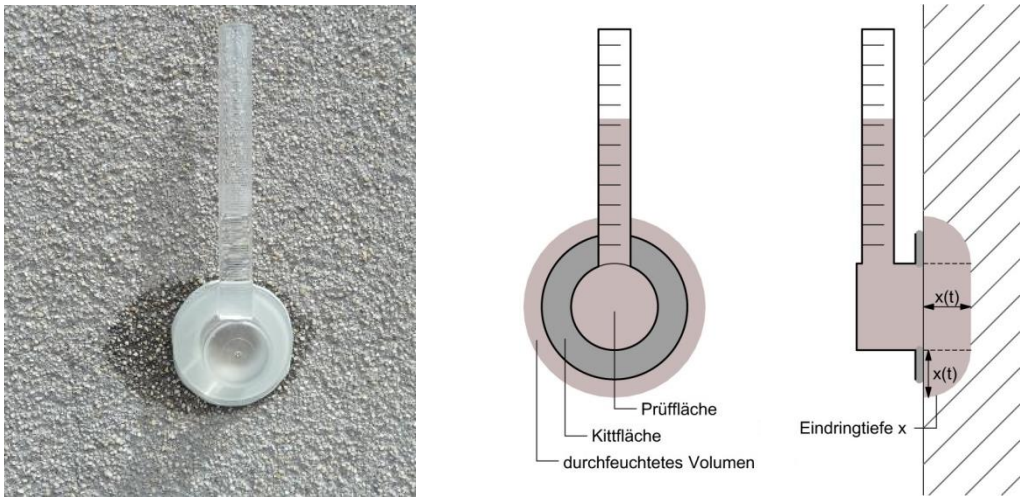


Abb. 3-25: Prüfrohr nach Karsten; links: Wasseraufnahmeversuch an Fassade; rechts: Funktionsschema, eigene Darstellung aus Neumann 2009.

Die Wasserausbreitung erfolgt mehrdimensional in die Tiefe und zur Seite, wodurch sich ein durchfeuchtetes Volumen (siehe Abb. 3-25, Funktionsschema) in Form eines Zylinders mit umgebendem Vierteltorus ausbildet.

Dies muss im Rahmen der nachfolgenden Auswertung rechnerisch korrigiert werden, da die Labormessung nach Wendler und Snethlage 1989 und DIN EN ISO 15148:2002 nur den eindimensionalen Saugvorgang untersucht. Für die Umrechnung der Wasseraufnahme in einen w-Wert nach Formel 3.1 ist bei einer dreidimensionalen Wasserverteilung eine Korrektur des Durchfeuchtungsvolumens auf den Zylinderquerschnitt notwendig. Die Korrektur kann mit den Auswerteprogrammen nach Wendler oder nach Niemeyer vorgenommen werden (Haindl 2016).

Prüfrohr nach Pleyers

Das Prüfrohr nach Pleyers versucht bereits durch seinen Aufbau, den Effekt des mehrdimensionalen Saugens zu vermindern. Das Prüfrohr besteht aus zwei voneinander abgetrennten Kammern. Die eigentliche, kreisförmige Prüffläche wird von einem zusätzlichen Kreisring umgeben. Die Flüssigkeit in der inneren Kammer breitet sich im Baustoff eindimensional bzw. zylindrisch aus. Die Flüssigkeit aus dem außenliegenden Kreisring breitet sich zusätzlich in Form eines Vierteltorus aus (Pleyers 1999). Das Funktionsschema sowie das Prüfrohr sind in Abb. 3-26 dargestellt.

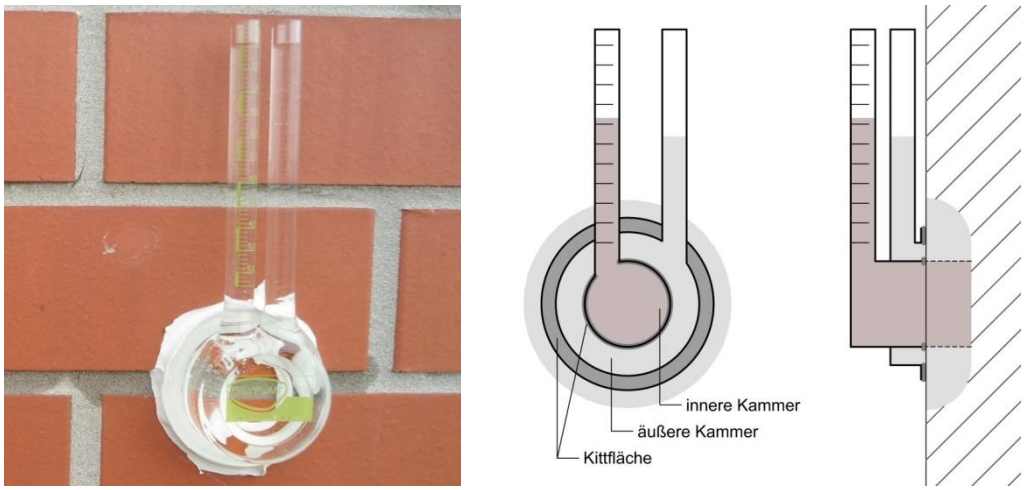


Abb. 3-26: Links ist das Prüfrohr nach Pleyers dargestellt; daneben das Funktionsschema mit der schematischen Wasserausbreitung aus (Haindl 2017).

Die beiden Flüssigkeitskammern werden mit vorgefertigten Kitt-Streifen gegeneinander abgedichtet. Bei der Durchführung muss darauf geachtet werden, dass die Wassersäulen in den beiden Röhrchen etwa gleich hoch sind, damit sich in beiden Kammern der gleiche hydrostatische Druck einstellt und Flüssigkeitstransport zwischen den Prüfflächen vermieden wird (Twelmeier 2012).

Nach Pleyers 1999 kann man durch die Skalierung in l/m² am inneren Röhrchen unmittelbar auf den jeweiligen Wasseraufnahmekoeffizienten des Baustoffes schließen. Eine weiterführende Umrechnung oder rechnerische Korrektur der Messwerte wie bei dem Prüfröhrchen nach Karsten entfällt.

Prüfplatte nach Franke

Die Prüfplatte nach Franke wurde für die Messung der Wasseraufnahme von Mauerwerksfassaden einschließlich des Fugenanteils entwickelt (Twelmeier 2012). Die vergleichsweise große Prüffläche von ca. 200 cm² entspricht der Länge eines Normalformatziegels zzgl. einer Stoßfuge (240 + 10 mm) und der Höhe eines Normalformatziegels zzgl. einer Lagerfuge (71 + 12 mm) (Franke 2015). Die für die Vergleichsmessungen verwendete Prüfplatte (siehe Abb. 3-27) ist aus Plexiglas. Die Skalierung des Röhrchens ist in Milliliter (ml) angegeben.

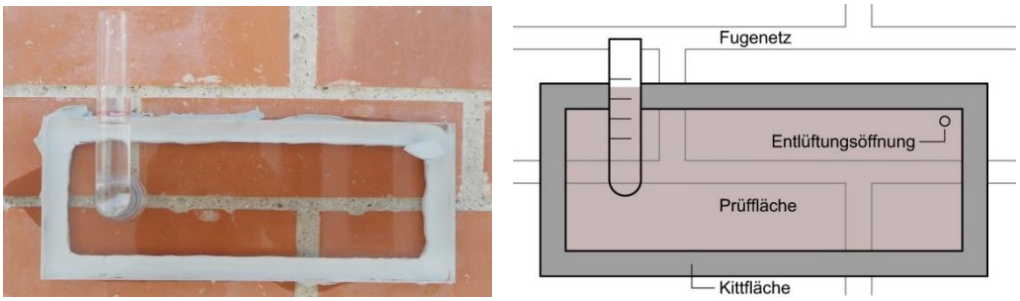


Abb. 3-27: Prüfplatte nach Franke; links: Wasseraufnahmeversuch an einem Mauerwerk; rechts: Funktionsschema, aus Haindl 2017.

Bei der Messung wird die Prüfplatte mit Kitt so an der Fassade angeordnet, dass die Lagerfuge mittig liegt und zwei halbe Stoßfugen enthalten sind. Über die Entlüftungsöffnung können etwaige Luftblasen abgelassen werden. Hierzu muss die Platte leicht schräg angebracht werden, damit die Luft entweichen kann (Twelmeier 2012).

Die Wasseraufnahme des Mauerwerks setzt sich aus der Wasseraufnahme des Steins, der Mörtelfuge sowie der Grenzfläche zwischen Stein und Fugenmörtel zusammen und kann somit auch den Einfluss eventueller Fugenabrisse erfassen. Die Wasseraufnahme des Steins allein kann aufgrund der Abmessung nicht bestimmt werden, hierzu sind eher die zuvor beschriebenen In-situ–Messmethoden mit entsprechend kleinerer Prüffläche geeignet. Die Wasseraufnahme der Grenzfläche verläuft üblicherweise weitgehend linear und wird vom hydrostatischen Druck beeinflusst. Der Anteil der Wasseraufnahme über die Grenzfläche (Stein-Mörtel) ist nach Franke 2015 auch bei intakten Fugen i.d.R. größer als der Anteil der Wasseraufnahme über den Fugenmörtel.

In Franke 2015 wird bei der w-Wert-Bestimmung aus den Messdaten zwischen den folgenden drei Fällen unterschieden:

- Mauerwerk mit schwächer oder nicht saugendem Stein z.B. Vormauerziegel
- Homogene, poröse Oberflächen z.B. Putzfassaden

Bei schwächer oder nicht saugenden Steinen (z. B. Klinker, Vormauerziegel) überwiegt der linear verlaufende Anteil der Wasseraufnahme über die Fugen. Dabei ergibt sich normalerweise ein linearer Zusammenhang zwischen dem w-Wert und der über der Zeit aufgenommenen Wassermenge.

Für Mauerwerk mit einem stark saugfähigen Stein setzt sich der w-Wert aus der Wasseraufnahme des Steins und der flächenanteiligen Fugenfläche zusammen. Bei homogenen, porösen Oberflächen wie verputzten Fassaden erfolgt die Auswertung nach Formel 3.1. Üblicherweise wird für die Auswertung der Messwert nach 15 Minuten Versuchsdauer ohne Korrektur des Anfangsverhaltens verwendet. Andere Autoren wie Haindl 2017 oder Twelmeier 2012 raten hiervon jedoch ab, da die anfängliche Stabilisierungsphase deutlich überbewertet wird.

Wasseraufnahmegerät (WAM)

Das Wasseraufnahmemessgerät (WAM) wurde im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes zwischen der HTWK Leipzig und dem Industriepartner HF Sensor GmbH entwickelt. Es basiert auf einem geschlossenen Wasserkreislauf der drucklos die Bauteiloberfläche befeuchtet. Hierzu wird eine Metallbox auf der Prüffläche angebracht und mit Dichtungsmasse möglichst wasserdicht an der Fassade angebracht. Die Prüffläche von ca. 2000 cm² (Stelzmann 2015) wird dann mit Wasser drucklos „beregnet“. Die aufgenommene Wassermenge wird über die Wägung des Wasserreservoirs bestimmt. Die mitgelieferte Software rechnet dann aus der aufgenommenen Wassermenge und der Messdauer den w-Wert der Fassade aus. Die aktuelle kommerzielle Version des Gerätes ist in Abb. 3-28 dargestellt.

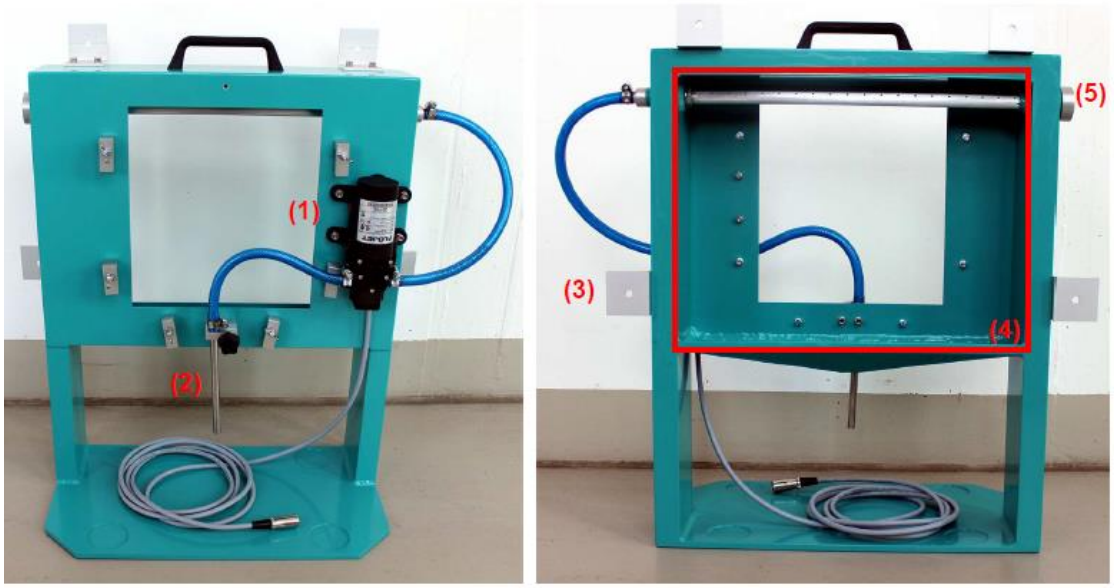


Abb. 3-28: Herstellerfoto des derzeitigen Vertriebsmodells WAM 100 B aus hf sensor GmbH 2016. Die Nummern bezeichnen die einzelnen Funktionselemente (1: Pumpe, 2: Saugrohr, 3: Befestigungswinkel, 4: Messkammer, 5: Wasserdüse).

Durch die große Fläche und das drucklose Aufbringen des Wasserfilms sind zwei wesentliche Kritikpunkte anderer Messverfahren weitgehend eliminiert worden. Die integrierte Wäge-Software berechnet automatisiert den w-Wert der Fassade.

3.3.2.3 Vergleich der Messverfahren

In diesem Kapitel werden die verschiedenen In-situ-Messmethoden miteinander verglichen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Einfluss- und Störfaktoren bei der Verwendung des Karsten´schen Prüfröhrchens, da dies das älteste und damit vermutlich am weitesten verbreitete In-situ-Messgerät ist. Danach werden die verschiedenen In-situ-Messgeräte mit der Labormessung verglichen. Basierend auf Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel und dem Projekt der Berner Fachhochschule (BFH) (Wehle und Gariglio 2015), wurden die dort erstellten Umrechnungsfunktionen um die neuen Messwerte erweitert und überarbeitet. Die Umrechnungsfunktionen erlauben die Umrechnung eines in-situ gemessenen w-Wertes in einen w-Wert, der im Labor gemessen wurde.

Einflussfaktoren bei Verwendung des Karsten’schen Röhrchens

Die Messung des w-Wertes mit dem Karsten`schen Prüfröhrchen ist auf den ersten Blick die einfachste Bestimmungsmethode. Der Einfluss der unterschiedlichen Randbedingungen auf die Qualität des Ergebnisses wird in den nachfolgenden Kapiteln im Vergleich mit anderen Messmethoden näher betrachtet.

Befüllhöhe

Das Karsten`sche Prüfröhrchen wird, wie auch die anderen In-situ-Messgeräte, über einen wassergefüllten Zylinder versorgt. Durch die Wassersäule (WS) entsteht ein hydrostatischer

Druck auf die zu befeuchtende Oberfläche der nach Knöfel et al. 1995 in eine äquivalente Windgeschwindigkeit umgerechnet werden kann:

$$v = (1600 \cdot p)^{0,5} \qquad 3.2$$

v	[m/s]	Windgeschwindigkeit
p	[kN/m²]	Druck der Wassersäule (10 cm WS ≙ 0,9807 kN/m^2)

Bei dem für diese Untersuchung verwendeten Prüfrohr nach Karsten beträgt die Höhe der Wassersäule bis zum Mittelpunkt der Prüffläche maximal 13 cm. Die Höhe der Wassersäule kann sich je nach Hersteller und Form des Röhrchens allerdings etwas unterscheiden. Die Skalierung des Röhrchens steht für die aufgenommene Wassermenge. Die Höhe der Wassersäule (WS) muss separat gemessen werden. Nach Formel 3.2 sind in Tab. 3-7 verschiedene Höhen der WS einzelner Messgeräte in eine äquivalente Windgeschwindigkeit umgerechnet.

Tab. 3-7: Vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Messgeräte und Wassersäulen bzgl. der äquivalenten Windgeschwindigkeit.

Messgerät	**Wassersäule [cm]**	**Windgeschwindigkeit [m/s]**
Prüfrohr nach Karsten	13,0	45
	10,0	40
	8,5	37
	7,6	35
	4,3	26
Prüfrohr nach Pleyers	14,5	48
Prüfplatte nach Franke	5,0	28

Eine Befüllung des Karsten'schen Prüfröhrchens bis zur Nullmarke führt zu einem hydrostatischen Druck, wie er umgerechnet bei einer Windgeschwindigkeit von 45 m/s (163 km/h) entstehen würde. Das Befüllen bis zur Skalierung von 8,0 ml = 4,3 cm WS entspricht einer Windgeschwindigkeit von 26 m/s bzw. 94 km/h. Ähnlich verhält es sich bei Verwendung des Prüfrohrs nach Pleyers. Zum Vergleich: Bereits ab 33 m/s bzw. ca.119 km/h wird von einem Orkan gesprochen, der nur sehr selten im Landesinneren auftritt (Arndt 2014). Ein Windaufkommen in dieser Stärke ist nur an wenigen Tagen in Deutschland vorzufinden und stellt eine äußerst hohe und seltene Belastung für die Fassade dar (Knöfel et al. 1995). Vergleicht man beispielsweise die langjährigen Mittelwerten in 10 m Höhe des DWD (Deutscher Wetterdienst 2017) liegt das Maximum für den Standort Holzkirchen bei 6,2 m/s. Werden für diesen Standort die Windgeschwindigkeiten von 1993 bis 2013 ausgewertet zeigte sich, dass das 99% Quantil bei 6,1 m/s und das 99,9% Quantil bei 15,5 m/s liegt. Anders ausgedrückt, Windgeschwindigkeiten größer als 15,5 m/s bzw. 56 km/h traten in Holzkirchen in den letzten 20 Jahren insgesamt nur an etwa 1,5 Tagen auf. Auch wenn in Böen kurzfristig deutlich höhere Windgeschwindigkeiten auftreten dürften, scheinen die erzeugten hydrostatischen Drücke deutlich größer zu sein, als die unter realen Witterungsbedingungen auftretenden Drücke.

Um den Einfluss unterschiedlicher Befüllhöhen genauer zu quantifizieren, wurden drei Karsten'sche Prüfröhrchen mit unterschiedlich hohen Wassersäulen befüllt und die über zwei Stunden aufgenommene Wassermenge bestimmt. Dieser Vergleich wurde an sieben verschieden saugfähigen Oberflächen durchgeführt. Der grundlegende Versuchsaufbau ist nachfolgend in Abb. 3-29 dargestellt.

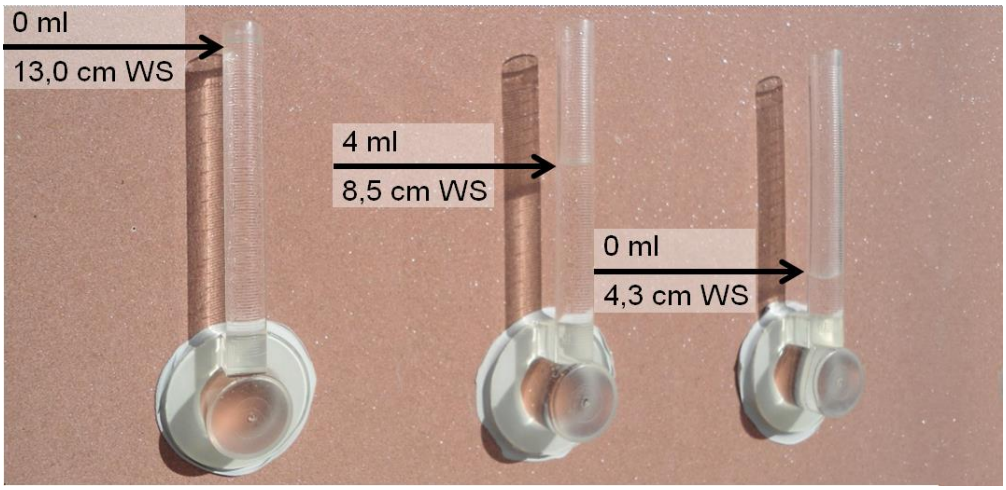


Abb. 3-29: Vergleichsmessung mit unterschiedlicher Befüllhöhe aus Haindl 2017.

Die aufgenommene Wassermenge, die in den verschiedenen Messreihen jeweils nach zwei Stunden bei unterschiedlicher Befüllhöhe aufgenommen wurde, ist in Abb. 3-30 dargestellt.

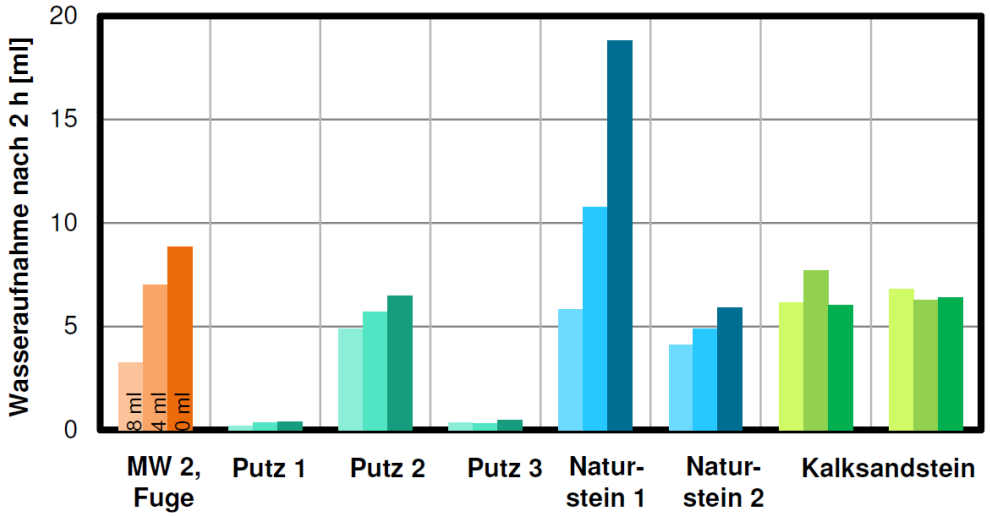


Abb. 3-30: Wasseraufnahme verschiedener Oberflächen mit zunehmender Höhe der Wassersäule (4,3 cm, 8,5 cm,13 cm) aus Haindl 2017

Die Wasseraufnahme des stark saugenden Rüthener Sandsteins steigt mit Erhöhung der Befüllhöhe stark an. Auch bei der Fuge des Mauerwerks 2 (MW2), den Prüfflächen Putz 1 und Putz 2 sowie des Sander Sandsteins nimmt die Wasseraufnahme bei steigender Befüllhöhe deutlich zu. Die eher schwach saugende Prüffläche Putz 3 und die Kalksandsteine zeigen

dagegen keine eindeutige Zunahme der Wasseraufnahme bei unterschiedlich hoher Wassersäule auf.

Tendenziell nimmt die Wasseraufnahme mit steigender Wassersäule zu; besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei saugfähigen Untergründen. Die vollständige Befüllung mit 13 cm WS scheint jedoch im Vergleich zur normalen Bewitterung tendenziell zu einer deutlich zu hohen Wasseraufnahme zu führen.

Messzeitpunkt

Ebenfalls von Bedeutung für die Wasseraufnahme ist die hygrische Vorgeschichte des Bauteils, also eine Betauung oder der Einfluss von Schlagregenereignissen. Diese Ereignisse spiegeln sich in der Ausgangsfeuchte der Außenoberfläche wieder. Der Einfluss dieses Anfangsfeuchtegehaltes wird an einer verputzten Prüffläche an 10 Messreihen überprüft. Um Restfeuchte von vorausgehenden Messungen zu vermeiden, wird für jede Messreihe eine andere Stelle der Fassade ausgewählt. Die zehn unterschiedlichen Messpunkte auf der Fassade sind in Abb. 3-31 dargestellt.

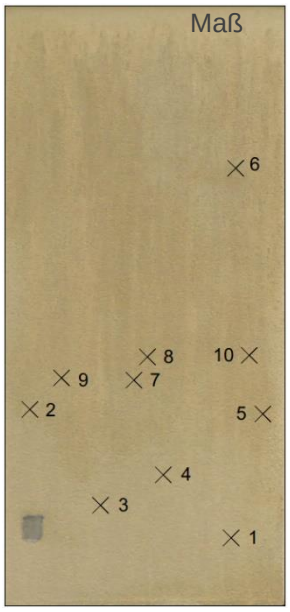


Abb. 3-31: Die verputzte Prüffläche, mit den jeweils betrachteten Messpunkten.

Die Messungen fanden im Juni und Juli 2015 satt. Innerhalb dieses Zeitraums kamen 22 Regentage bzw. 14 Regenereignisse vor. Die dabei aufgetretenen Niederschlagsmengen sind im Anhang in Abbildung A- 1 und Abbildung A- 2 aufgeführt.

Zusätzlich zum Regen wurden die durchschnittlichen Temperaturen und absoluten Feuchten während der Messung protokolliert; die Ergebnisse sind nachfolgend in Tab. 3-8 aufgeführt. Die Wasseraufnahme wurde nach einer sowie nach zwei Stunden Messdauer bestimmt.

Tab. 3-8: Wasseraufnahme der verputzten Prüffläche bei Verwendung des Prüfrohrs nach Karsten an zehn Messtagen (Haindl 2017).

Mess-reihe	Datum	Beginn, Uhrzeit	Temperatur [°C]	absolute Feuchte [g/m³]	Wasseraufnahme [ml]	
					Nach 1 Std.	Nach 2 Std.
1	11.6.	10:10	18	12	3,7	7,2
2	12.6.	10:15	26	10	4,8	9,6
3	19.6.	14:35	14	8	3,6	6,5
4	22.6.	13:30	19	19	3,8	6,9
5	25.6.	14:25	21	9	4,2	7,7
6	29.6.	15:00	24	10	4,7	9,4
7	30.6.	7:50	23	14	3,6	6,5
8	07.7.	8:00	28	18	3,8	6,7
9	10.7.	7:50	17	9	2,8	4,9
10	21.7.	16:30	30	13	5,4	10,0
Mittelwert					4,0	7,5
Standardabweichung					0,7	1,6
Standardabweichung/Mittelwert					17,7%	20,6%

Wie aus der Tab. 3-4 deutlich wird, fanden die Messungen nicht nur an verschiedenen Stellen, sondern auch zu unterschiedlichen Uhrzeiten und unter unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen statt. Dabei treten Schwankungen von bis zu 20 % auf. Diese könnten je nach Wahl von Position und Zeitpunkt auch im realen Messbetrieb auftreten. Die Messung über einen Zeitraum von 2 Stunden ergibt eine fast doppelt so hohe Wasseraufnahme wie die Messung nach einer Stunde. Je länger die Messung andauert umso dominanter wird die kontinuierliche Wasseraufnahme gegenüber der anfänglichen Stabilisierungsphase. Um einen etwaigen Zusammenhang mit dem Umgebungsklima zu ermitteln wurden die gemessenen Wasseraufnahmemengen nach einer und nach zwei Stunden den jeweiligen Klimabedingungen gegenübergestellt.

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass das Umgebungsklima die Höhe der aufgenommenen Wassermenge beeinflusst und bei den untersuchten Oberflächen zu einer Messunsicherheit in der Größenordnung von bis zu ca. 20 % führt. Bezogen auf die Gesamtunsicherheit des Messverfahrens spielt dies jedoch eine eher untergeordnete Rolle. Ob sich z.B. die Empfehlung von Schnapauff et al. 1993, möglichst mehrere Tage nach einem Regenereignis abzuwarten, in der Praxis sinnvoll umsetzen lässt, sei dahingestellt.

Für die praktische Messausführung sollte dennoch darauf geachtet werden, dass die Fassadenfläche möglichst nicht mehr betaut ist und im Vorfeld nicht direkt beregnet wurde.

Messfläche bzw. Anzahl der Messpunkte

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Größe der untersuchten Oberfläche. Die Größe der untersuchten Fläche setzt sich aus der tatsächlichen Messfläche der einzelnen Messgeräte und der Anzahl der Messpunkte zusammen.

Unter der tatsächlichen Messfläche versteht man die Fläche, die nach Abzug der Kitt-Fläche zur eigentlichen Prüfung zur Verfügung steht. Für deren Ermittlung werden unabhängig von einem Wasseraufnahmetest zehn Prüfröhrchen nach Karsten, fünf Prüfröhrchen nach Pleyers und fünf Prüfplatten nach Franke auf einem wasserdichten Untergrund untersucht.

Auf das jeweilige Messgerät wird Kitt aufgebracht und dieses dann auf eine Klarsichtfolie aufgedrückt und mit der Prüffläche nach unten auf ein Kopiergerät aufgelegt und kopiert. Anhand des Ausdrucks wird die verringerte Fläche mit einem Planimeter bestimmt. Der Vergleich mit der theoretisch zur Verfügung stehenden Prüffläche ohne Berücksichtigung der Kitt-Wulst ist nachfolgend in Tab. 3-9 aufgeführt.

Tab. 3-9: Vergleich der theoretischen mit der tatsächlichen Prüffläche der drei In-situ-Messgeräte.

	Prüfrohr nach Karsten	Prüfrohr nach Pleyers	Prüfplatte nach Franke
theoretische Prüffläche [cm²]	7,1	7,1	200
tatsächliche Prüffläche [cm²]	6,0 ± 12 %	6,2 ± 3,2 %	195,9 ± 2,1 %

Während bei den kleineren Prüfröhrchen der Flächenverlust durch den Kitt -Wulst bei maximal 12 % liegt, führt er bei der deutlich größeren Franke Platte nur zu einer ca. 2 % kleineren Prüffläche. Die kleinere Standardabweichung bei Verwendung des Prüfröhrchens nach Pleyers erklärt sich durch die Verwendung des vorgefertigten und deutlich schmaleren Kitt-Streifens. Die manuelle Herstellung des Kitts vor Ort für das Karsten'sche Prüfrohr führt zu entsprechend größeren Abweichungen.

Die DIN EN ISO 15148 (Blocken et al. 2007) empfiehlt für die Labormessung mindestens drei Probekörper mit einer Fläche von 100 cm², also eine Gesamtfläche von mindestens 300 cm². Setzt man dies in Relation zur Größe der In-situ-Messgeräte müssten z.B. fast 50 Messungen mit dem Karsten`schen Prüfröhrchen durchgeführt werden, um dieselbe Fläche zu beproben. Da die Franke-Platte eine größere Fläche als 100 cm² beprobt, müsste hier nur die Mindestzahl von drei Messungen je Oberfläche durchgeführt werden.

Exemplarisch wurden die Schwankungsbreiten, die durch die unterschiedliche Messposition auf dem ansonsten gleichen Untergrund entsteht, für das Karsten´sche Prüfröhrchen untersucht. Hierfür wurden 10 Messstellen an einer verputzten Oberfläche an zwei Tagen betrachtet, um sowohl die Schwankungsbreite innerhalb einer Oberfläche als auch durch unterschiedliche

Tage an der gleichen Oberfläche erfassen zu können. Die hierfür betrachteten Positionen sind nachfolgend in Abb. 3-32 dargestellt.

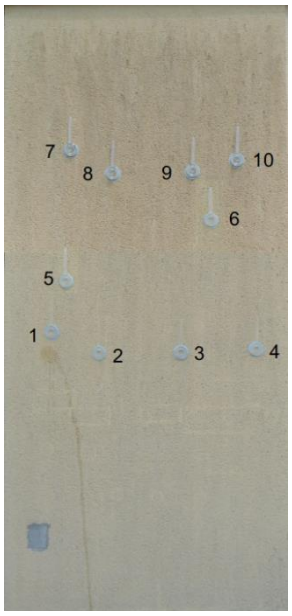


Abb. 3-32: Verputzte Außenoberfläche für die Vergleichsmessung (Haindl 2016, 2017).

Die wurden an zwei Tagen im Juni und Juli 2015 vermessen; die aufgenommenen Wassermengen bei Verwendung des Karsten`schen Prüfröhrchens sind nachfolgend in Abb. 3-33 dargestellt.

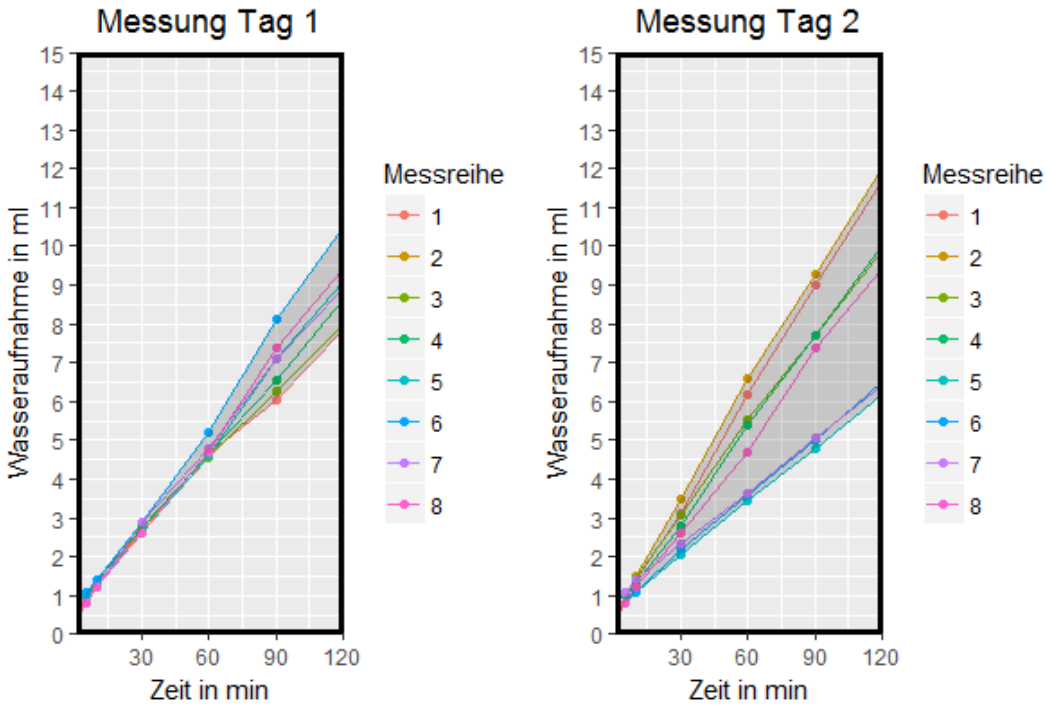


Abb. 3-33: Vergleich der an den ersten 8 Messpunkten aufgenommenen Wassermengen derselben verputzten Oberfläche an zwei Messtagen.

Wie Abb. 3-33 verdeutlicht, schwanken die Messwerte sowohl zwischen den beiden Messtagen, als auch an den verschiedenen Messpositionen.

Kittausdehnung

Die in der Untersuchung verwendeten In-situ-Testverfahren werden mit einem dauerelastischen Dichtstoff auf die Testwände aufgebracht. In einer Testreihe wurde untersucht, inwieweit sich der hydrostatische Druck der Wassersäule der einzelnen Messgeräte auf die Abdichtung auswirkt. Hierzu wurden die Messgeräte auf einem wasserdichten Untergrund (Blech) angebracht und mit Wasser befüllt. Dabei wurde festgestellt, dass während der anfänglichen Stabilisierungsphase der Wasserspiegel leicht abfällt.

Zunächst werden die Ergebnisse des Karsten´schen Prüfröhrchens genauer betrachtet. Dabei werden vier Varianten mit einer Befüllhöhe von 13 cm bzw. 9 cm und viel bzw. wenig Kitt untersucht. Die Skalierung der verwendeten Karsten´schen Prüfröhrchen gibt 0 ml bei einer Wassersäule von 13 cm an, zum leichteren Verständnis ist der Zusammenhang nachfolgend in Abb. 3-34 dargestellt. Zu jeder der Varianten wird der Mittelwert aus den vier durchgeführten Messreihen gebildet und in Abb. 3-35 dargestellt.

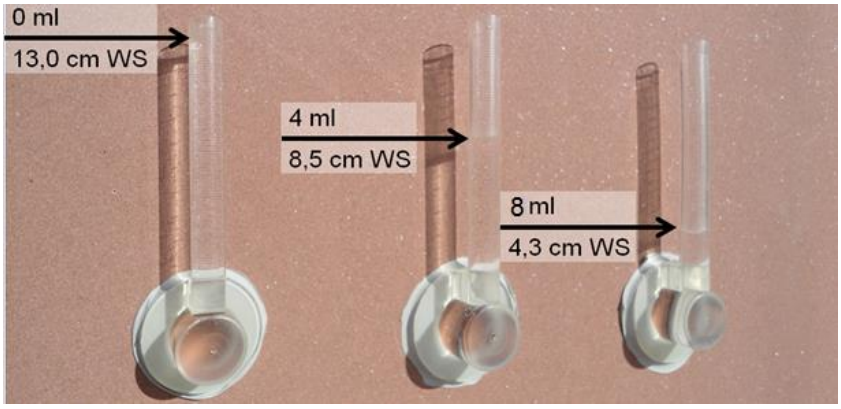


Abb. 3-34: Veranschaulichung des Unterschieds zwischen der Skalierung in cm Wassersäule und in ml (Haindl 2016).

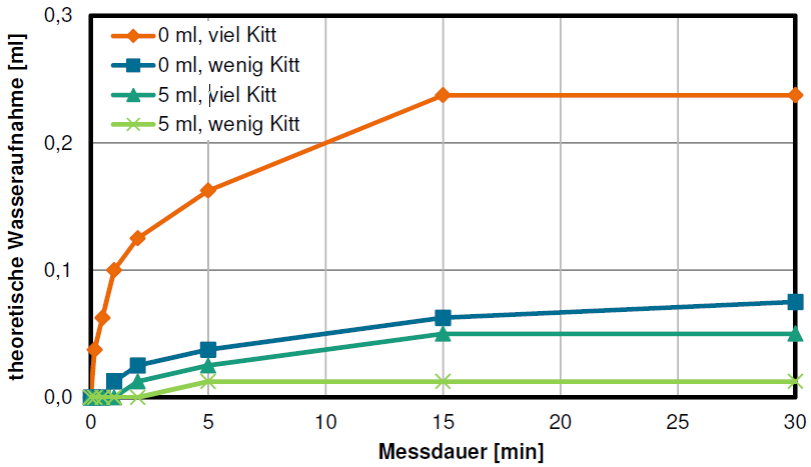


Abb. 3-35: Abgesunkene Wassersäule im Karsten'schen Prüfröhrchen durch die Kittausdehnung verschieden dicker Kitt – Streifen (Haindl 2017).

Bei einer Befüllhöhe von 13 cm (entspricht 0 ml) und der Verwendung von viel Kitt sinkt die Wassersäule im Mittel um 0,24 ml ab. Wird diese theoretische Wasseraufnahme nach 30 Minuten in einen w-Wert umgerechnet, so ergibt sich ein w-Wert von 0,6 kg/(m^2·h^{0,5}). Der höchste Anstieg wird während der anfänglichen Stabilisierungsphase nach etwa einer Minute gemessen und entspricht umgerechnet einem w-Wert von 1,3 kg/(m^2·h^{0,5}). Bei Verwendung von wenig Kitt ergibt sich innerhalb der Messdauer von 30 Minuten eine Spannbreite für den mittleren w-Wert von 0 – 0,2 kg/(m^2·h^{0,5}). Bei einer Messdauer von nur 15 min liegt der Fehler durch die Kittausdehnung dementsprechend bei bis zu 0,6 kg/(m²h·h^{0,5}). Bei längeren Messdauern wird der Fehler kleiner, bei kürzeren entsprechend größer.

Ein Vergleich mehrerer Messpositionen, hier ohne Variation von Kittdicke oder Füllhöhe, wurde auch für die Prüfplatte nach Franke durchgeführt. Hierbei wurden fünf Positionen sowie der daraus resultierende Mittelwert untersucht. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Abb. 3-36 dargestellt.

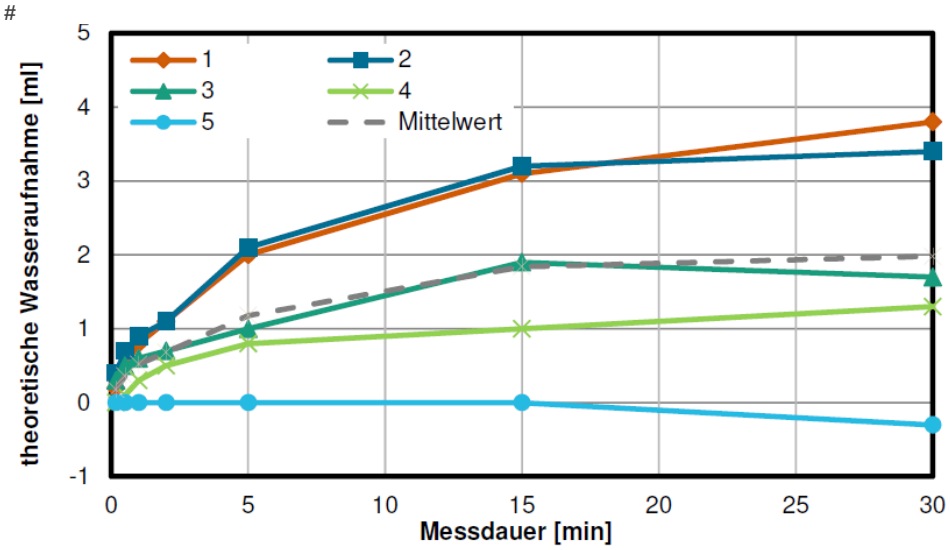


Abb. 3-36: Abgesunkene Wassersäule der Prüfplatte nach Franke durch die Kittausdehnung (Haindl 2017).

Nach einer Messdauer von 30 Minuten ist die abgelesene Wassermenge um maximal 3,8 ml „abgesunken“. Im Mittel über die fünf Messpositionen ist sie um 2,0 ml abgesunken. Das Absinken der Wasseraufnahme bei den Messreihen 3 und 5 ist auf die Sonneneinstrahlung während der Messung zurück zu führen. Diese führt zu einer Erwärmung des Wassers und damit zu einer Zunahme des Volumens und in der Folge zu einer negativen Wasseraufnahme. Für die Messung 5 wurde nachträglich eine Erwärmung von 15 K bestimmt. Wird ein thermischer Ausdehnungskoeffizient γ = 0,259 x 10^{-3} a/K bei einer Umgebungstemperatur von 24 °C herangezogen ergibt sich ein rechnerischer Anstieg der Wassermenge um 0,6 ml.
Das Abfallen des Wasserpegels zu Beginn einer Messung kann auf die Ausdehnung der Kitt-Streifen zurückgeführt werden. Dies führt zu einer Vergrößerung des vorhandenen Volumens und damit zu einem Absinken des Wasserspiegels. In der Bewertung führt dies zu einer erhöhten Wasseraufnahme und damit auch zu einem höheren w-Wert. Um diesen Effekt zu verringern empfiehlt Haindl 2017 die Verwendung von möglichst dünnen Kitt–Streifen und

niedrigeren Befüllhöhen. Auch eine Berücksichtigung bzw. eine Auswertung erst nach der anfänglichen „Stabilisierungsphase“ scheint sinnvoll, da der größte Effekt innerhalb dieser ersten Minuten eintritt.

Auswertungsmethoden

Die Prüfung der Wasseraufnahmefähigkeit erfolgt im Regelfall im Labor mit einer Messdauer von 24 Stunden bei einem eindimensionalen Saugvorgang. Im Gegensatz zur Labormessung gibt es für In-situ-Verfahren bisher kein geregeltes Verfahren zur Auswertung und Bestimmung des w-Wertes. Bei In situ-Messungen liegt zunächst ein dreidimensionaler Saugvorgang vor. Dieser muss entweder messtechnisch (Pleyers–Röhrchen) oder rechnerisch während der Auswertung korrigiert werden. Für die Messdauer gibt es unterschiedliche Forderungen aber keine allgemeingültige Anforderung. Zur Auswertung der aufgenommenen Wassermenge gibt es lediglich die Empfehlung, für das Karsten’sche Prüfröhrchen ein Auswerteprogramm zu verwenden und für das Prüfrohr nach Pleyers und der Prüfplatte nach Franke eine Berechnung mittels Formel anhand des 15-Minuten-Wertes vorzunehmen (Haindl 2016). Die zur Verfügung stehenden Auswerte-Methoden werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Der w-Wert berechnet sich nach Formel 3.1 aus der aufgenommenen Wassermenge einer definierten Fläche über die Zeit. Dies setzt jedoch voraus, dass der Feuchtetransport lediglich eindimensional auftritt. Bei dem Karsten‘schen Prüfröhrchen und der Prüfplatte nach Franke tritt zusätzlich zur eindimensionalen Leitung eine parallel zur Oberfläche verlaufende Querleitung auf, die zu einer erhöhten Wasseraufnahme führt. Dieser „Messfehler“ muss nachträglich rechnerisch korrigiert werden.

Je kleiner die Prüffläche ist, desto größer ist der Einfluss dieses dreidimensionalen Randeinflusses. Dies bedeutet, dass sich der Messfehler beim Karsten`schen Prüfröhrchen stärker auswirkt als bei der Prüfplatte nach Franke. Für die Auswertung der Messwerte mit dem Karsten’schen Prüfröhrchens wurden von Wendler und Niemeyer zwei Auswerteprogramme entwickelt.

Als erstes wird das von Wendler und Snethlage 1989 entwickelte Auswerte-Programm Calkarow vorgestellt. Die Software läuft nur auf einer veralteten Version des Betriebssystems Lotus und kann daher auf aktuellen Rechnern nicht mehr eingesetzt werden. Die Auswertungen im Rahmen von Haindl 2017 wurden daher in Zusammenarbeit mit dem Entwickler des Programms Herrn Dr. Wendler direkt in seinem Münchner Büro vorgenommen.
Das Programm bestimmt iterativ den Wassereindringkoeffizienten (B-Wert) durch den Vergleich der Messwerte mit einer idealisierten Kurvenschar. Der den Messwerten am nächsten kommenden B-Wert bzw. der korrespondierende w-Wert wird dann über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt (Wendler und Snethlage 1989). Die Auswertung von Wasseraufnahmekurven mit Hilfe von Calkarow kann zu unrealistischen Werten führen, wenn der Verlauf der gemessenen Kurve nicht der Idealkurve entspricht. Um eine Auswertung nicht idealer Kurven zu ermöglichen, wurde von Niemeyer ein alternatives, auf Excel basierendes Programm entwickelt, das kostenlos von der Internetseite des Niedersächsischen Landesamts für Denkmalpflege heruntergeladen werden kann.

In der in Abb. 3-37 dargestellten Auswertemaske werden die Messwertpaare, der Innendurchmesser des Mess-Röhrchens, die Wasserkapazität und ein Intervall für den w-Wert eingetragen.

Abschätzung des Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert) anhand von Messungen zur Wasseraufnahmefähigkeit an porösen Baustoffen mit dem KARSTEN´schen Prüfröhrchen

nach Niemeyer; (karsten2010-03)

Allgemeine Angaben

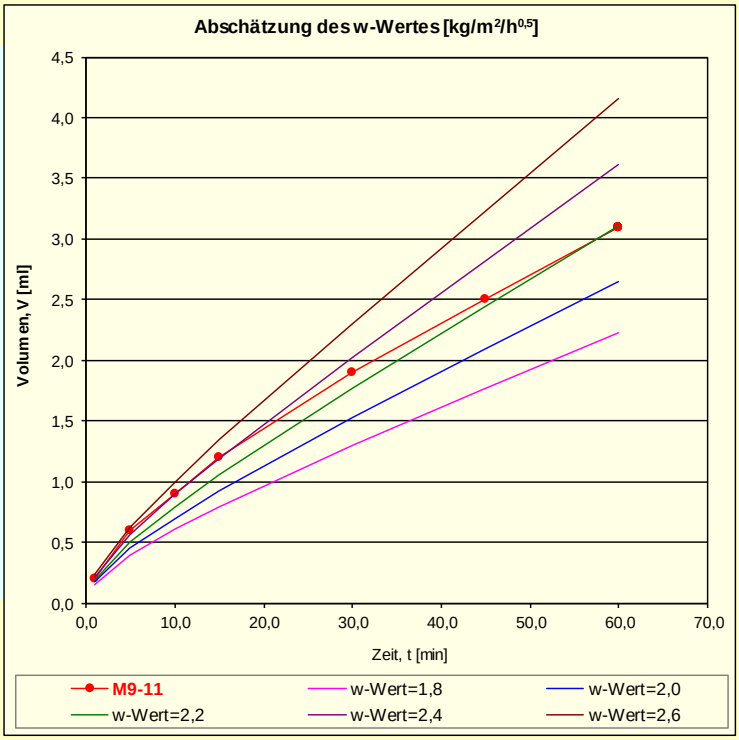
Datum der Messung:	**12.06.2015**	**Bezeichnung des Messpunktes:**	**M9-11**
Ort:	**Fraunhofer-Institut für Bauphysik**		
Objekt:	**Prüffläche Kalksandstein**		
Beprobungsort:			
Besonderheiten:			

DATENEINGABE

Innendurchmesser des Röhrchens:	**2,8**	**cm**	
Wasseraufnahmekapazität, WAK:	**23,5**	**Vol.%**	
w-Wert Bereich [kg/m²/h^{0,5}] von	**1,8**	**bis**	**2,6**

Messwerteingabe

Meß-Nr.	Zeit [min,sec]	Volumen [ml] M9-11
1	1,00	0,20
2	5,00	0,60
3	10,00	0,90
4	15,00	1,20
5	30,00	1,90
6	45,00	2,50
7	60,00	3,10
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		



ERGEBNISSE

Wasseraufnahmekapazität, WAK:	**23,5**	Vol.%
Wasseraufnahmekoeffizient; w-Wert:	**2,2**	kg/m²/h^{0,5}
Wassereindringkoeffizient, B-Wert:	**0,9**	cm/h^{0,5}

Abb. 3-37: Programmoberfläche des Auswerteprogramms nach Niemeyer aus Haindl 2017.

Durch Variieren des Intervalls für den w-Wert wird versucht, die Kurvenschar an die Messwertkurve anzunähern. Der w-Wert wird hierbei nicht iterativ berechnet, sondern vom Benutzer durch Vergleich mit der Kurvenschar manuell und visuell abgeschätzt.

Beide Auswerteverfahren erfordern einiges an Erfahrung und Sicherheit und sind

dementsprechend anfällig für fehlerhafte Bedienung.

Die Auswertung nach DIN EN ISO 15148:2002 ist für die Labormessung des w-Wertes vorgesehen. Für die Bestimmung des w-Wertes im Labor wird die Massendifferenz eines Probekörpers in Relation zur Ausgangsmasse bezogen auf die wasseraufnehmende Fläche bestimmt. Die Differenz der aktuellen Masse zur Ausgangsmasse entspricht der aufgenommenen Wassermenge seit der letzten Wägung. Für die Auswertung wird dann die aufgenommene Wassermenge über der Wurzel der Zeit aufgetragen. Exemplarisch ist dies nachfolgend in Abb. 3-38 dargestellt.

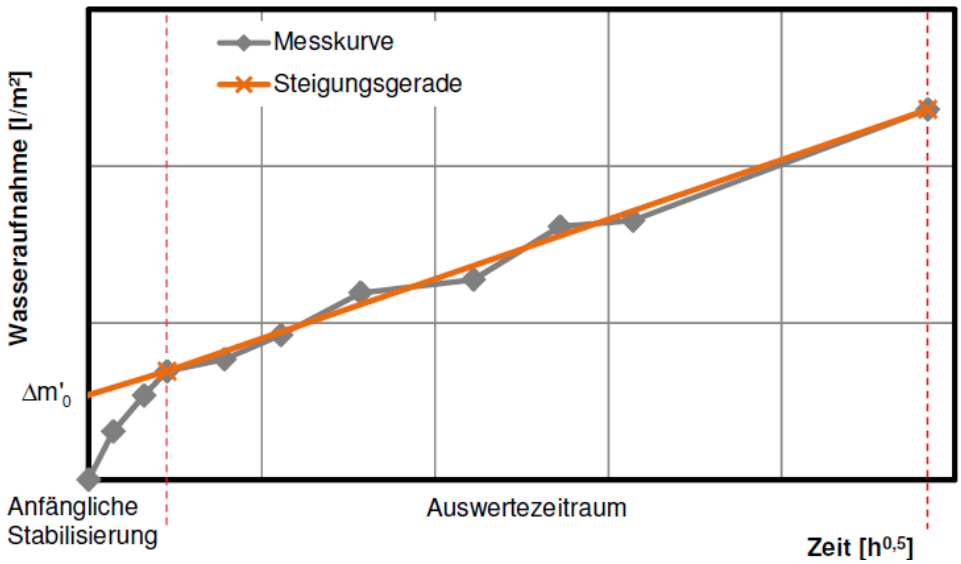


Abb. 3-38: Kapillare Wasseraufnahme, dargestellt in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit aus Haindl 2017.

Hierbei wird die anfängliche Stabilisierungsphase vernachlässigt, für den verbleibenden Zeitraum wird eine Regressionsgerade durch die Punktewolke gelegt. Die Steigung der Geraden entspricht dann dem w-Wert des Prüfkörpers.

$$W_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{t_f^{0,5}} \qquad 3.3$$

W_w	[kg/(m²·h^{0,5})]	Wasseraufnahmekoeffizient
$\Delta m'_{tf}$	[kg/m²]	Wert von Δm auf der Geraden zur Zeit t_f
$\Delta m'_0$	[kg/m²]	Extrapolierter Wert von Δm auf der Geraden zur Zeit t_0
t_f	[h]	Prüfdauer (im allgemeinen ein Tag)

Dieses Vorgehen kann teilweise auch auf die Auswertung der In-situ-Messwerte übertragen werden. Durch die Bestimmung des w-Werts über die Regressionsgerade und nicht mehr direkt über die einzelnen Messwerte erhöht sich die Fehlertoleranz gegenüber einzelnen Ausreißern. Wird die anfängliche Stabilisierungsphase vor der Auswertung entfernt, können neben der initialen Benetzung auch Fehlereinflüsse wie z.B. durch die Kittausdehnung minimiert werden.

Vergleich der in-situ Messgeräte mit der Labormessung

Für die rechnerische Bewertung eines Innendämmstoffsystems, sei es nach dem vereinfachten Verfahren nach WTA Merkblatt 6-4 oder standortspezifisch durch eine hygrothermische Simulation, ist es notwendig, den w-Wert der Fassadenoberfläche möglichst genau abschätzen zu können. Die höchste Genauigkeit ist durch die zerstörende Prüfung unter Laborbedingungen nach der DIN EN ISO 15148:2002 zu erreichen – hier kann es allerdings schwierig sein, die reale Situation im Bereich der Fugen abzubilden, da diese durch die Entnahme des Probekörpers manchmal beschädigt wird. Um zu ermitteln, inwieweit in situ gemessene w-Werte mit den Laborwerten zu vergleichen sind wurden in Haindl 2017 drei Oberflächen zusätzlich durch die Laborprüfung betrachtet. Die hierfür verwendeten Probekörper wurden entweder direkt aus der verputzten und bewitterten Freilandversuchswand („Putz 2“) entnommen oder es wurden Rückstellproben („Kratzputz“ und „Kalksandstein“) der jeweiligen Materialchargen nachträglich untersucht. Die detaillierten Einzelergebnisse können Haindl 2016 und Haindl 2017 entnommen werden. Für den Vergleich im Rahmen dieses Projektes werden die Labormessungen und das Messröhrchen nach Pleyers gemäß DIN EN ISO 15148:2002 ausgewertet und das Prüfröhrchen nach Karsten und die Prüfplatte nach Franke mit Hilfe von Calkarow bzw. dem Programm nach Niemeyer. Die Ergebnisse dieses Vergleiches sind in Tab. 3-10 aufgeführt.

Tab. 3-10: Mittlere w–Werte der in situ Messungen und der Labormessung nach DIN EN ISO 15148:2002 aus Haindl 2017.

Untergrund	**Karsten [kg/m²h^{0,5}]**		**Franke [kg/m²h^{0,5}]**		**Pleyers [kg/m²h^{0,5}]**		**Labor [kg/m²h^{0,5}]**	
Kratzputz	0,4	±0,05	0,17	±0,03	0,2	±0,06	0,09	±0,02
Putz 2	3,4	±0,4	1,7	±0,05	1,1	±0,2	0,5	±0,01
Kalksandstein	7,2	±0,63	-	-	3,8	±0,3	4,4	±0,33

Vor allem im Bereich der niedrigen w-Werte von „Putz 2“ und dem „Kratzputz“ wurden in situ deutlich höhere Werte gemessen als dies im Labor der Fall ist. Für den „Putz 2“, bei dem auch die Franke-Platte deutlich höhere Werte liefert, scheint der Effekt der oberflächenparallelen Feuchteausbreitung (Wendler und Snethlage 1989) ein entscheidender Einflussparameter zu sein. Dies wird bei dem Messröhrchen nach Pleyers messtechnisch durch den zweiten Prüfring korrigiert, weswegen dieses Messsystem hier etwas besser abschneidet. Generell zeigen die Prüfplatte nach Franke und das Messröhrchen nach Pleyers signifikant bessere Übereinstimmungen mit den Laborwerten als die Karsten-Messung. Für den Kalksandstein konnte keine Messung mit der Franke-Platte durchgeführt werden, da die Probe zu klein war.

Umrechnungsfunktionen

Wie im vorausgegangenen Kapitel deutlich wurde, führt der stichprobenartige Vergleich der In-situ-Messgeräte mit den Labormessungen zu teilweise deutlichen Abweichungen. Dieses Ergebnis beruht jedoch nur auf dem Vergleich von drei Stichproben. Um die Aussage, ob bzw.

mit welcher Unsicherheit die in situ Messwerte in einen vergleichbaren w-Wert aus der Labormessung überführt werden können, auf eine etwas breitere Basis an Messwerten zu stellen, wird der Ansatz der Berner Fachhochschule (BFH) um die in Tab. 3-10 aufgeführten Werte erweitert. In dem Forschungsprojekt Wehle und Gariglio 2015 der BFH wurden drei reale Objekte und eine Testfassade in zwei unterschiedlichen Orientierungen betrachtet. Dabei wurden die historischen Putze (bis Baujahr 1920) mit der Prüfplatte nach Franke, dem Karsten´schen Prüfröhrchen und dem Wasseraufnahmemessgerät (WAM) vergleichend zur Labormessung betrachtet. Im zweiten Schritt wurde ein lineares Regressionsmodell entwickelt und auf seine statistische Signifikanz hin untersucht. Diesem Ablauf folgt auch diese Untersuchung. Die von der BFH ermittelten Werte werden dabei um die Messungen in Tab. 3-10 erweitert. Da es sich um einen Regressionsansatz handelt, besteht die Hoffnung, dass sich durch die zusätzlichen Werte eine Verringerung der Schwankungsbreite und damit eine erhöhte Genauigkeit der Umrechnung ergeben. Zunächst wird dieses Vorgehen für den Vergleich des Karsten-Röhrchens und der Labormessung durchgeführt; dies ist nachfolgend in Abb. 3-39 dargestellt.

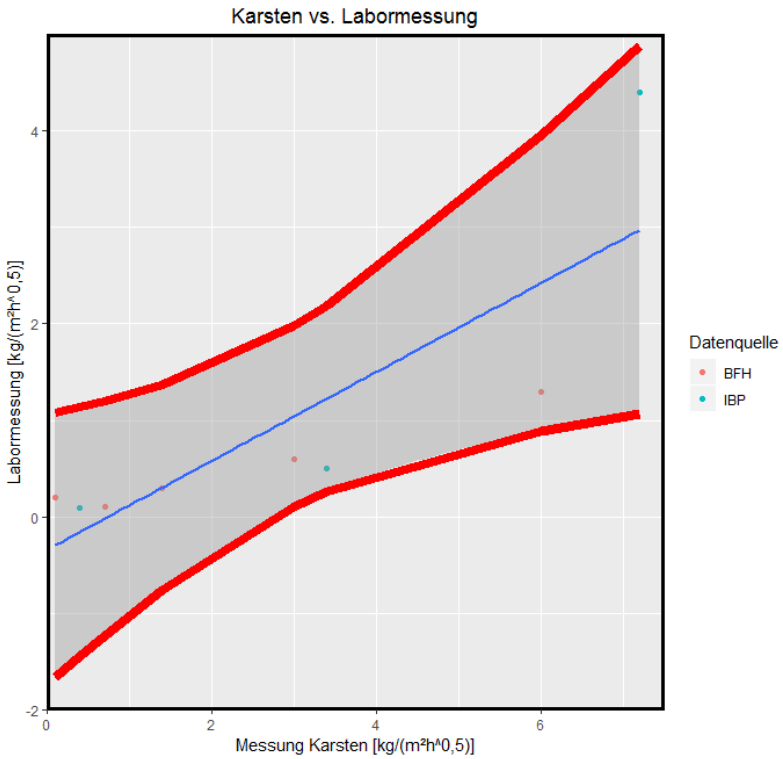


Abb. 3-39: Vergleich der in situ Messergebnisse bei Verwendung des Karsten Röhrchens mit den zugehörigen im Labor bestimmten Werten. Das Konfidenzband (dunkelgrau/rot) bezieht sich auf das Konfidenzintervall zur zweifachen Standardabweichung (σ) der Mittelwerte.

Abb. 3-39 zeigt die ursprünglichen 5 Messpunkte in rot und die drei Messpunkte aus Tab. 3-10 in grün. Das grau-rote Konfidenzband entspricht dem 95-%-Konfidenzbereich der blauen Regressionsgeraden. Wie die Abbildung zeigt, weitet sich durch die neuen Messwerte das Konfidenzband deutlich auf; dies ist aber vor allem auf den Messwert im hohen w-Wert-Bereich (Kalksandstein) zurückzuführen. Daher wird im zweiten Schritt dieser Messpunkt aus der Auswertung wieder herausgenommen. Danach ergibt sich die in Abb. 3-40 dargestellt Korrelation.

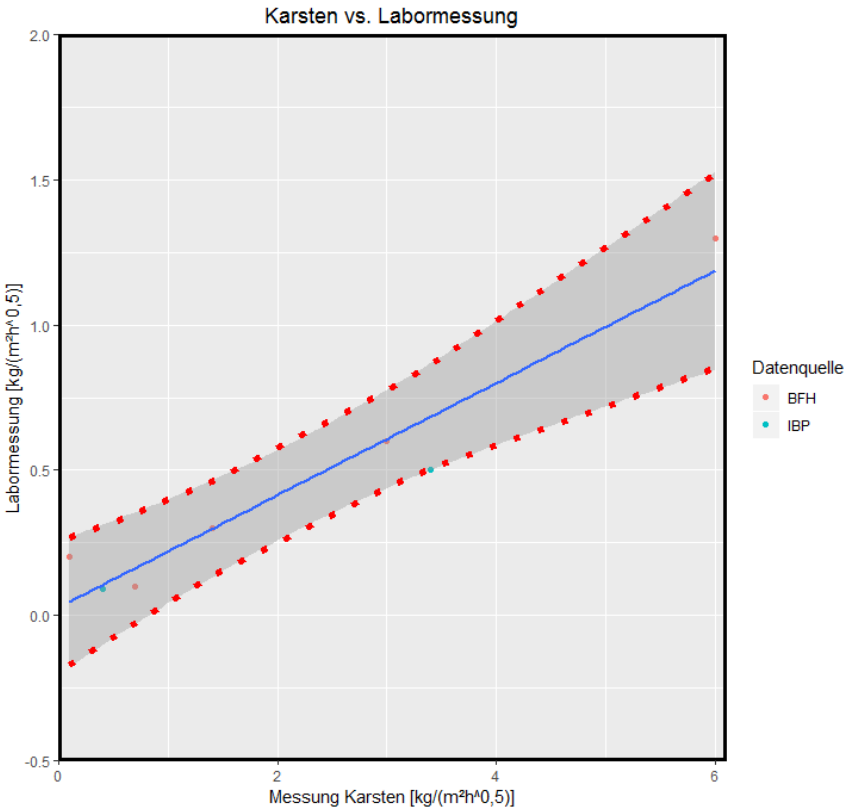


Abb. 3-40: Vergleich der in situ Messergebnisse bei Verwendung des Karsten Röhrchens mit den zugehörigen im Labor bestimmten Werten. Das Konfidenzband bezieht sich auf das Konfidenzintervall zur zweifachen Standardabweichung (σ) der Mittelwerte.

Wie Abb. 3-40 veranschaulicht, liegen alle Messwerte nun relativ nahe an der entstehenden Regressionsgeraden. Die der Regressionsgeraden entsprechende Formel kann wie folgt geschrieben werden:

$$W_{Labor} = (0.19 \pm 0.02) \cdot W_{Karsten} + (0.03 \pm 0.07) \qquad 3.4$$

W_{Labor}	$\left[\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}\right]$	w-Wert nach DIN EN ISO 15148 bestimmt
$W_{Karsten}$	$\left[\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}\right]$	In-situ-w-Wert nach Karsten

Für die Bewertung des in Formel 3.4 genannten Zusammenhangs wird dem Vorgehen in Wehle und Gariglio 2015 folgend ein t-Test verwendet. Hier gilt, wie bereits zuvor beim Kalksandstein deutlich wurde, dass die Anzahl der vorhandenen Messwerte einen starken Einfluss auf das Ergebnis und die Ergebnisqualität hat. Ein größerer Stichprobenumfang über einen breiteren w-Wert Bereich wäre daher für die Zukunft wünschenswert. Ein Ergebnis eines breiteren Stichprobenumfangs könnte auch sein, dass eine einfache lineare Näherung nicht mehr ausreichend ist. Der statistische Test prüft die Verschiedenheit der Stichprobenmittelwerte. Das für den Test notwendige Bestimmtheitsmaß (r^2) und dessen Wurzel, der Korrelationskoeffizient (r), betragen für obige Regressionsgerade:

$$r^2 = 0.93$$
$$\sqrt{r^2} = r = 0.96$$ 3.5

r²	-	Bestimmtheitsmaß
r	-	Korrelationskoeffizient

Unter der Voraussetzung, dass die Messwerte normalverteilt sind, ergibt sich nach Fahrmeir et al. 2004 die Teststatistik wie folgt:

$$T = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{N-2}$$
$$T = \frac{0.96}{\sqrt{1-0.93}} \cdot \sqrt{7-2}$$ 3.6
$$T = \underline{8.11}$$

T	-	Teststatistik
N	-	Anzahl der Stichproben
r²	-	Bestimmtheitsmaß
r	-	Korrelationskoeffizient

Für den Vergleich wird das t-Quantil zu einem Konfidenzintervall von 95% (α = 5%) und einer Anzahl an Freiheitsgraden von 5 bestimmt.

$$t_{1-\alpha}(N) = t_{0.95}(5) = \underline{2.57}$$
$$T > t_{1-0.05}(5)$$ 3.7
$$8.11 > 2.57$$

α	-	Signifikanzniveau
N	-	Anzahl der Stichproben
T	-	Teststatistik
t	-	Quantil der Studentsche t-Verteilung

Somit besteht ein Zusammenhang zwischen den beiden Stichproben bzw. zwischen den zugrunde liegenden Messverfahren.

Das gleiche Vorgehen wir nun im nächsten Schritt für den Vergleich der Franke Platte mit den Laborwerten nach der DIN EN ISO 15148:2002 durchgeführt. Hierfür wurden ebenfalls die in Wehle und Gariglio 2015 veröffentlichten Messwerte um die in Tab. 3-10 aufgeführten Werte erweitert. Aufgrund zu kleiner vorhandenen Proben konnte der Kalksandstein nicht gemessen werden. Analog zu Abb. 3-40 werden nachfolgend in Abb. 3-41 die In-Situ-Messwerte der BFH und des IBP über den zugehörigen Laborwerten aufgetragen.

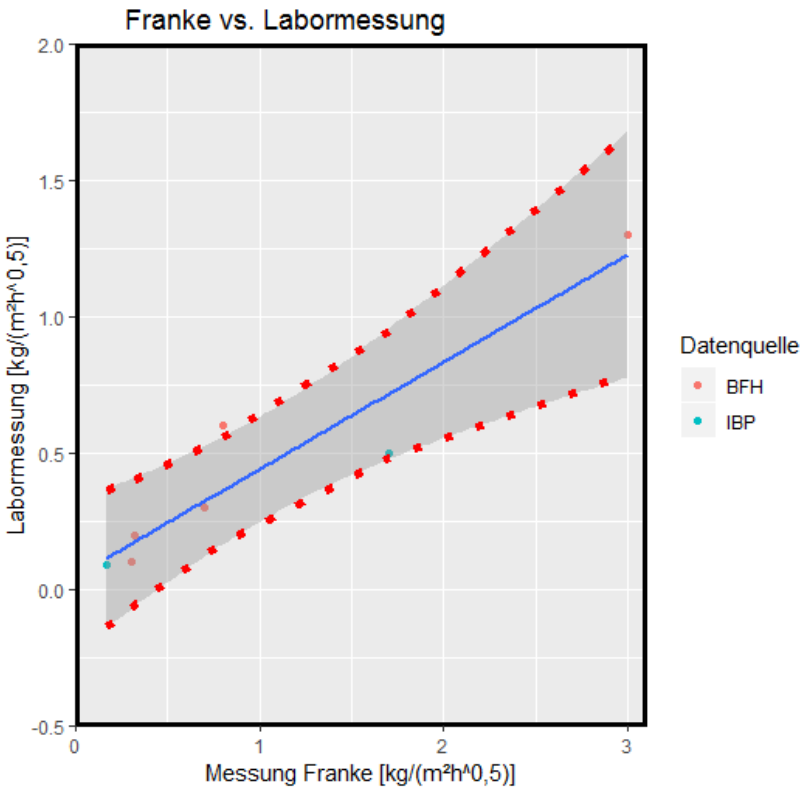


Abb. 3-41: Vergleich der in situ Messergebnisse bei Verwendung der Franke Platte mit den zugehörigen im Labor bestimmten Werten. Das Konfidenzband bezieht sich auf das Konfidenzintervall zur zweifachen Standardabweichung (σ) der Mittelwerte.

Wie Abb. 3-41 zeigt, liegt je eine Stichprobe außerhalb der zweifachen Standardabweichung. Die Regressionsgerade kann wie folgt beschrieben werden:

$$W_{Labor} = (0.39 \pm 0.06) \cdot W_{Franke} + (0.05 \pm 0.08) \quad 3.8$$

W_{Labor}	$\left[\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}\right]$	w-Wert nach DIN EN 15148 bestimmt
W_{Franke}	$\left[\frac{kg}{m^2\sqrt{h}}\right]$	in situ w-Wert nach Franke

Für die Bewertung des in Formel 3.8 genannten Zusammenhangs wird dem Vorgehen in Wehle und Gariglio 2015 folgend ein t-Test für die Korrelation beider Messwerte verwendet. Das Bestimmheitsmaß (r^2) und dessen Wurzel der Korrelationskoeffizient (r) betragen für die Regressionsgerade:

$$r^2 = 0.89$$
$$\sqrt{r^2} = r = 0.95 \quad 3.9$$

r^2	-	Bestimmtheitsmaß
r	-	Korrelationskoeffizient

Unter der Voraussetzung, dass die Messwerte normalverteilt sind, ergibt sich nach Fahrmeir et al. 2004 die Teststatistik wie folgt:

$$T = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \cdot \sqrt{N-2}$$

$$T = \frac{0.95}{\sqrt{1-0.89}} \cdot \sqrt{7-2} \qquad 3.10$$

$$T = \underline{6.4}$$

T	-	Teststatistik
N	-	Anzahl der Stichproben

Zum Vergleich wird das t-Quantil zu einem Konfidenzintervall von 95% (α = 5%) und einer Anzahl an Freiheitsgraden von 5 bestimmt.

$$t_{1-\alpha}(5) = t_{0.95}(5) = \underline{2.57}$$

$T > t_{1-0.05}(5)$
$6.4 > 2.57$ 3.11

α	-	Teststatistik
N	-	Anzahl der Stichproben

Ein Zusammenhang zwischen beiden Stichproben bzw. den zugrunde liegenden Messverfahren kann daher angenommen werden.

Die beiden, auf Messwerten der BFH (Wehle und Gariglio 2015) und des IBP (Haindl 2017), basierenden Umrechnungsfunktionen erlauben es, in situ gemessene w-Werte mit einer gewissen Schwankungsbreite in einen „Labor-w-Wert“ umzurechnen. Dieser w-Wert kann dann für eine hygrothermische Simulation im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung verwendet werden. Hierfür wird der bestimmte w-Wert innerhalb der Extremwerte variiert und die Auswirkung auf die Bauteilbewertung hin untersucht. Wenn die Verwendung von minimalem und maximalem w-Wert zu einer anderen Bewertung führt, ist im Zweifel das kritischere der beiden Ergebnisse für die weitere Planung zu verwenden. Negative w-Werte sind rechnerisch zwar möglich, für die Praxis aber durch einen w-Wert von 0 (keine Flüssigwasseraufnahme) zu ersetzen. Damit ändert sich z.B. Formel 3.12 zu folgender abschnittsweiser definierter Form:

$$W_{Labor}(W_{Franke}) \begin{cases} (0.39 \pm 0.06) \cdot W_{Franke} + (0.05 \pm 0.08) \; für \; W_{Franke} \in]0, +\infty] \\ 0 \quad für \; W_{Franke} \in]-\infty, 0] \end{cases} \qquad 3.12$$

Für das Prüfröhrchen nach Pleyers kann aufgrund der geringen Stichprobenanzahl keine sinnvolle Korrelationsberechnung stattfinden. Für das WAM wurden im Rahmen dieser Arbeit keine Vergleichsmessungen durchgeführt, hier wird daher auf die Übertragungsfunktion aus Wehle und Gariglio 2015 verwiesen.

3.3.2.4 Erkenntnisse für die in-situ Erfassung des Schlagregenschutzes

In diesem Kapitel wurde gezeigt, dass die in situ Messung des w-Wertes mit vielen Unsicherheiten behaftet ist. Im Sinne einer möglichst realistischen Messung ist daher in Anlehnung an Haindl 2017 auf Folgendes zu achten:

- Befüllung der Messröhrchen (Karsten, Pleyers) mit einer maximalen Wassersäule von 5 cm um den hydrostatischen Druck auf die Messfläche zu reduzieren
- Bei der Verwendung des Dichtkitts gilt: So viel wie nötig aber so wenig wie möglich verwenden um den Einfluss der Kittausdehnung zu minimieren
- Beachten der Witterungsverhältnisse im Vorfeld und Dokumentation der aktuellen Randbedingungen
- Verwendung eines Korrekturprogramms für das Karsten Röhrchen zur Reduktion des Einflusses des zweidimensionalen Feuchtetransportes
- Im Sinne der besseren Vergleichbarkeit und der Reduktion möglicher Messfehler zu Beginn der Messung sollte die anfängliche Stabilisierungsphase (5 min) nicht für die Bestimmung des w-Wertes verwendet werden.
- Die Bestimmung des w-Wertes sollte möglichst analog zur DIN EN ISO 15148:2002 erfolgen
- Auswahl des passenden In-situ-Messgerätes nach dem in Abb. 3-42 dargestellten Schema

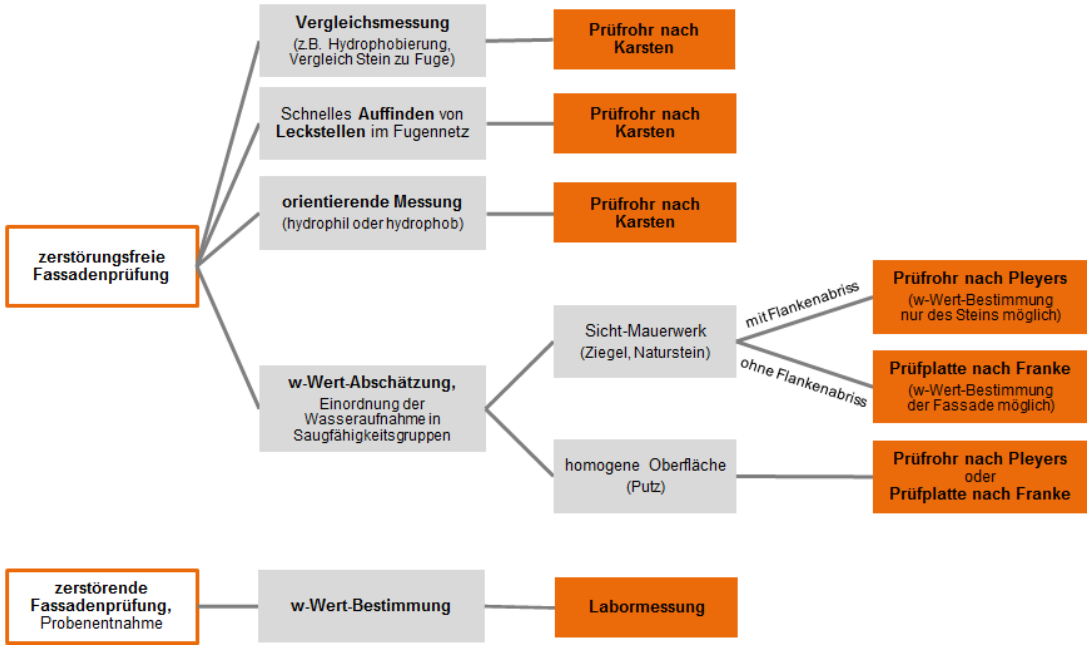


Abb. 3-42: Auswahlschema für In-situ-Messgeräte in Abhängigkeit der zu untersuchenden Fragestellung aus Haindl 2017.

Um das am besten passende in situ Messgerät zu wählen wird in obiger Grafik je nach Anwendungsbereich unterschieden. Mögliche Umrechnungen sind zum Beispiel:

- Korrektur der mehrdimensionalen Flüssigleitung
- W-Wert Berechnung gemäß DIN EN ISO 15148
- Umrechnung des in-situ Wertes auf einen Labor w-Wert

Erfolg keine dieser Umrechnungen, ist die Messung mit dem Prüfrohr nach Karsten nur für die Vergleichsmessung z.B. zur Kontrolle von Hydrophobierungsmaßnahmen geeignet. Ist hingegen eine möglichst genaue Abschätzung des w-Wertes notwendig bieten die Franke Platte und das Prüfröhrchen nach Pleyers Vorteile. Zu beachten ist hierbei, dass die Franke Platte durch ihre größere Fläche und die damit einhergehende geringere Anzahl an Messungen Vorteile hinsichtlich des Zeitbedarfs und damit auch der Wirtschaftlichkeit bietet.
Das WAM (hf sensor GmbH 2016) wurde im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet, hier gilt die Umrechnungsfunktion aus Wehle und Gariglio 2015 unverändert. Bzgl. der Messgenauigkeit ist das WAM einer Franke Platte am ähnlichsten.

Besteht kein Denkmalschutz der Fassade ist die Labormessung hinsichtlich der Kosten-Nutzen-Relation eine gute Alternative zur in situ Messung. Abschließend wurden die von der BFH im Rahmen des Forschungsprojektes Wehle und Gariglio 2015 entwickelten Transferfunktionen um die Werte aus Haindl 2017 erweitert. Die ursprünglichen Funktionen konnten dabei mit relativ geringen Änderungen übernommen werden, bei einem nach wie vor hohen Korrelationskoeffizienten.

Für die Anwendung in z.B. einer hygrothermischen Simulation ist der w-Wert innerhalb der durch die Umrechnung entstandenen Bandbreite zu variieren. In der Dokumentation ist darüber hinaus anzugeben, dass es sich um einen umgerechneten w-Wert handelt. An einem konkreten Beispiel bedeutet das, dass ein In-Situ mit einer Franke Platte gemessener w-Wert von 0,5 $kg/m^2h^{0,5}$ einem nach 3.8 umgerechneten „Labor-Wert“ zwischen 0,14 $kg/m^2h^{0,5}$ und 0,36 $kg/m^2h^{0,5}$ entspricht. Eine Konstruktion müsste daher in diesem Beispiel über diesen w-Wert Bereich als funktionsfähig nachgewiesen werden.

3.4 Untersuchte Innendämmsysteme

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die einzelnen im Forschungsprojekt untersuchten Innendämmsysteme kurz vorgestellt.

3.4.1 Holzfaser-Dämmplatten

Bei den beiden betrachteten holzfaserbasierten Dämmsystemen handelt es sich um eine im Nass- und eine im Trockenverfahren hergestellte Platte. Bei Voruntersuchungen lagen diese beiden Platten bezüglich ihrer hygrothermischen Eigenschaften am oberen und unteren Rand der ermittelten Bandbreite.

Beim Nassverfahren werden die Holzfasern zunächst mit Wasser zu einem Faserbrei vermischt. Dieser wird in der Folge zu einer Fasermatte gepresst und bei Temperaturen zwischen 160 °C und 220°C getrocknet. Die einzelnen Holzfasern „verkleben“ aufgrund des holzeigenen Lignin-Anteils miteinander. Beim Trockenverfahren werden die Holzfasern mit anderen

Faseranteilen, wie z. B. Textilfasern, vermischt und durch Klebstoffzugabe zu einem Faserkuchen geformt. Dieser wird in der Folge gepresst und durch Sattdampf gehärtet. Die im Rahmen des Projektes betrachtete Holzfaserdämmplatte im Trockenverfahren enthält eine zusätzliche Hydrophobierung, die die Aufnahme von Wasser in die Fasern z. B. bei Taupunktunterschreitungen beschränkt. Die Hydrophobierung verhindert auch, dass der Dämmstoff zu viel Feuchte aus dem nassen Mauerwerk aufnimmt. Im Gegenzug ist die Feuchtepufferung in diesem System geringer als bei der nicht hydrophobierten Nassverfahrens-Platte. Bei dieser Variante führen die feuchtepuffernden Eigenschaften dazu, dass die über Diffusion eindringende Feuchte in größerem Umfang sorptiv gebunden werden kann.
Da die Hydrophobierung das hygrothermische Verhalten stark beeinflusst, wird bei den Ergebnissen zwischen der hydrophobierten und der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmplatte unterschieden.

Bei den beiden betrachteten Holzfaserdämmplatten handelt es sich um starre Dämmstoffplatten, welche möglichst vollflächig mit dem jeweiligen Bestandsmauerwerk verklebt werden. Eine zusätzliche dampfbremsende Schicht wird nicht eingebaut – daher kann die Dämmung nur bis zu bestimmten Dicken verwendet werden, die im Rahmen der Parameterstudie ermittelt werden sollen. Die neue Innenoberfläche wird mit einem Innenputz versehen. Der betrachtete Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-43 dargestellt.

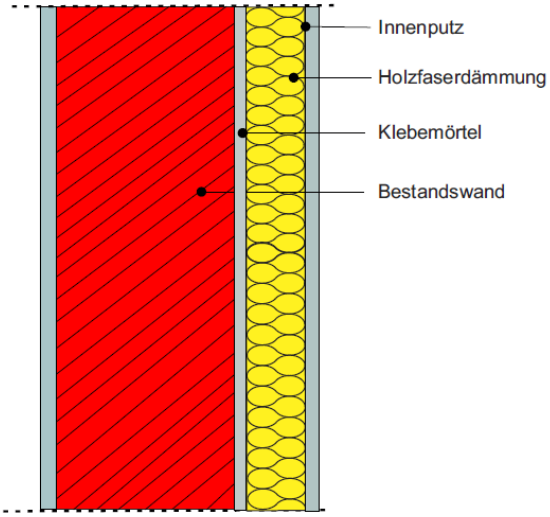


Abb. 3-43: Massive Bestandswand mit Holzfaser-Dämmplatten.

Die betrachteten Holzfaserdämmplatten wurden mit ihrer jeweils typischen Wärmeleitfähigkeit in drei unterschiedlichen Dämmstoffstärken untersucht. Die verwendeten Variationsparameter können Tab. 3-11 entnommen werden.

Tab. 3-11: Aufbau der Holzfaser-Innendämmsysteme

Nr.	Material	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeiten [W/m²K]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2			
1)	Klebemörtel	1	
2)	Holzfaserdämmplatte	4 / 6 / 8	0,039 / 0,042
3)	Innenputz	1	

3.4.2 Hanffaser-Dämmplatte

Die Hanffaserdämmplatte wird ähnlich wie die holzfaserbasierten Varianten vollflächig mit dem Untergrund verklebt. Eine zusätzliche dampfbremsende Schicht wird nicht eingebaut, daher kann die Dämmung nur bis zu bestimmten Dicken verwendet werden. Die neue Innenoberfläche wird mit einem Innenputz versehen. Der betrachtete Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-44 dargestellt.

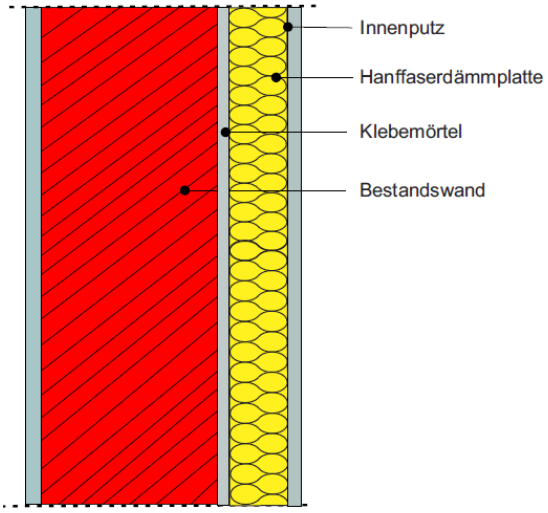


Abb. 3-44 : Massive Bestandswand mit Hanffaser-Dämmplatte.

Die dabei betrachtete Hanffaserdämmplatte wurde in unterschiedlichen Dämmstoffstärken betrachtet. Die verwendeten Variationsparameter können Tab. 3-12 entnommen werden.

Tab. 3-12: Aufbau des Hanffaser- Dämmplatte

Nr.	Material	Dickenvariationen [cm]	Wärmeleitfähigkeiten [W/m²K]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2			
1)	Klebemörtel	1	
2)	Hanffaserdämmplatte	2 / 4 / 6	0,041
3)	Kalkgipsputz	1	

3.4.3 Kork-Lehm-Dämmplatte

Bei der Kork-Lehm-Dämmung handelt es sich um eine Dämmstoffplatte, bei der die Korkmatrix durch das Bindemittel Lehm zu einer steifen Platte geformt wird. Zur besseren Vorstellung ist in Abb. 3-45 die Fotographie eines Probekörpers dargestellt.



Abb. 3-45 : Exemplarische Probekörper der Kork-Lehm-Dämmung.

Die Dämmplatte wird vollflächig auf der Bestandswand verklebt und ggf. zusätzlich über Dämmstoffanker fixiert. Als Kleberschicht wird ein Leichtton-Mörtel verwendet. Abschließend erfolgt das Aufbringen des Innenputzes. Der Gesamtaufbau ist in Abb. 3-46 schematisch dargestellt. Die verwendeten Dämmstoffdicken für die Parametervariation sind nachfolgend in Tab. 3-13 aufgelistet.

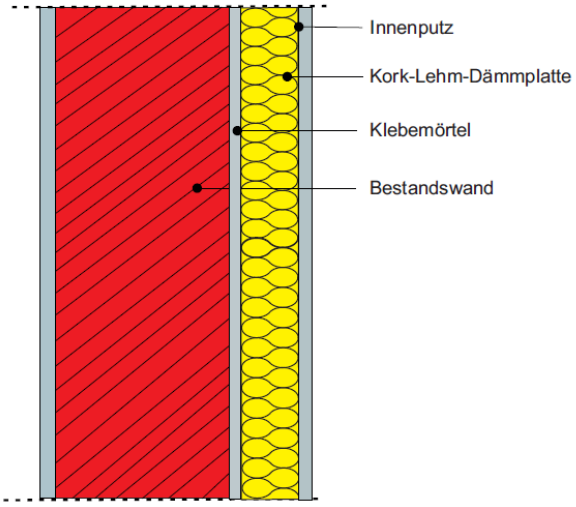


Abb. 3-46 : Massive Bestandswand mit Kork-Lehm-Dämmplatte.

Tab. 3-13: Aufbau der Kork-Lehm-Dämmung.

Nr.	Material	Dickenvariationen [cm]	Wärmeleitfähigkeiten [W/m²K]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2			
1)	Leichtton Mörtel	0,5	
2)	Kork-Lehm-Dämmplatte	4 / 5 / 6	0,047
3)	Innenputz	1,25	

3.4.4 Aerogel-Hochleistungsdämmputz

Der betrachtete aerogelhaltige Hochleistungsdämmputz wird direkt auf das jeweilige Bestandsmauerwerk aufgebracht. Die Innenoberfläche bildet dann eine auf den Dämmputz aufgetragene Deckputzschicht. Der sich so ergebende Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-47 dargestellt.

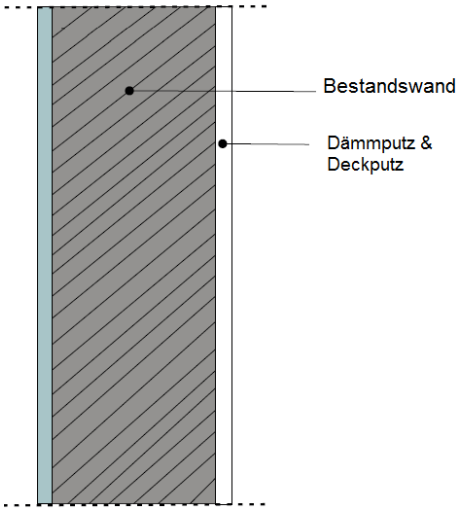


Abb. 3-47: Massive Bestandswand mit dem Aerogel–Hochleistungs-Dämmputz.

Der betrachtete Hochleistungsdämmputz wurde in 3 cm, 5 cm und 7 cm Dicke untersucht. Der vollständige Aufbau des Systems kann
Tab. 3-14 entnommen werden.

Tab. 3-14: Aufbau des Aerogel-Hochleistungs-Dämmputzes.

Nr.	Material	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeiten [W/(m²K)]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2			
1)	Hochleistungsdämmputz mit Aerogelanteil	3 / 5 / 7	0,028
2)	Deckputz	0,5	

3.4.5 Hochleistungsdämmputz

Der betrachtete „konventionelle“ Hochleistungsdämmputz wird ebenfalls direkt auf das jeweilige Bestandsmauerwerk aufgebracht. Dieser Hochleistungsdämmputz enthält keine Aerogele. Nähere Details zum Werkstoff können dem zugehörigen Kapitel „Materialdaten“ entnommen werden. Auf den Dämmputz wird im Anschluss eine Armierungsschicht und ggf. noch ein Deckputz aufgetragen. Der sich so ergebende Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-47 dargestellt.

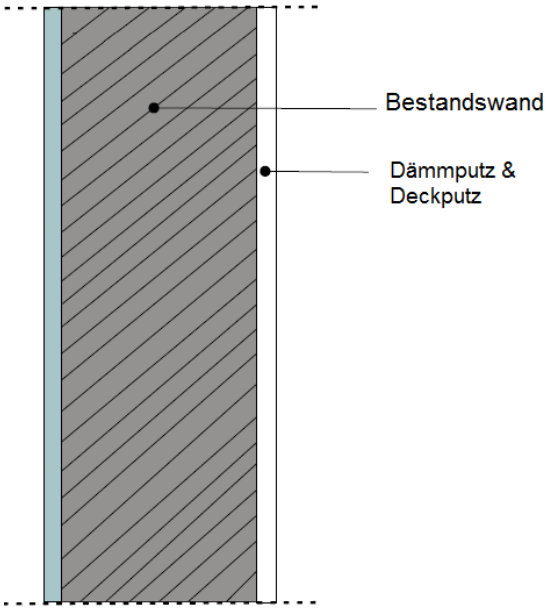


Abb. 3-48: Massive Bestandswand mit Hochleistungs-Dämmputz.

Der betrachtete Hochleistungsdämmputz wurde in Schichtdicken von 4 cm, 7 cm und 10 cm untersucht. Der vollständige Aufbau des Systems kann Tab. 3-15 entnommen werden.

Tab. 3-15: Aufbau des Hochleistungs-Dämmputz.

Nr.	Material	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeiten [W/(m²K)]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2			
1)	Hochleistungsdämmputzl	4 / 7 / 10	0,042
2)	Armierungsmörtel	0,5	
3)	Deckputz	1	

3.4.6 Mineral-Dämmplatte

Die kapillaraktive Mineral-Dämmplatte wird vollflächig mit dem Untergrund verklebt. Der vollflächige Kontakt ist einerseits notwendig, um Schimmelbildung im Bereich der Grenzschicht auszuschließen und andererseits um die kapillare Rückleitung aus der Grenzschicht zum Raum hin zu ermöglichen.

Für diesen Dämmstoff werden zwei unterschiedliche Mörtel im Bereich der Grenzschicht betrachtet. Ein Leichtmörtel mit einem hohen w-Wert von 2,1 kg/(m² $h^{0,5}$) und ein Dünnbettmörtel mit einem deutlich niedrigeren w-Wert von 0,24 kg/(m² $h^{0,5}$). Durch die unterschiedlichen Transporteigenschaften steht der Dämmstoff in unterschiedlich starkem Flüssigwasser-Austausch mit dem jeweiligen Bestandsmauerwerk. Es soll untersucht werden, ob die unterschiedlich starke Interaktion mit dem Untergrund zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit führt.

Die Innenoberfläche bildet eine weitere Schicht des in einer der beiden Varianten bereits als Kleber verwendeten Leichtmörtels. Der betrachtete Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-47 dargestellt.

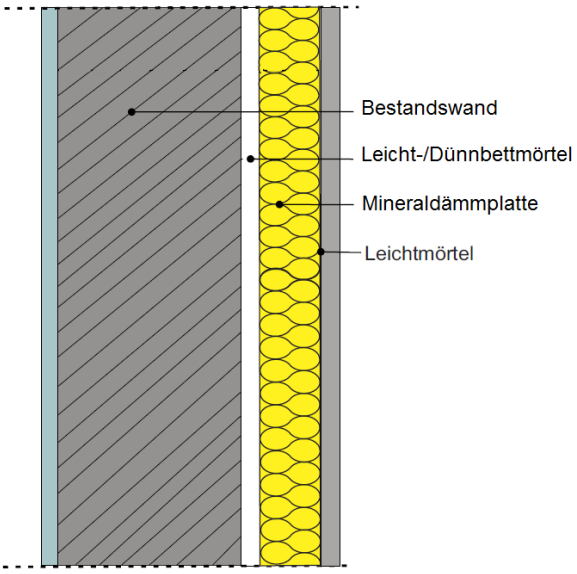


Abb. 3-49: Massive Bestandswand mit Mineral-Dämmplatte.

Die betrachtete mineralische-Dämmplatte wurde in drei unterschiedlichen Dämmstoffstärken untersucht. Die verwendeten Variationsparameter können
Tab. 3-16 entnommen werden.

Tab. 3-16: Bauteilaufbau des Innendämmsystems mit mineralischer Dämmplatte.

Nr.	Material	Dicke [cm]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2		
1)	Leichtmörtel/Dünnbettmörtel	0,5
2)	Mineralische Dämmplatte	4/6/8
3)	Leichtmörtel	0,5

3.4.7 Organische Aerogel-Dämmplatte

Die organische Aerogel-Dämmplatte wird hinterströmungssicher auf dem Bestandsmauerwerk verklebt. Dies bedeutet entweder eine vollflächige Verklebung mit dem Untergrund oder eine Verklebung nach dem Punkt-Wulst-Verfahren. Die Plattenstöße werden dann mit einem Armierungsmörtel verspachtelt. Den Abschluss an der Innenoberfläche bildet ein Deckputz, der wahlweise mit einem Anstrich versehen werden kann. Der sich so ergebende Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-47 dargestellt.

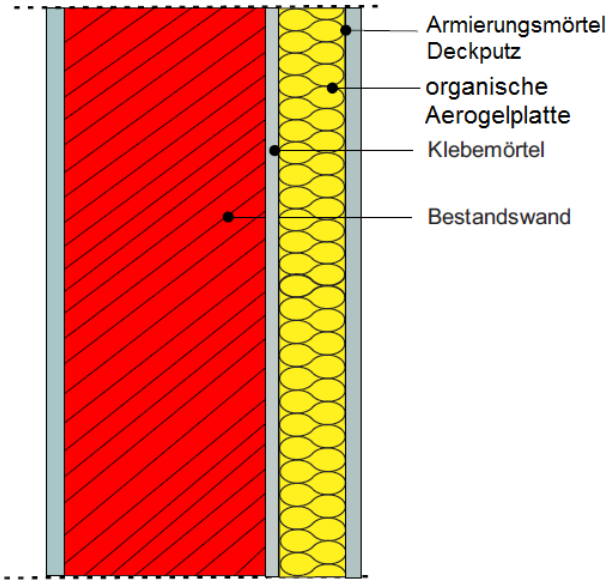


Abb. 3-50: Massive Bestandswand mit organischer Aerogel-Dämmplatte.

Die organische Aerogel-Dämmplatte wird in einer Dicke von 1,5 cm hergestellt. Um zusätzlich den Einfluss einer zweilagigen Verklebung zu untersuchen, wurde auch eine Dicke von insgesamt 3 cm betrachtet. Der Aufbau des Dämmsystems kann Tab. 3-17 entnommen werden.

Tab. 3-17: Bauteilaufbau des Innendämmsystems mit organischer Aerogel-Dämmplatte.

Nr.	Material	Dicke [cm]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2		
1)	organische Aerogelplatte	1,5 / 3
2)	Armierungsmörtel	0,6
3)	Deckputz	0,4

3.4.8 Mineralische Aerogel-Dämmplatte

Die betrachtete mineralische Aerogel-Dämmplatte wird mit einem Ständerwerk auf die Bestandswand aufgebracht. Den raumseitigen Abschluss bilden eine feuchtevariable Dampfbremse sowie eine Gipskartonplatte, die mit dem Ständerwerk verschraubt wird. Der betrachtete Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist schematisch in Abb. 3-51 dargestellt.

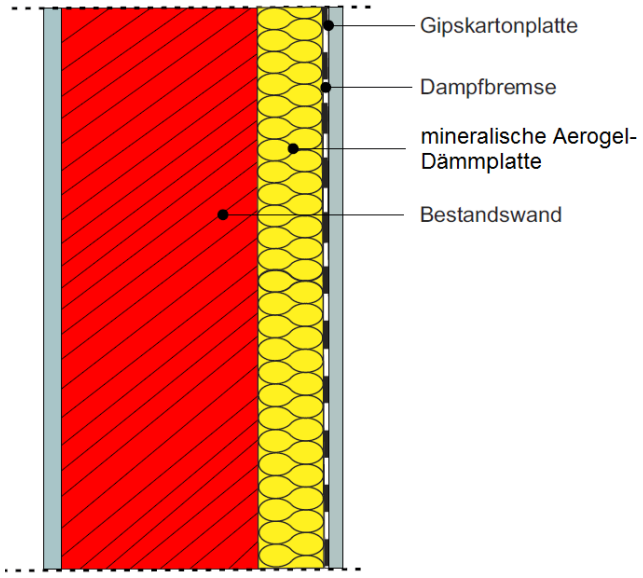


Abb. 3-51: Massive Bestandswand mit mineralischer Aerogel-Dämmplatte.

Die betrachtete mineralische Aerogel-Dämmplatte wurde in drei unterschiedlichen Dämmstoffstärken untersucht. Die Variationsparameter können Tab. 3-18 entnommen werden.

Tab. 3-18: Bauteilaufbau bei Verwendung der mineralischen Aerogel-Dämmplatte

Nr.	Material	Dicke [cm]
Bestandskonstruktionen vgl. Kapitel 3.2		
1)	mineralische Aerogel-Dämmplatte	3/4/5
2)	feuchtevariable Dampfbremse	0,1
3)	Gipskartonplatte	1,25

3.4.9 EPS-Innendämmung als Verbund-Dämmplatte und als verputztes System

Da EPS als relativ preisgünstiger Dämmstoff häufig eingesetzt wird, werden zwei unterschiedliche Anwendungsformen näher untersucht. Es wird einerseits eine Verbundplatte aus einem grauen EPS und einer Gipskartonplatte und andererseits eine verputzte weiße EPS Platte betrachtet. Das graue EPS weist eine etwas geringere Wärmeleitfähigkeit von 0,0309 W/mK auf als das weiße EPS mit 0,033 W/mK, nähere Details zu den Materialdaten können dem entsprechenden Kapitel entnommen werden. Daher ist zu vermuten, dass sich die graue EPS-Verbundplatte geringfügig kritischer verhält als die verputzte weiße EPS Platte.
Die Verbund-Dämmplatte wird genauso wie die normale EPS-Dämmung vollflächig auf dem Untergrund verklebt. Dies ist notwendig, um eine Hinterströmung der Dämmung zu vermeiden. Bei der Verbund-Dämmplatte besteht die dem Raum zugewandte Seite aus einer Gipskartonplatte. Die normale EPS-Dämmung wird raumseitig mit einem Innenputz versehen. Um Risse z.B. im Bereich von Plattenstößen zu vermeiden ist in der Praxis auch eine Armierung erforderlich. Diese hat auf die Simulationsergebnisse jedoch keinen Einfluss und wird daher vernachlässigt. Der betrachtete Gesamtaufbau der beiden Innendämmsysteme mit der Bestandswand ist schematisch in Abb.3-52 dargestellt.

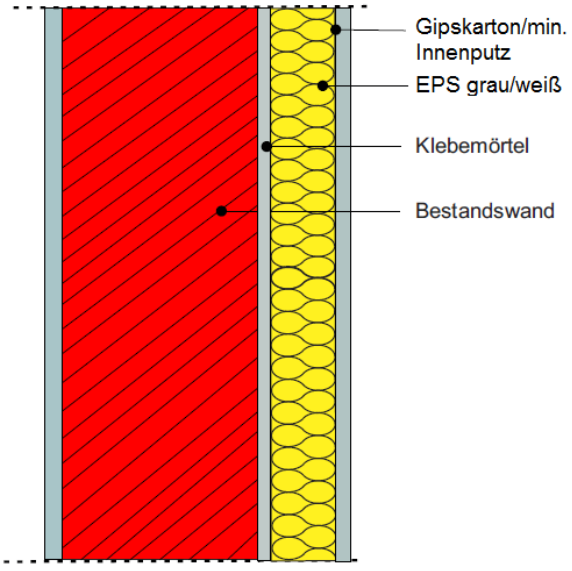


Abb.3-52: Massive Bestandswand mit EPS-Dämmung und Innenputz bzw. EPS-Verbund-Dämmplatte mit Gipskarton.

Die Innendämmungen wurden in drei unterschiedlichen Dämmstoffstärken untersucht. Der vollständige Aufbau kann Tab. 3-19 entnommen werden.

Tab. 3-19: Bauteilaufbau der beiden EPS-Innendämmsysteme.

Nr.	Material	Dicke [cm]
1)	Klebemörtel	0,5
2)	EPS grau/EPS weiß	4 / 6 / 8
3)	Gipskartonplatte/Innenputz	1,25 / 1

3.5 Freilandversuche

Das Fraunhofer-IBP besitzt ein Freigelände mit Gebäuden, die für Freilandversuche zur Bewertung von unterschiedlichsten Fassaden und Fassadensystemen genutzt werden können. Die Gebäude zeichnen sich dadurch aus, dass je nach Anwendungsfall unterschiedliche Ausrichtung, also West-, Süd-, Ost- oder auch Nordseite genutzt werden können. Außerdem können die Gebäude so klimatisiert werden, dass eine Standardnutzung vorliegt ohne störende Einflüsse durch Bewohner, die durch manuelle Lüftung usw. das Innenklima beeinflussen und so die Ergebnisse der Messungen beeinträchtigen können. Abb. 3-53 zeigt ein langes Versuchsgebäude mit Testfassaden auf der Westseite.



Abb. 3-53: Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP in Valley.

Auf dem Gelände des IBP befindet sich eine Wetterstation (Abb. 3-54), mit der alle maßgeblichen Parameter aufgezeichnet werden. Die Lage des Instituts im Voralpenraum zeichnet sich durch starke UV-Strahlung, eine Standorthöhe von 680 m und extreme Temperaturwechsel bei Fönwetterlagen aus. Durch die freie Lage sind die Gebäude dem Schlagregen ausgesetzt und werden der Beanspruchungsgruppe III zugeordnet (DIN 4108-3:2014-11).

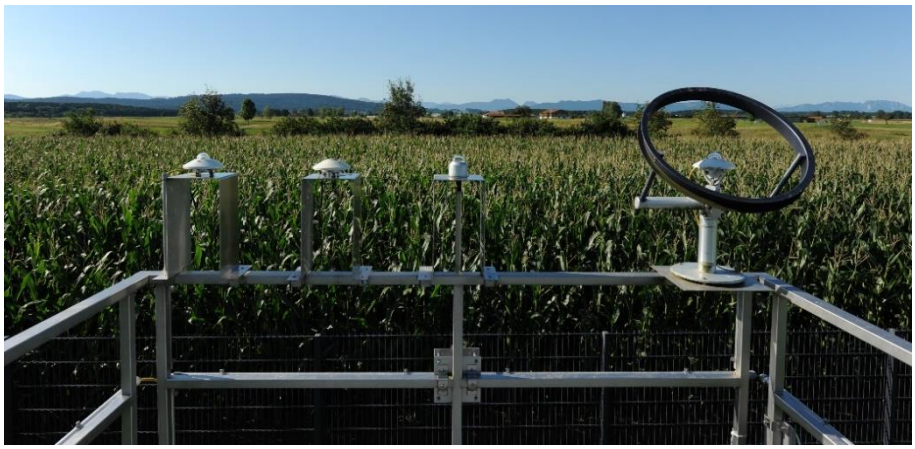


Abb. 3-54: Solarimeter der Wetterstation am Fraunhofer IBP.

Einige der Innendämmmaterialien sollen im Freilandversuch auf ihre Gebrauchstauglichkeit getestet werden. Da die schlagregenbelastete Westseite bei Innendämmungen als besonders gefährdet gilt, werden die Untersuchungen an einem Versuchsgebäude durchgeführt, das nach Westen frei exponiert ist. Abb. 3-55 zeigt das Versuchsgebäude mit den quadratischen Wandelementen.



Abb. 3-55: Westseite des Versuchsgebäudes mit Wandelementen.

An der Fassade befindet sich ein Schlagregenmesser (rechts oben), mit dem durch Auslitern die Schlagregenmenge erfasst wird. Das Innenraumklima ist von Oktober bis Mai, also in der kalten Jahreszeit, auf ca. 20 °C und 50 % r. F. geregelt. Die restliche Zeit ist das Innenraumklima ungeregelt.

3.5.1 Aufbau von Wandelementen

Die Wandelemente bestehen aus einem Holzrahmen mit einer Kantenlänge von 0,6 m, in den ein kompletter Wandquerschnitt eingebaut wird. Für die Anwendung Innendämmung wurde als Bestandsmauerwerk ein Ziegelmauerwerk ausgewählt, das einen U-Wert von 1,3 W/m²K aufweist und somit Altbaustandard wiedergibt (Abb. 3-56).

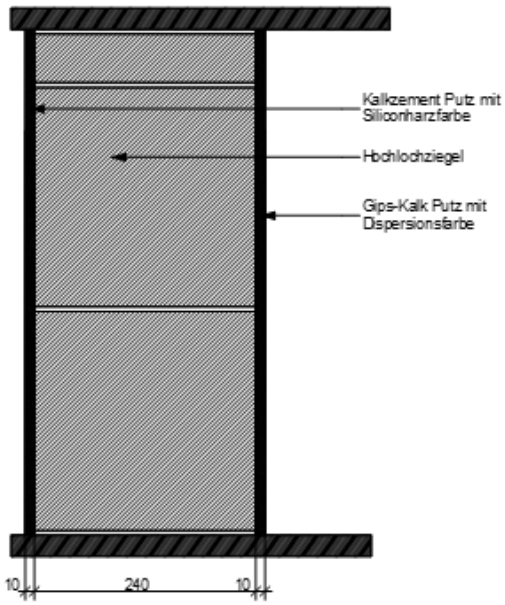


Abb. 3-56: Schematische Darstellung des Wandelements.

Das untersuchte Wandelement besteht aus einem Hochlochziegelmauerwerk mit einer Wandstärke von 240 mm und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,42 [W/mK], sodass sich für den Wandquerschnitt ein U-Wert von 1,3 [W/m²K] ergibt. Abb. 3-57 zeigt das Aufmauern des Wandelements. Auf der Innenseite ist ein Gips-Kalk-Putz aufgezogen, der mit einer Dispersionsfarbe überstrichen ist. Die Dispersionsfarbe hat einen s_d-Wert von 1,3 m und einen Wasseraufnahmekoeffizienten von 0,02 kg/m²√h. Der Kalk-Zement-Putz auf der Außenseite ist mit einer Siliconharzfarbe versehen, die einen s_d-Wert von 0,05 m und einen Wasseraufnahmekoeffizienten von 0,02 kg/m²√h aufweist.



Abb. 3-57: Aufbau des Wandelements.

Als Innendämmung werden vier Systeme ausgewählt, deren Dämmstoffdicke so gewählt wird, dass sich für den gesamten Wandaufbau ein U-Wert von 0,36 bis 0,38 W/m²K ergibt. Neben zwei dampfdichten Standardsystemen werden zwei diffusionsoffene kapillaraktive Innendämmungen ausgewählt. Die untersuchten Systeme sind in Tab. 3-20 aufgelistet.

Tab. 3-20: Untersuchte Innendämmungen.

Dämmstoff	Dämmstoffdicke	Beschreibung
EPS grau	60 mm	Dampfdicht, Gipskarton als Innenbeplankung
Mineralwolle mit Dampfbremse	60 mm	Gipskarton als Innenbeplankung
Mineraldämmplatte	80 mm	Kapillaraktiv, flächige Verklebung mit Leichtputz, Innenputz ebenfalls Leichtputz
Aerogel Hochleistungsdämmputz	55 mm	Kapillaraktiv, zusätzlich Aufbringen eines Innenputzes



Abb. 3-58: Verbundplatte EPS grau mit aufgebrachtem Kleber.

Für das erste Wandelement wird die Verbundplatte aus EPS grau mit Gipskarton auf die entsprechenden Maße zugeschnitten und mit einem Kleber auf der Innenseite des Wandelements angebracht. Der Kleber wird mit einem Zahnspachtel aufgetragen (Abb. 3-58). Die Ränder der Gipskartonplatte werden mit Silikon zum Innenraum hin abgedichtet.

Für ein zweites Wandelement wird eine Mineralwolle mit aufkaschiertem Vlies (Abb. 3-59) lose eingelegt und mit einer feuchtevariablen Dampfbremse abgedeckt, die an den Rändern dampfdicht verklebt wird. Den Abschluss zum Innenraum bildet eine Gipskartonplatte, die mit Silikon am Rand abgedichtet wird.

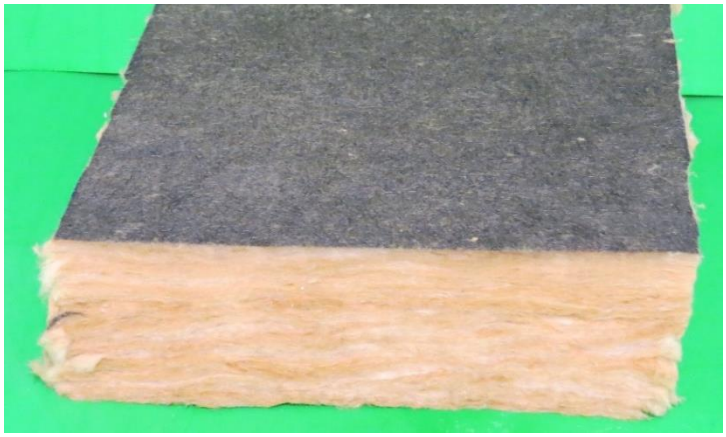


Abb. 3-59: Mineralwolle mit aufkaschiertem Vlies als Innendämmung.

Für das dritte Wandelement wird zunächst ein Vorspritzer auf der Innenseite angebracht. Anschließend wird der Aerogel Hochleistungsdämmputz direkt auf die mit Vlies abgedeckten Sensoren aufgetragen (Abb. 3-60) und glattgestrichen. Die Auftragsdicke beträgt etwa 55 mm. Um ein zu schnelles Austrocknen und eventuelle Rissbildungen zu vermeiden wird das Wandelement für 10 Tage mit einer Polyethylen-Folie abgedeckt. Der abschließende Innenputz wird erst nach ca. 4 Wochen Standzeit aufgebracht. Die Oberfläche des Putzes wird abgeschliffen, um die Hautbildung zu entfernen, und anschließend ein Armierungsputz mit eingelegtem Gewebe aufgebracht (Abb. 3-61).



Abb. 3-60: Eingefüllter Aerogel-Hochleistungsdämmputz.



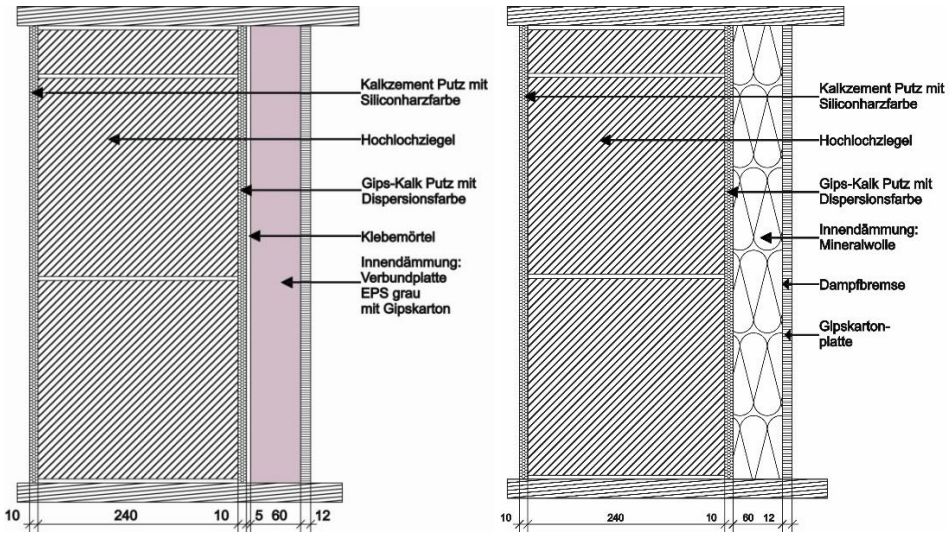
Abb. 3-61: Muster des Armierungsputzes mit eingelegtem Gewebe.

Das vierte Wandelement wird mit einer Mineraldämmplatte als Innendämmung aufgebaut. Dazu wird die Mineraldämmplatte mit einem Leichtputz auf das Mauerwerk aufgeklebt. Der Leichtputz wird vollflächig mit einem Zahnspachtel aufgetragen (Abb. 3-62) und die Dämmplatte fest angedrückt, so dass sich für die Verklebung eine Schichtdicke von ca. 5 mm ergibt. Die Innenseite des Wandelements wird ebenfalls mit einer 5 mm Schicht des Leichtputzes versehen.



Abb. 3-62: Aufbringen des Leichtputzes auf der Mineraldämmplatte.

Die Herstellung der Wandelemente erfolgte von Oktober bis Dezember 2015, so dass der Einbau in das Versuchsgebäude noch im Dezember erfolgen konnte. Der schematische Wandaufbau der Wandelemente ist in Abb. 3-63 angegeben.



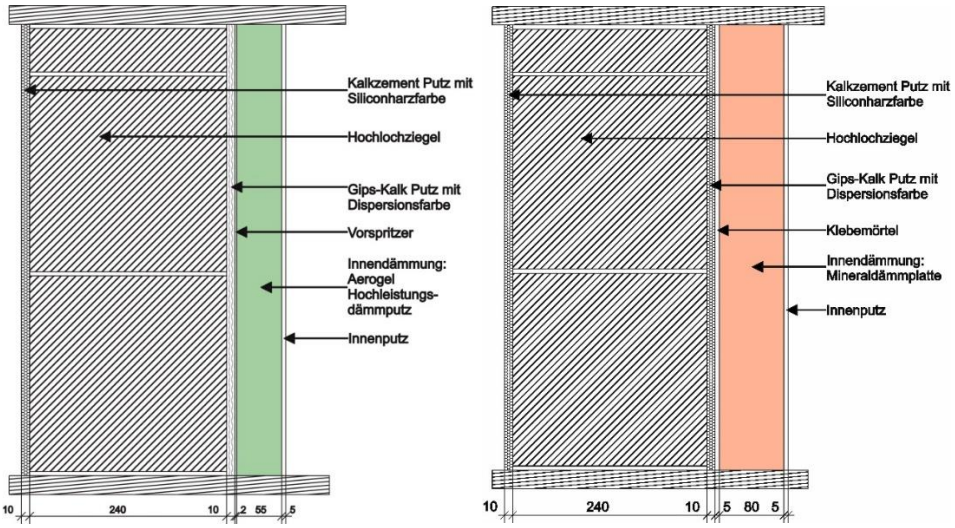


Abb. 3-63: Schematischer Aufbau der vier Wandelemente.

3.5.2 Durchführung der Messungen

Vor dem Anbringen der Innendämmung werden an der Innenseite aller vier Wandelemente Messsensoren zur Bestimmung der Temperatur und relativen Feuchte sowie Holzblättchen zur Bestimmung der überhygroskopischen Feuchte durch Bestimmung der Gleichgewichts-Holzfeuchte dieser Blättchen angebracht. Der kapazitive Feuchtefühler wird in ein dünnes Kunststoffrohr eingeführt, das vorne am Sensorkopf geschlitzt ist, um einen Feuchteaustausch zu ermöglichen. Durch das Rohr kann der Fühler von Zeit zu Zeit entnommen und überprüft werden. Der Pt 100 zur Temperaturmessung und das Holzfeuchteblättchen werden direkt auf die Innenwandfarbe aufgeklebt und mit einem Vlies abgedeckt, bevor die Innendämmung angeklebt wird. Abb. 3-64 zeigt die Messsensoren und ihre Position im Wandquerschnitt. An einem der vier Wandelemente werden zusätzlich an der Außenoberfläche und auf der Innenseite Pt 100 zur Erfassung der Temperaturen angebracht.

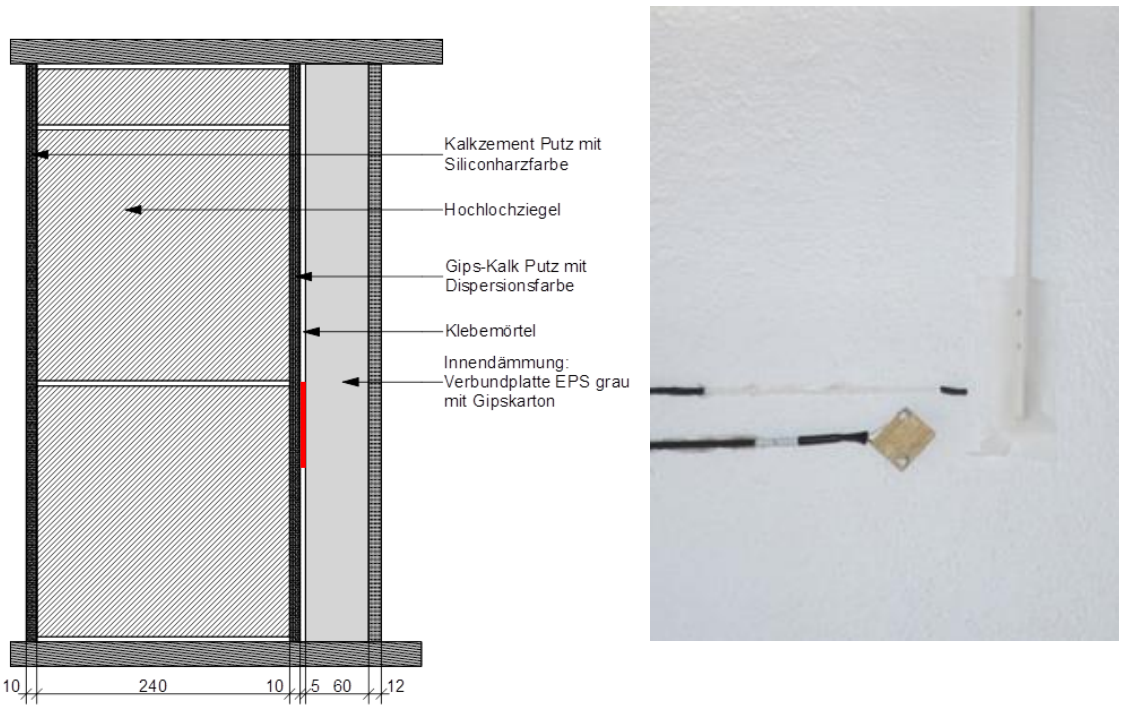


Abb. 3-64: Lage der Messsensoren (rot) im Wandquerschnitt.

Die Temperatur- und Feuchteverläufe werden über einen Zeitraum von Januar 2016 bis März 2018 kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich können die Wandelemente von Zeit zu Zeit komplett aus der Fassade entnommen (Abb. 3-65) und die Feuchteaufnahme bzw. –abgabe gravimetrisch verfolgt werden.



Abb. 3-65: Ein Wandelement wird mit dem Stapler entnommen.

3.5.3 Messergebnisse

In den folgenden Abbildungen werden die Außenlufttemperatur und die Temperatur an der Außenoberfläche und an der Grenzschicht zwischen Mauerwerk und Innendämmung

verglichen. Betrachtet man die Temperaturverläufe aller vier Wandelemente (Abb. 3-66) erkennt man, dass erwartungsgemäß ein nahezu identischer Temperaturverlauf bei allen vier Elementen vorliegt. Die gestrichelten senkrechten Linien zeigen die Zeitpunkte, an denen die Innenraumklimatisierung an- bzw. abgeschaltet wurde. Die Temperaturen an der Grenzschicht reichen von 5 °C bis 27 °C, während für die Außenlufttemperatur eine Spreizung von -20 °C bis 30 °C ermittelt wird. Auffällig ist, dass im Winter selbst bei Außenlufttemperaturen von -20 °C an der Grenzschicht keine tieferen Temperaturen als 5 °C gemessen werden. Offenbar machen sich hier Randeffekte an den Wandelementen bemerkbar. Diese ragen in den Innenraum und erwärmen sich aufgrund der Innenraumklimatisierung stärker als erwartet. Im Sommer liegen die Temperaturmaxima der Außenlufttemperatur und der Wandelemente relativ nah beieinander.

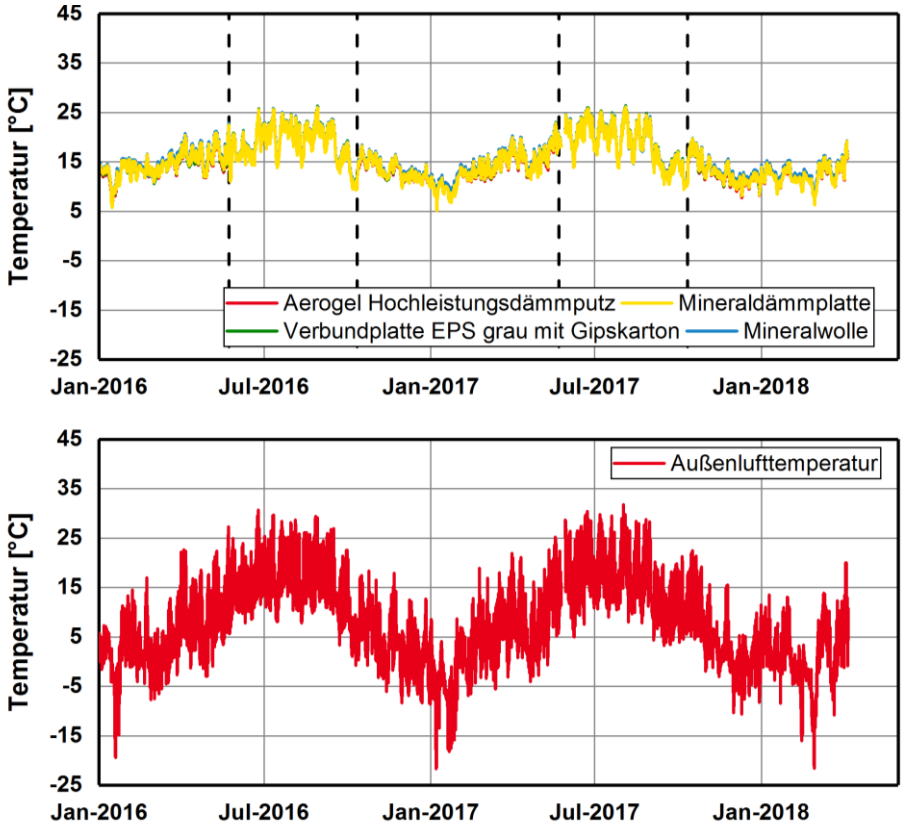


Abb. 3-66: Temperaturverläufe zwischen Mauerwerk und Innendämmung (oben) und der Außenlufttemperatur (unten) von Januar 2016 bis März 2018.

Vergleicht man die Oberflächentemperatur gemessen an dem Wandelement mit Mineraldämmplatte mit der Außenlufttemperatur (Abb. 3-67) werden Oberflächentemperaturen von -20 °C bis +43 °C ermittelt. Die Temperatur an der Außenoberfläche des Wandelements ist also höher als die Lufttemperatur, was durch solare Einstrahlung und Erwärmung durch Absorption erklärt werden kann.

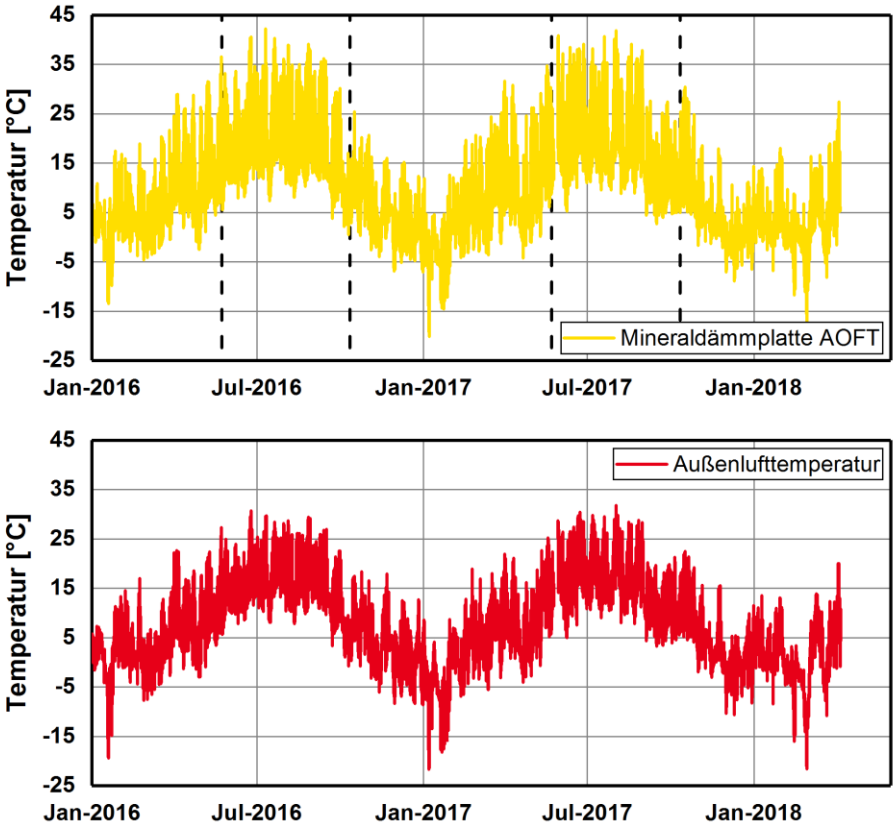


Abb. 3-67: Verlauf der Oberflächentemperatur (oben) und der Außenlufttemperatur (unten) von Januar 2016 bis März 2018.

Von besonderem Interesse für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Innendämmungen sind die Feuchtegehalte, die zwischen der Innendämmung und dem Ziegelmauerwerk vorliegen. Betrachtet werden zunächst für jedes Wandelement einzeln zum einen die gemessenen relativen Feuchten und zum anderen die mit den Holzblättchen ermittelte Holzfeuchte.

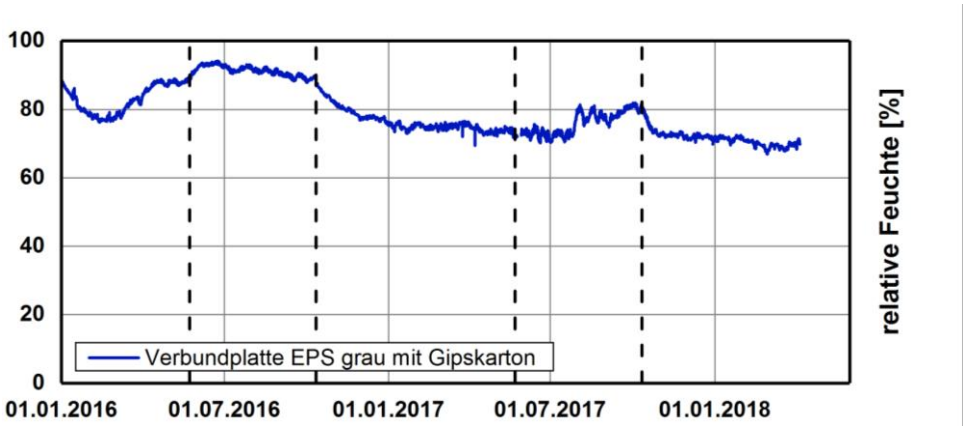


Abb. 3-68: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit der Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton.

Betrachtet man den gemessenen Feuchteverlauf für das Wandelement mit der Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton in Abb. 3-68 fällt auf, dass im ersten Untersuchungsjahr relativ hohe Feuchtegehalte von über 90 % r. F. ermittelt werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Wandelement am Rand fehlerhaft abgedichtet war und nach Einbau in das Versuchsgebäude Regen eindringen konnte. Nach erneuter Abdichtung konnte das Wandelement langsam austrocknen. In der Winterperiode 2016/2017 sinkt die gemessene Feuchte auf unter 80 % r. F. in der folgenden Winterperiode 2017/2018 ist ein weiteres Absinken auf ca. 70 % r. F. zu beobachten.

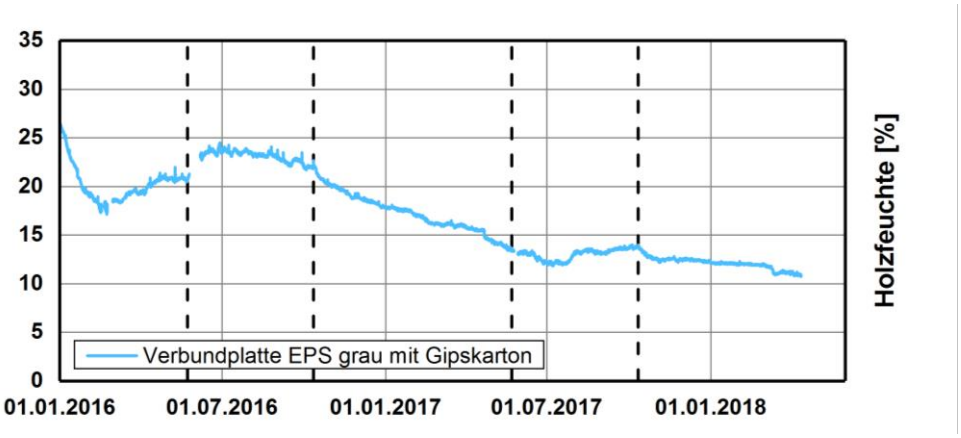


Abb. 3-69: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton.

Abb. 3-69 zeigt den gemessenen Verlauf der Holzfeuchte über den Untersuchungszeitraum. Der Verlauf bestätigt die Messergebnisse der relativen Feuchte in Abb. 3-68. Auch bei der Holzfeuchte sieht man den Anstieg aufgrund des eingedrungenen Regens und die anschließende Austrocknung des Wandelementes. Viel deutlicher ist allerdings das Austrocknungsverhalten wiedergegeben. Die Holzfeuchte nimmt ab Juli 2016 kontinuierlich bis zum Juli 2017 auf ca. 12 Masse-% ab. Die anschließende geringe Zunahme ist jahreszeitlich bedingt und spiegelt sich auch im Feuchteverlauf wieder.

Betrachtet man die gravimetrisch bestimmte Gewichtsänderung des Wandelements (Abb. 3-70) beobachtet man zu Beginn des Untersuchungszeitraums eine Gewichtszunahme, die durch die oben erwähnte Undichtheit des Wandelements und das Eindringen von Regen bedingt ist. Nach einer Austrocknungsphase mit Gewichtsabnahme bis Herbst 2017 bleibt das Gewicht des Wandelements mehr oder weniger konstant. Die geringen Schwankungen sind vermutlich durch jahreszeitlich unterschiedliche Umgebungsfeuchten und sorptive Gewichtsänderungen bedingt.

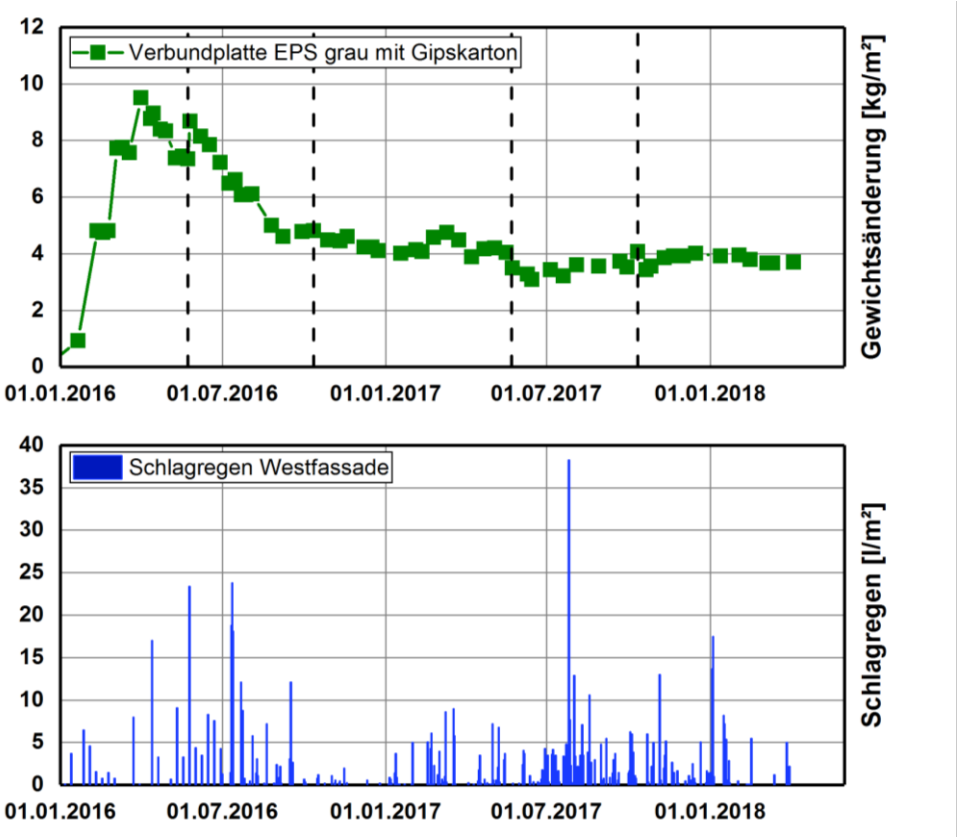


Abb. 3-70: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit der Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton.

Für das Wandelement mit der Innendämmung aus Mineralwolle mit Dampfbremse und Gipskartonplatte ergeben sich die Feuchteverläufe in Abb. 3-71 und Abb. 3-72. Da beim Aufbau des Wandelements die Mineralwolle ohne Verklebung eingelegt und die Dampfbremse und Gipskartonplatte ebenfalls ohne Feuchteeintrag mit Klebeband und Kartuschenkleber abgedichtet wurden, ist der Ausgangszustand mit einem Feuchtegehalt von 60 % vergleichsweise niedrig. Nach dem Einbau des Wandelements in die Versuchshalle kommt es zunächst zu einer geringen Feuchtezunahme. Ein deutlicher Feuchteanstieg ist nach Abstellen der Innenraumklimatisierung festzustellen. Der Anstieg ist jedoch eher mit mehreren Regenereignissen, vergleiche Abb. 3-73, in Verbindung zu bringen, als mit den veränderten Temperaturverhältnissen. Dies zeigt sich insbesondere im Sommer 2017, in dem nach einem starken Regenereignis die Feuchte deutlich bis auf ca. 85 % ansteigt. Danach nimmt die Feuchte wieder kontinuierlich ab, obwohl die Temperaturen sinken und die Innenraumbefeuchtung läuft. Das System nimmt also relativ wenig Feuchte aus dem Innenraum auf. Im gesamten Messzeitraum steigt die Feuchte nur für kurze Zeiträume über 80 %.

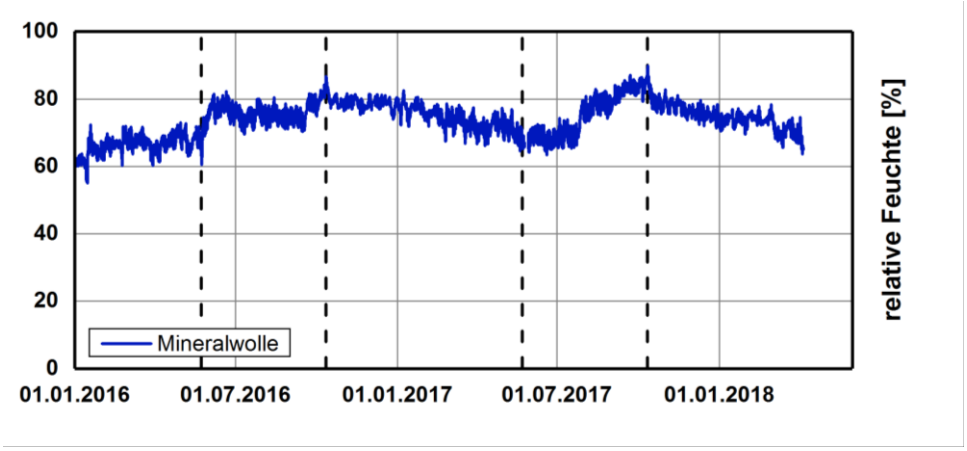


Abb. 3-71: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit Mineralwolle.

Die Holzfeuchtemessung (Abb. 3-72) bestätigt die Messergebnisse der relativen Feuchtegehalte. Der Startwert liegt unter 10 Masse-% und steigt nach dem Einbau langsam an. Stärkere Anstiege der Holzfeuchte lassen sich mit den Schlagregenereignissen korrelieren. Insgesamt kommt es zu keinen kritischen Holzfeuchten.

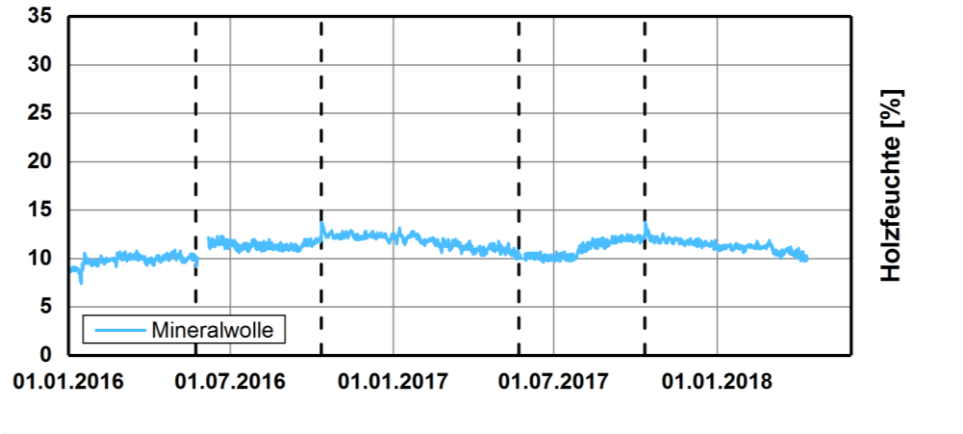


Abb. 3-72: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Mineralwolle.

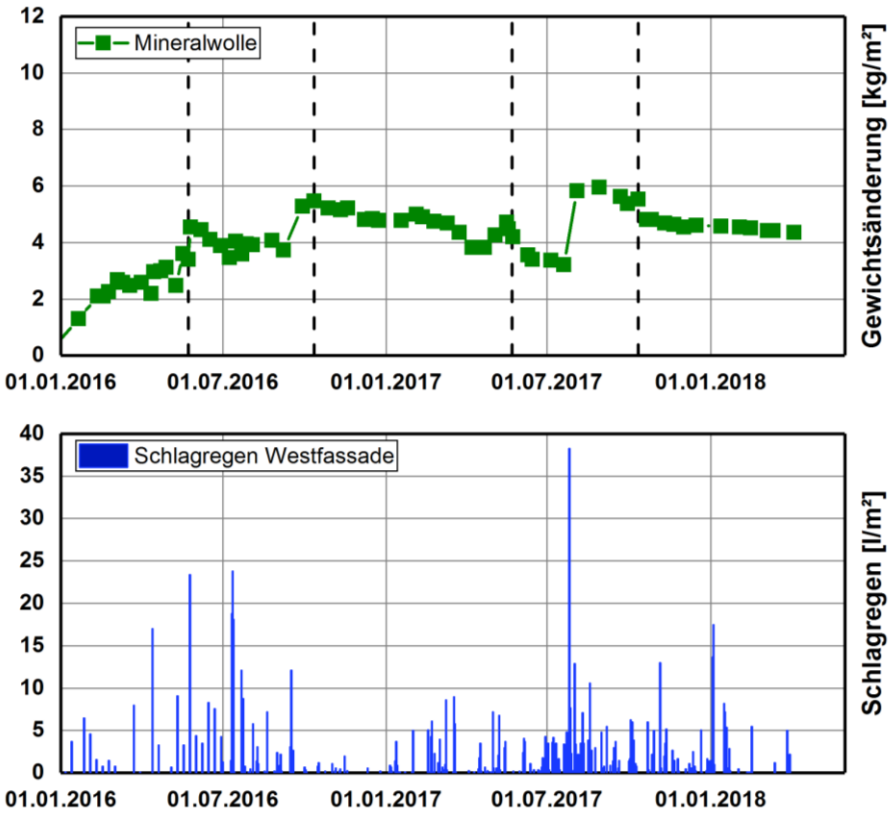


Abb. 3-73: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit Mineralwolle.

Betrachtet man die Gewichtsänderung des Wandelements in Abb. 3-73, erkennt man einen deutlichen Anstieg des Gewichts nach Regenereignissen. Die Gewichtszunahme rührt nicht von Undichtigkeiten bei der Randabdichtung her, sondern beruht vermutlich auf einer Wasseraufnahme über die Außenbeschichtung. Auch wenn die Außenfarbe nur einen geringen w-Wert aufweist, kann Wasser durch die Beschichtung aufgenommen werden und verteilt sich über das Mauerwerk. Das durch Regen aufgenommene Wasser trocknet im Laufe der Zeit wieder aus.

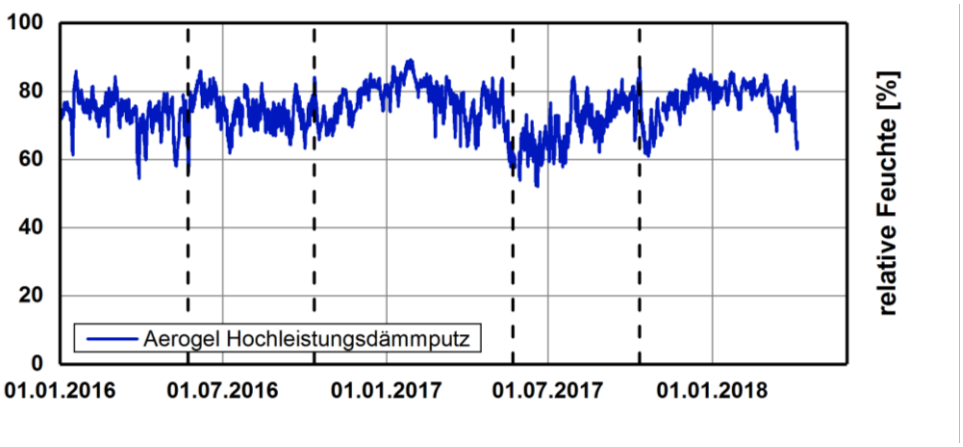


Abb. 3-74: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz.

Das Wandelement mit dem Aerogel-Hochleistungsdämmputz zeigt die in Abb. 3-74 und Abb. 3-75 folgenden Feuchteverläufe.

Betrachtet man den gemessenen Feuchteverlauf in Abb. 3-74 erkennt man, dass im ersten Untersuchungsjahr von Januar bis Ende Mai in der Heizperiode die relative Feuchte bis auf einige wenige Ausnahmen unter 80 % r.F. bleibt. Auch über den Sommer sind nur kurze zeitliche Abschnitte mit höheren Feuchten zu beobachten, die gemessene Feuchte pendelt sich auf ca. 70 % r. F. im Mittel ein. In der Winterperiode 2016/2017 steigt die Feuchte kontinuierlich an und erreicht ein Maximum von ca. 90 % r. F. im Januar 2017. Erwartungsgemäß korreliert die höchste gemessene relative Feuchte mit der kältesten Temperatur. Dieser Zusammenhang zwischen Temperatur und Feuchte lässt sich auch im weiteren Messverlauf beobachten und ist besonders auffällig, sobald die Klimatisierung (gestrichelte Linien) an- oder abgeschaltet wird. Auch in der Winterperiode 2017/2018 bleiben die gemessenen Feuchten unter 90 % r. F.

Der Verlauf der Holzfeuchte in Abb. 3-75 bestätigt die gemessenen relativen Feuchtegehalte. Auch hier zeigt sich nach einer anfänglichen Trocknungsphase im Sommer 2016 eine konstante Holzfeuchte von 12 Masse-%. Im Winter 2016/2017 steigt die Holzfeuchte wieder leicht an und erreicht maximal 18 Masse-% im Januar 2017. Danach sinkt die Holzfeuchte kontinuierlich und liegt im Juli 2017 bei 10 Masse-%. Im Winter 2017/2018 nimmt die Holzfeuchte wiederum zu, Werte über 15 Masse-% werden nicht gemessen.

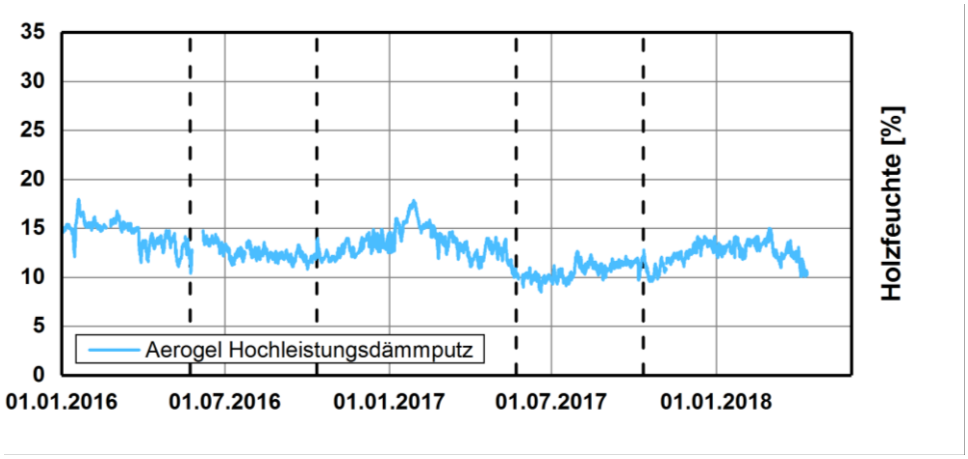


Abb. 3-75: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz.

Betrachtet man die Gewichtsänderung des Wandelements (Abb. 3-76), fällt zu Beginn des Untersuchungszeitraums eine deutliche Gewichtszunahme auf, die dadurch zu erklären ist, dass das Wandelement am Rand fehlerhaft abgedichtet war und so nach Einbau in das Versuchsgebäude Regen eindringen konnte. Nach erfolgreicher Abdichtung des Wandelementes kam es zu einer kontinuierlichen Austrocknung über den Sommer 2016. Anschließend bleibt das Gewicht des Wandelements über die Winterperiode relativ konstant. Im Sommer 2017 kommt es zunächst zu einer Gewichtsabnahme, dann nach einem sehr starken Schlagregenereignis zu einem sprunghaften Anstieg. Dass hier wiederum Regen durch eine Undichtheit eingedrungen ist, lässt sich wahrscheinlich ausschließen, da das Gewicht des Wandelements in der Folge konstant bleibt. Vermutlich handelt sich um eine oberflächliche Wasseraufnahme durch die extreme Regenlast.

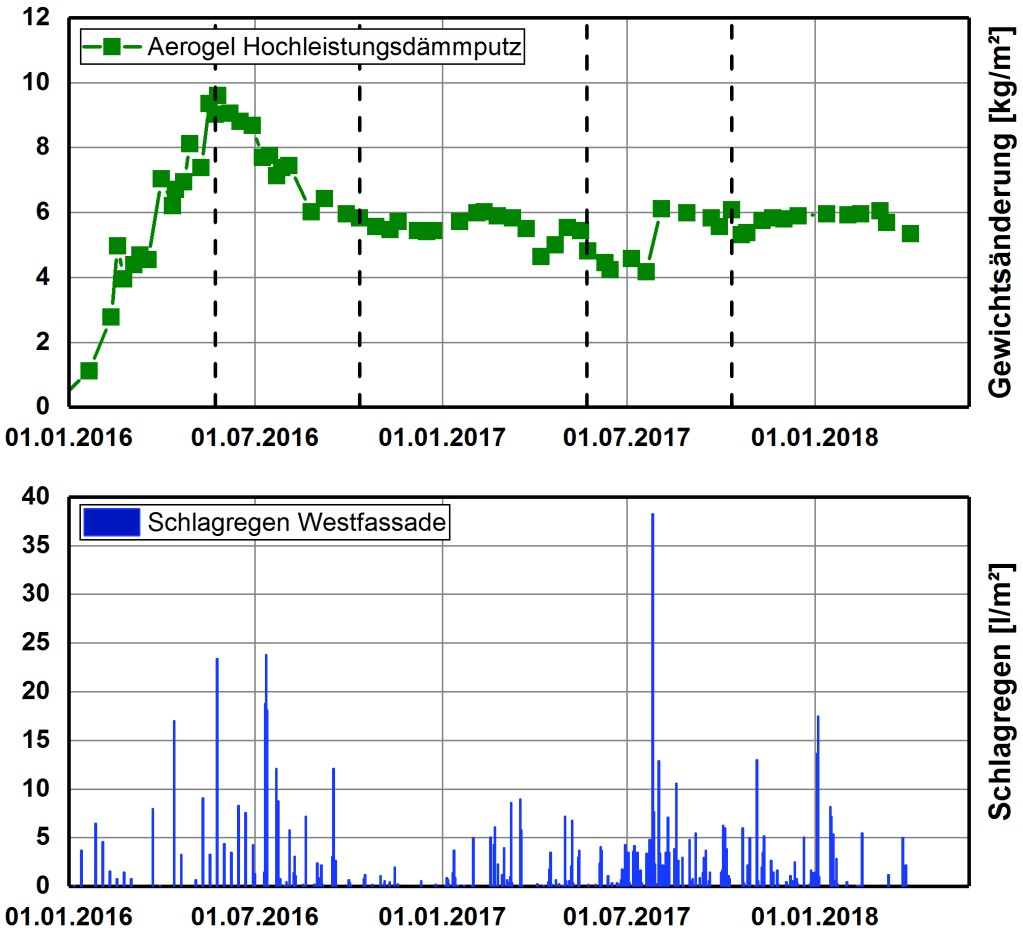


Abb. 3-76: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz.

Für das Wandelement mit der Mineraldämmplatte ergeben sich die folgenden Messergebnisse.

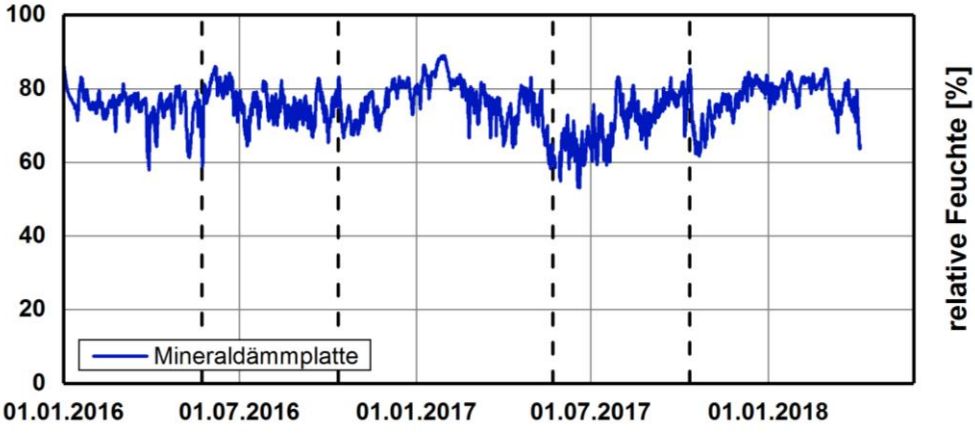


Abb. 3-77: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit Mineraldämmplatte.

Betrachtet man den gemessenen Feuchteverlauf in Abb. 3-77, erkennt man, dass im ersten Untersuchungsjahr 2016 der gemessene Feuchtegehalt nur im Sommer für einen kurzen

Zeitraum über 80 % r. F. liegt. In der Winterperiode 2016/2017 steigt die Feuchte nach Inbetriebnahme der Innenraumklimatisierung an und erreicht ein Maximum von ca. 90 % r. F. im Januar 2017. Erwartungsgemäß korreliert die höchste gemessene relative Feuchte mit der kältesten Temperatur. Dieser Zusammenhang zwischen Temperatur und Feuchte lässt sich auch im weiteren Messverlauf beobachten und ist besonders auffällig, sobald die Klimatisierung (gestrichelte Linien) an- oder abgeschaltet wird. In der Winterperiode 2017/2018 liegen die gemessenen Feuchten unter 90 % r. F.

Der Verlauf der Holzfeuchte in Abb. 3-78 bestätigt die gemessenen relativen Feuchtegehalte. Nach einer anfänglichen Trocknungsphase sinkt die Holzfeuchte auf ca. 13 Masse-% und steigt erst nach Einschalten der Heizung und Befeuchtung im Herbst 2016 langsam an. Ein Maximum mit 20 Masse-% wird im Januar 2017 während der Kälteperiode mit -20 °C Außentemperatur beobachtet. Im Winter 2017/2018 steigt die Holzfeuchte nach Inbetriebnahme der Klimatisierung langsam an und pendelt sich bei einem Wert um 15 Masse-% ein.

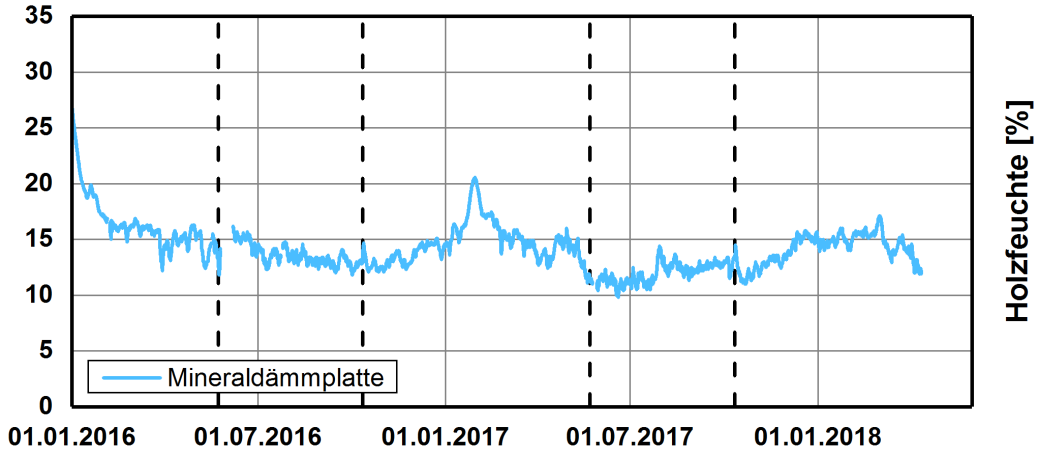


Abb. 3-78: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Mineraldämmplatte.

Betrachtet man die Gewichtsänderung des Wandelements (Abb. 3-77), fällt zu Beginn des Untersuchungszeitraums eine deutliche Gewichtszunahme auf, die dadurch zu erklären ist, dass das Wandelement am Rand fehlerhaft abgedichtet war und so nach Einbau in das Versuchsgebäude Regen eindringen konnte. Nach erfolgreicher Abdichtung des Wandelementes kam es zu einer kontinuierlichen Austrocknung über den Sommer 2016. Erst zum Jahreswechsel nimmt das Gewicht des Wandelements wieder zu, es reichert sich Feuchte aus dem klimatisierten Innenraum durch Diffusion im Wandelement an. Im Sommer 2017 kommt es zunächst zu einer Gewichtsabnahme und verbunden mit einem extremen Schlagregenereignis zu einem weiteren Anstieg. Auch im letzten Winter 2017/2018 wird eine Gewichtszunahme beobachtet.

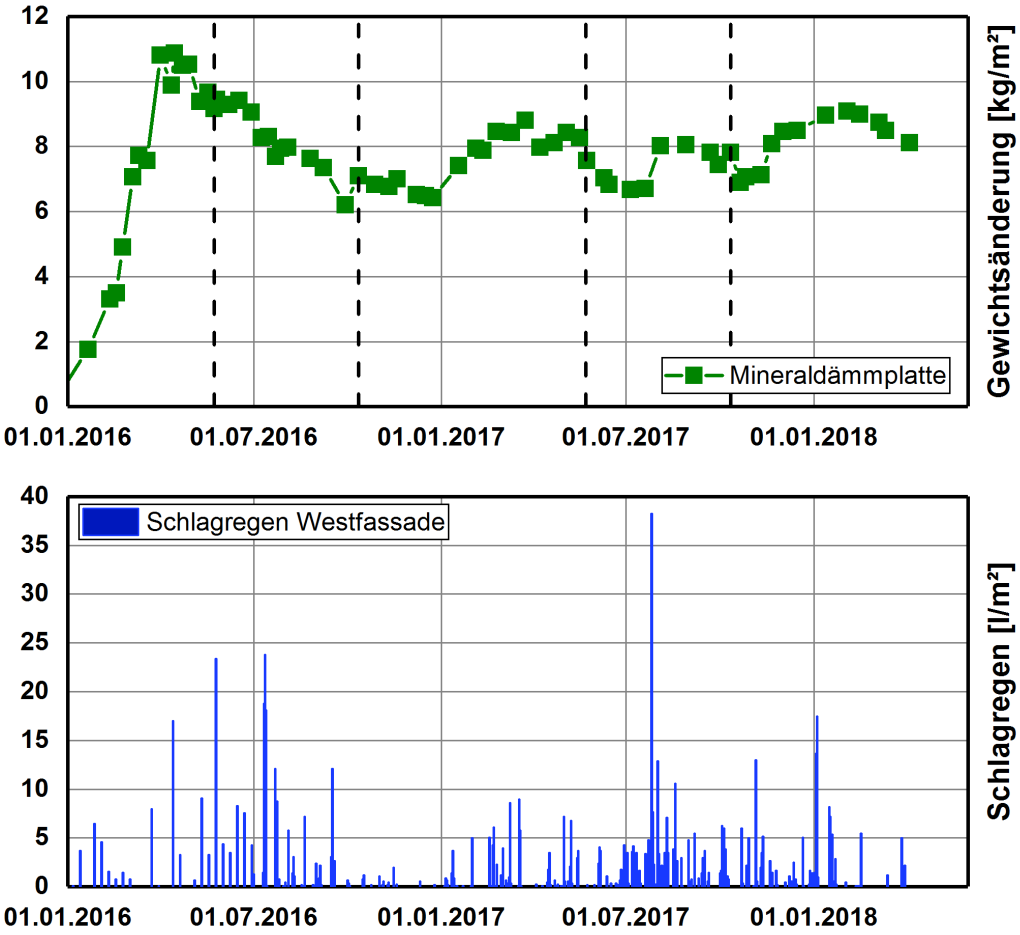


Abb. 3-79: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit Mineraldämmplatte.

Einen Vergleich des Feuchteverhaltens aller vier Wandelemente ist in Abb. 3-80 für die Winterperiode 2016/2017 und in Abb. 3-81 für die Winterperiode 2017/2018 wiedergegeben. Im ersten Untersuchungsjahr ist durch unterschiedliche Herstellungszeiten und das Vorliegen von Undichtheiten kein Vergleich möglich. Im ersten Winterhalbjahr trocknet erwartungsgemäß die Baufeuchte aus und die Wandelemente befinden sich in einem eingeschwungenen Gleichgewichtszustand, der von den klimatischen Randbedingungen aber auch von den Materialeigenschaften abhängt.

Im Dezember 2016 liegen noch relativ milde Außenlufttemperaturen vor und die gemessenen Feuchtegehalte der Wandelemente liegen bei ca. 80 % r. F.. Im Januar/Februar 2017 kommt es dann zu kürzeren Frosteinbrüchen. Während die Feuchtegehalte der beiden relativ dampfdichten Wandelemente mit EPS grau und Mineralwolle mit Dampfbremse auf unter 80 % r. F. sinken, zeigen die beiden diffusionsoffenen kapillaraktiven Innendämmungen mit Mineraldämmplatte und Aerogel-Hochleistungsdämmputz kurzfristig einen Anstieg auf ca. 90 % r. F.. Mit zunehmender Außenlufttemperatur sinkt der Feuchtegehalt aber relativ schnell wieder ab.

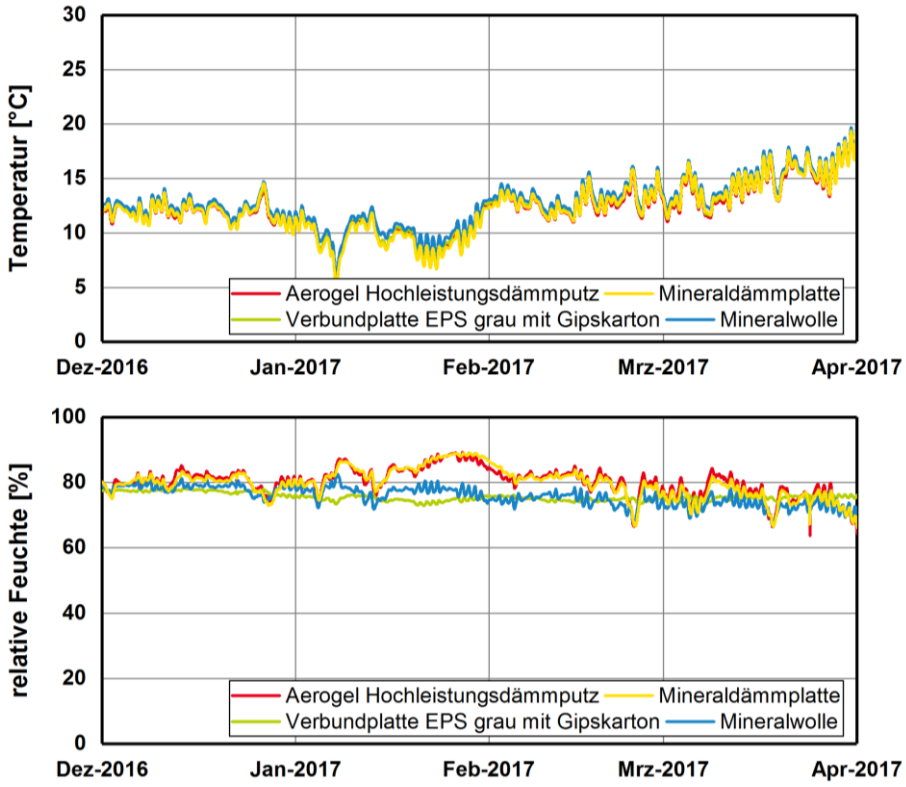


Abb. 3-80: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe Winterperiode 2016/2017.

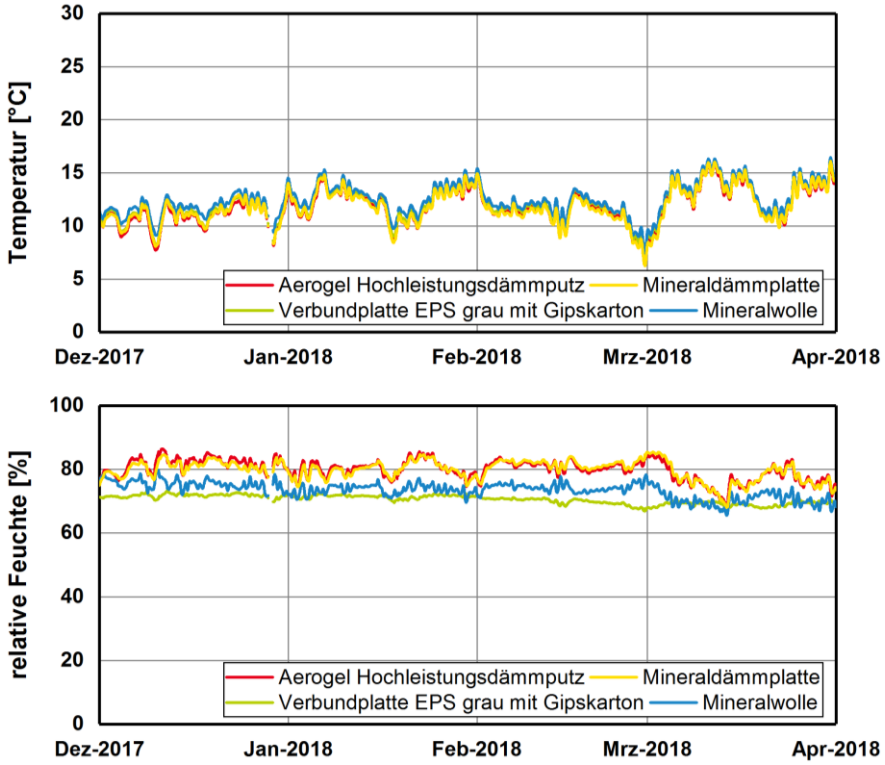


Abb. 3-81: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe Winterperiode 2017/2018.

In der zweiten Winterperiode 2017/2018 (Abb. 3-81) liegen relativ milde Klimabedingungen vor, lediglich für einen kurzen Zeitraum Ende Februar/Anfang März 2018 kommt es zu

Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. In diesem Zeitraum lässt sich wiederum ein leichter Feuchteanstieg feststellen. Insgesamt nimmt der Feuchtegehalt aller Gefache tendenziell ab. Mit zunehmendem Diffusionswiderstand der Innendämmung wirkt sich der Einfluss der Temperaturschwankungen auf den Feuchtegehalt geringer aus.

3.5.4 Validierung – Nachberechnung der Freilandversuche

Zur Validierung der Materialkennwerte, die im Labor für die Innendämmmaterialien bestimmt worden sind, sowie der Simulation für die rechnerischen Parameterstudien werden die im Freilandversuch gemessenen Temperatur- und Feuchteverläufe mit WUFI® nachberechnet. Für die Berechnung wurden die gemessenen Raum- und Außenklimadaten sowie die für die eingesetzten Materialien ermittelten Materialkennwerte verwendet. Berechnet wurde der Zeitraum von Januar 2016 bis März 2018. Aufgrund der Einbausituation wirkt das Raumklima auch an den Seiten der Wandelemente ein, was im Winter zu etwas höheren Temperaturen führt als bei einem ungestörten Wandabschnitt. In der eindimensionalen Simulation wird dies vereinfacht durch eine Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks berücksichtigt, die den Einfluss des Außenklimas auf die Grenzschichttemperatur in geeigneter Form abbildet.

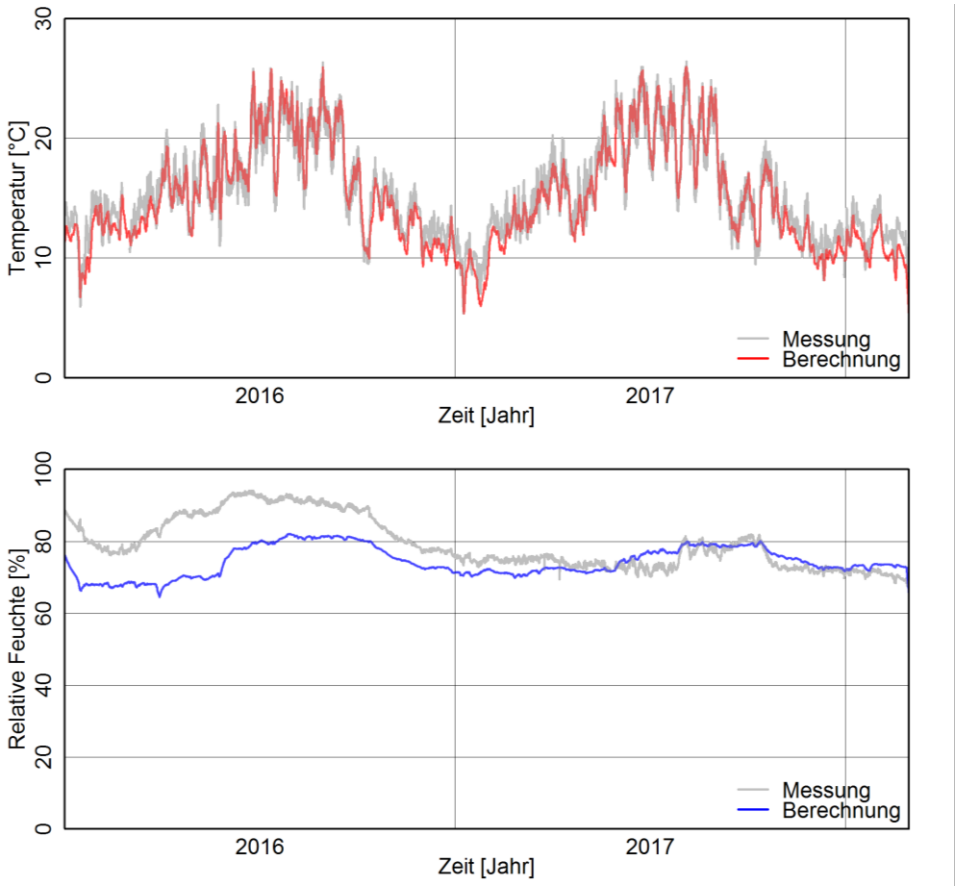


Abb. 3-82: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit EPS grau und Gipskartonplatte.

Abb. 3-82 zeigt oben die Temperaturverhältnisse und unten die relative Feuchte im Außenbereich der EPS-Dämmung direkt am Klebemörtel. Die gemessenen Temperaturverhältnisse werden in der Simulation gut abgebildet. Die geringere Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks führt allerdings zu einer leichten Dämpfung der Temperaturspitzen nach oben und unten im Vergleich zur Messung. Vor allem im Winter bleibt die Simulation aber etwas kälter als die Messung und liegt somit leicht auf der sicheren Seite.

Bei der relativen Feuchte fällt zunächst die doch recht deutliche Abweichung in den ersten etwa 1,5 Jahren auf. Die in der Messung deutlich höheren Feuchteverhältnisse sind auf den Regeneintrag durch die in Kapitel 3.5.3 beschriebene fehlerhafte Abdichtung zurückzuführen. Nachdem diese Undichtheit beseitigt wurde, konnte die Feuchte langsam austrocknen und die gemessenen Werte stimmen im zweiten Messjahr ebenfalls gut mit den simulierten Verhältnissen überein.

Da die Dämmung diffusionshemmend ist, spielt der Feuchteeintrag im Winter aus dem Raum nur eine untergeordnete Rolle. Die höchsten Feuchteverhältnisse im Jahresverlauf werden im Sommer erreicht, was auf die Einwirkung von Niederschlag zurückzuführen ist. Auch diese sommerlichen Maximalwerte werden in der Simulation gut abgebildet.

Für das Wandelement mit Mineralwolle und Dampfbremse sind die Ergebnisse in Abb. 3-83 dargestellt. Die gemessenen Temperaturverhältnisse werden in der Simulation gut abgebildet. Auch hier führt die geringere Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks zu einer leichten Dämpfung der Temperaturspitzen nach oben und unten im Vergleich zur Messung. Vor allem im Winter bleibt die Simulation aber etwas kälter als die Messung aufgrund der Seiteneffekte durch das Raumklima. Im Sommer wird eine gute Übereinstimmung erreicht.

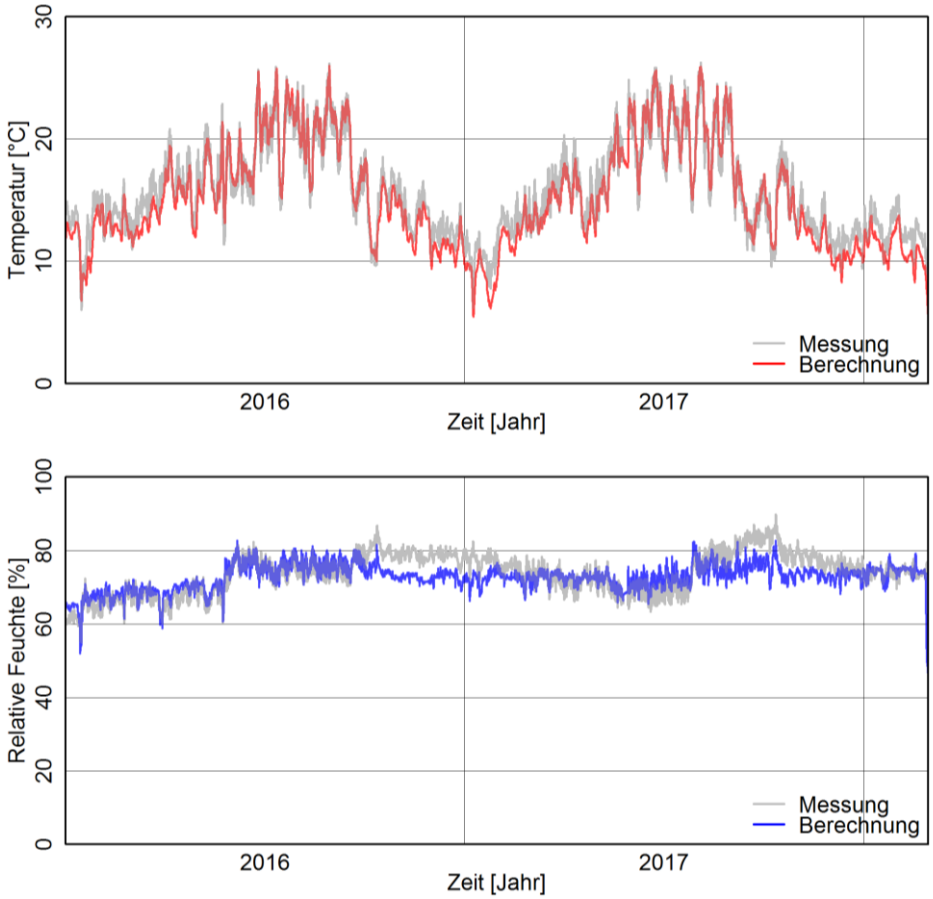


Abb. 3-83: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit Mineralwolle und Dampfbremse.

Der Feuchteverlauf lässt sich insgesamt gut nachrechnen. Lediglich die Feuchteeinträge durch Niederschläge werden bei der Berechnung nicht ausreichend genau berücksichtigt. Insgesamt liegen jedoch unkritische Feuchteverhältnisse mit deutlich unter 95 % r. F. vor.

Abb. 3-84 zeigt oben die Temperaturverhältnisse und unten die relative Feuchte im Außenbereich des Aerogel-Hochleistungsdämmputzes direkt am Kalkmörtel auf dem Mauerwerk. Die gemessenen Temperaturverhältnisse werden in der Simulation gut abgebildet. Die geringere Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks führt allerdings zu einer leichten Dämpfung der Temperaturspitzen nach oben und unten im Vergleich zur Messung. Ähnlich verhält sich auch der berechnete Verlauf der relativen Feuchte im Vergleich zu den Messwerten. Im ersten Sommer fällt auf, dass die Messwerte der Feuchte etwas höher liegen als die berechneten – dies liegt vermutlich an noch verbliebener Einbaufeuchte bzw. durch die Undichtheit eingedrungene Regenfeuchte im Mauerwerk, die in der Simulation nicht adäquat wiedergegeben werden kann, da als Eingabeparameter lediglich die Feuchte an der Grenzschicht zwischen Dämmung und Mauerwerk, nicht aber weiter außen zur Verfügung stand. Im zweiten Sommer ist die Übereinstimmung bereits deutlich besser und die anfängliche Einbau- bzw. Regenfeuchte aus dem Mauerwerk macht sich nur noch gegen Ende des Sommers bemerkbar. Im Winter werden die Maximalwerte der relativen Feuchte jeweils über den gesamten Zeitraum mit zufriedenstellender Genauigkeit abgebildet.

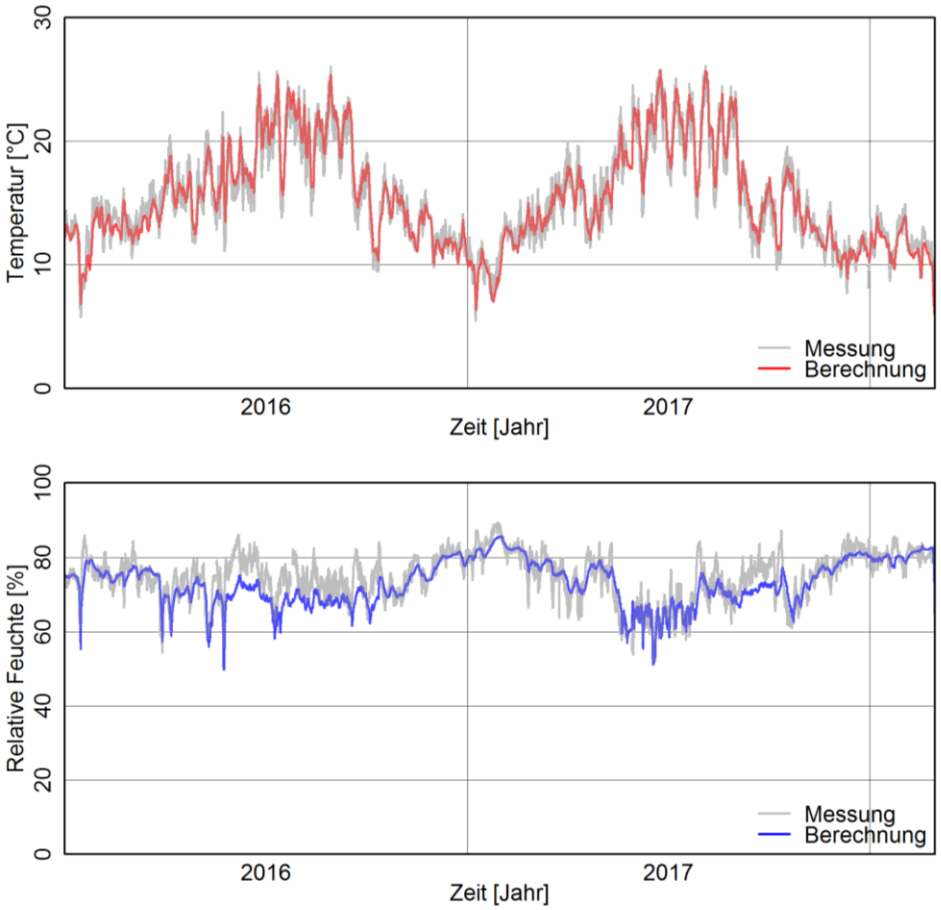


Abb. 3-84: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit Aerogel Hochleistungsdämmputz.

Abb. 3-85 zeigt oben die Temperaturverhältnisse und unten die relative Feuchte im Außenbereich der Mineraldämmplatte direkt am Kalkmörtel auf dem Mauerwerk. Die gemessenen Temperaturverhältnisse werden in der Simulation gut abgebildet. Die geringere Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks führt allerdings, wie schon zuvor erwähnt, zu einer leichten Dämpfung der Temperaturspitzen nach oben und unten im Vergleich zur Messung. Ähnlich verhält sich auch der berechnete Verlauf der relativen Feuchte im Vergleich zu den Messwerten. Im ersten Sommer fällt auf, dass die Messwerte der Feuchte etwas höher liegen als die berechneten – dies liegt vermutlich an noch verbliebener Einbaufeuchte bzw. durch die Undichtheit eingedrungene Regenfeuchte im Mauerwerk, die in der Simulation nicht adäquat wiedergegeben werden kann, da als Eingabeparameter lediglich die Feuchte an der Grenzschicht zwischen Dämmung und Mauerwerk, nicht aber weiter außen zur Verfügung stand. Im zweiten Sommer ist die Übereinstimmung bereits deutlich besser und die anfängliche Einbau- bzw. Regenfeuchte aus dem Mauerwerk macht sich nur noch gegen Ende des Sommers bemerkbar. Im Winter werden die Maximalwerte der relativen Feuchte jeweils über den gesamten Zeitraum mit zufriedenstellender Genauigkeit abgebildet.

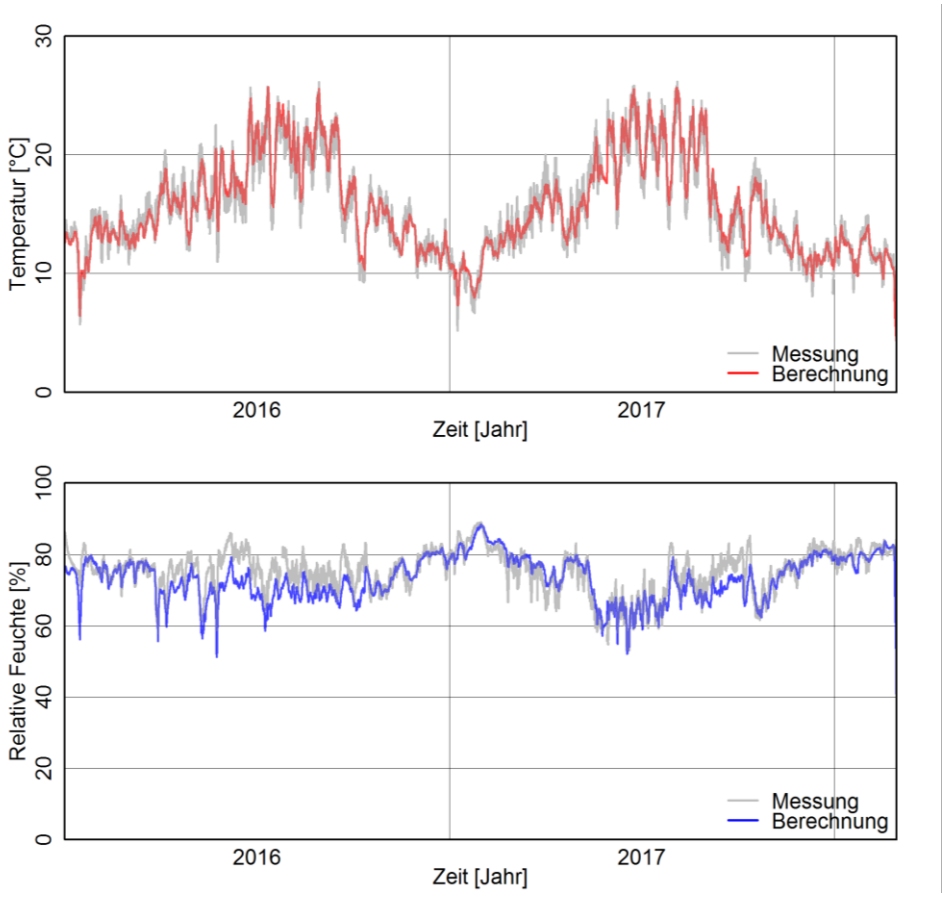


Abb. 3-85: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit Mineraldämmplatte.

Insgesamt werden die hygrothermischen Verhältnisse in der Nachberechnung gut wiedergegeben, sodass mit den ermittelten Materialeigenschaften die Parameterstudien durchgeführt werden können.

3.5.5 Zusammenfassung und Fazit

Die Ergebnisse der Freilandversuche an den Wandelementen lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei einer Versuchsdauer über 3 Winterperioden wird festgestellt, dass die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Mauerwerk und Innendämmung nicht unter 5 °C sinkt, auch nicht bei -20 °C Außenlufttemperatur. Randeffekte durch die Einbausituation im Versuchsgebäude führen zu höheren Werten. Die Messung der relativen Feuchte und die Holzfeuchtemessung zeigen gute Übereinstimmung.

Die diffusionsoffenen Wandelemente mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz oder mit Mineraldämmplatte zeigen kurzzeitig einen Anstieg der Feuchte auf Werte bis etwa 90 % r.F., bleiben aber wie die dampfbremsenden Varianten (EPS grau oder Mineralwolle mit Dampfbremse) über den gesamten Zeitraum im unkritischen Bereich. Die Messergebnisse lassen sich mit WUFI® insbesondere nach Austrocknung der Einbaufeuchte bzw. Regenfeuchte gut nachvollziehen. Die ermittelten Materialdatensätze können entsprechend dieser Validierung für die Parameterstudie verwendet werden.

3.6 Durchgeführte Untersuchungen und Randbedingungen

Wie eingangs erwähnt ist das Ziel der Untersuchungen eine möglichst breite Gültigkeit der erzielten Simulationsergebnisse, weshalb eine Variation der folgenden Parameter vorgenommen wurde:

- Variation des Außenklimas sowie der Exposition
- Variation der Farbgebung der Außenoberfläche
- Variation des Raumklimas
- Dampfbremsende Deckschichten an der Innenoberfläche wie z.B. Fliesen oder Anstriche

Diese Parameter werden in den folgenden Unterkapiteln zunächst genauer beschrieben.

3.6.1 Außenklima

Das Außenklima beeinflusst das Verhalten der Konstruktion maßgeblich, wobei vor allem die Umgebungstemperatur und das Angebot an Schlagregen und Globalstrahlung eine Rolle spielen. Für die Parameterstudie werden vier Außenklimastandorte betrachtet, wobei jeweils ein Standort je Schlagregenbeanspruchungsgruppe der DIN 4108-3:2014 sowie Fichtelberg als zusätzlicher Worst-Case-Standort innerhalb Deutschlands gewählt wurde. Die gewählten Standorte nach DIN 4108-3:2014 sind:

- Potsdam für die Beanspruchungsgruppe 1
- Hamburg für die Beanspruchungsgruppe 2
- Holzkirchen für die Beanspruchungsgruppe 3

Für die Standorte werden jeweils die im Forschungsprojekt „Klimamodelle“ (Zirkelbach und Schöner 2016) erstellten hygrothermischen Referenzjahre (HRY) verwendet, welche im Unterschied zu den meisten anderen Datenquellen auch stündlich gemessene Niederschlagsdaten enthalten und bezüglich aller Klimaelemente das hygrothermische Langzeitverhalten repräsentativ für langjährige Messungen wiedergeben. Nachfolgend ist eine kurze Übersicht der Klimadaten der vier Standorte aufgeführt. Zunächst werden die monatlichen Schlagregenmengen der vier Standorte in Abb. 3-86 und Abb. 3-87 miteinander verglichen. Für die hygrothermische Simulation wurde ein Faktor von 0,07 nach Karagiozis et al. verwendet. Die Schlagregenmenge ohne Gebeäudeeinfluss an der Wetterstation auf freiem Feld ist in Abb. 3-86 dargestellt.

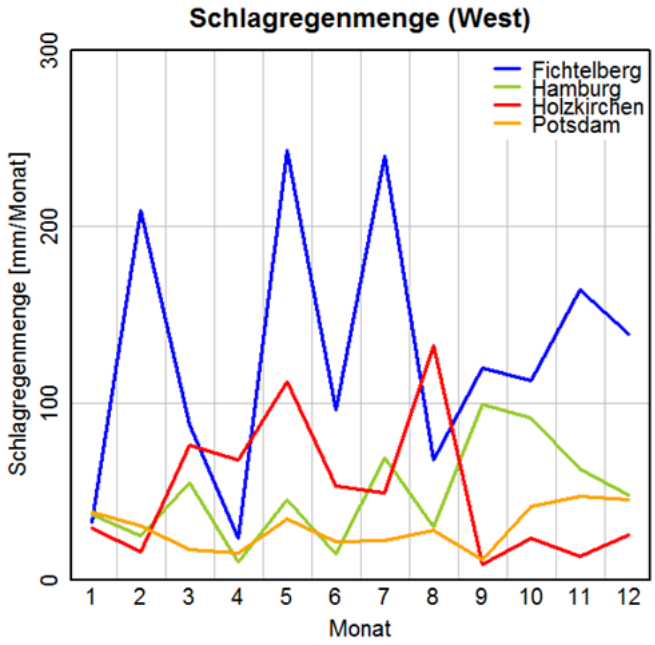


Abb. 3-86: Monatliche Schlagregenbelastungen an den vier Klimastandorten für eine ungeschützte westlich orientierte Lage.

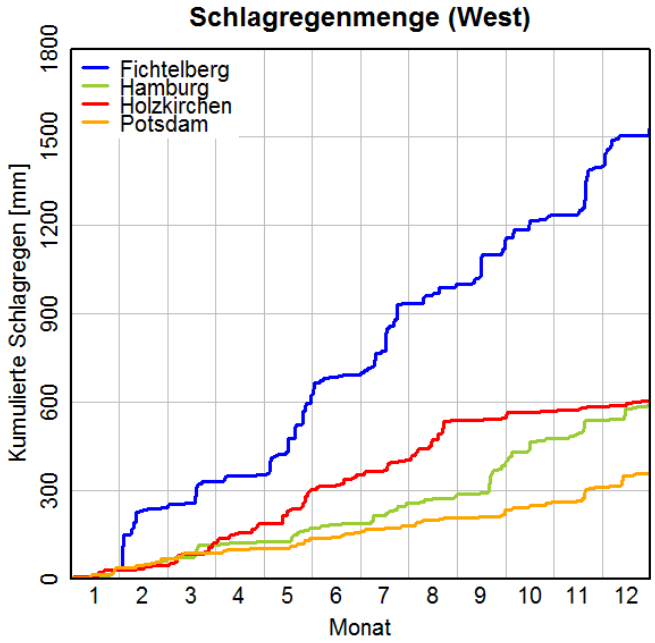


Abb. 3-87: Kumulierte Schlagregenmenge für eine ungeschützte westlich orientierte Lage an den vier betrachteten Standorten.

Wie Abb. 3-87 und Abb. 3-88 veranschaulichen, hat Fichtelberg mit Abstand die größte Schlagregenbelastung. Die nächstgrößere Schlagregenbelastung tritt am Standort Holzkirchen auf. Eine Besonderheit für Holzkirchen ist, dass der Schlagregen hier gehäuft in den Sommermonaten auftritt, während sich z.B. am Standort Hamburg die Schlagregenbelastung relativ gleichmäßig über das Jahr verteilt. Der richtungsbezogene Vergleich des Schlagregens auf eine senkrecht orientierte Außenwand ist in Abb. 3-88 dargestellt.

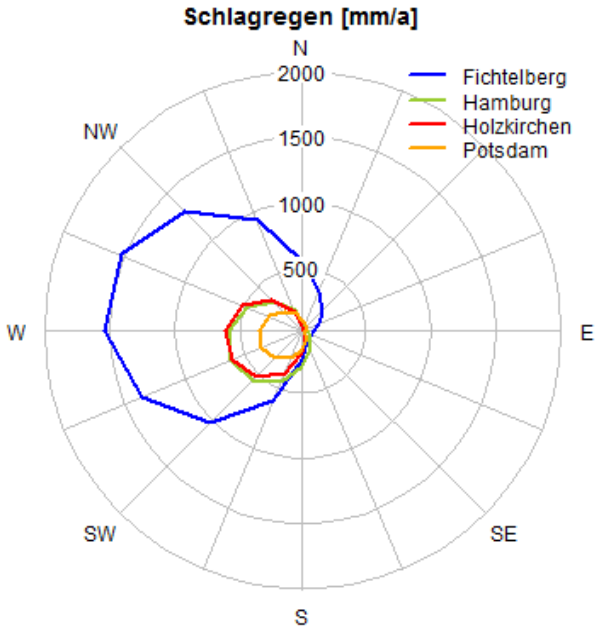


Abb. 3-88: Richtungsbezogene Schlagregenmenge auf eine vertikale Oberfläche an den vier betrachteten Standorten.

Abb. 3-88 zeigt, dass an allen vier Standorten die höchsten Belastungen bei Westorientierung auftreten, während die Ost- bzw. Südostorientierung abgesehen von Fichtelberg die geringste Schlagregenbelastung aufweist. Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung wird daher die westliche Ausrichtung mit dem Schlagregenmaximum im Rahmen der Parameterstudie betrachtet.

Die mittleren jährlichen Temperaturen der einzelnen Standorte sind in Abb. 3-89 einander gegenübergestellt.

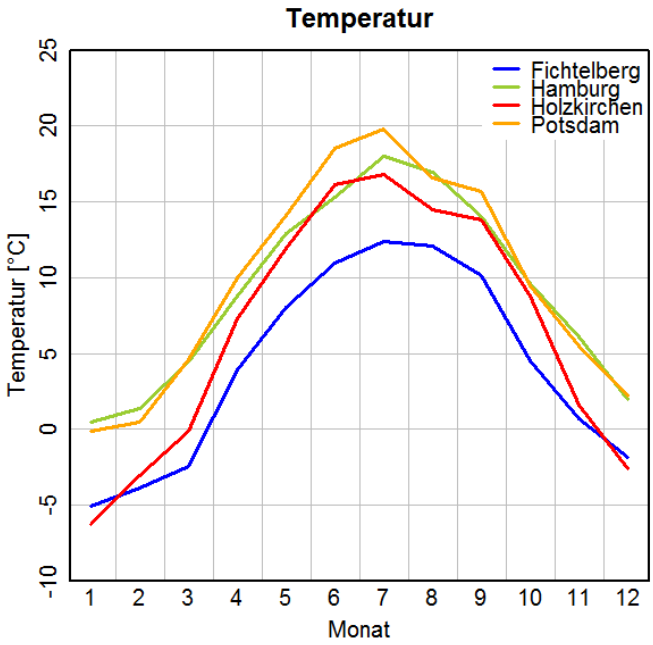


Abb. 3-89: Vergleich der Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur der vier betrachteten Standorte.

Wie Abb. 3-89 erkennbar, treten in Fichtelberg fast ganzjährig die niedrigsten Temperaturen auf. Holzkirchen ist während der Wintermonate ähnlich kalt, erwärmt sich im Sommer aber deutlich stärker, sodass hier die Temperaturspanne über das Jahr am größten ist. Der wärmste Standort ist Potsdam.

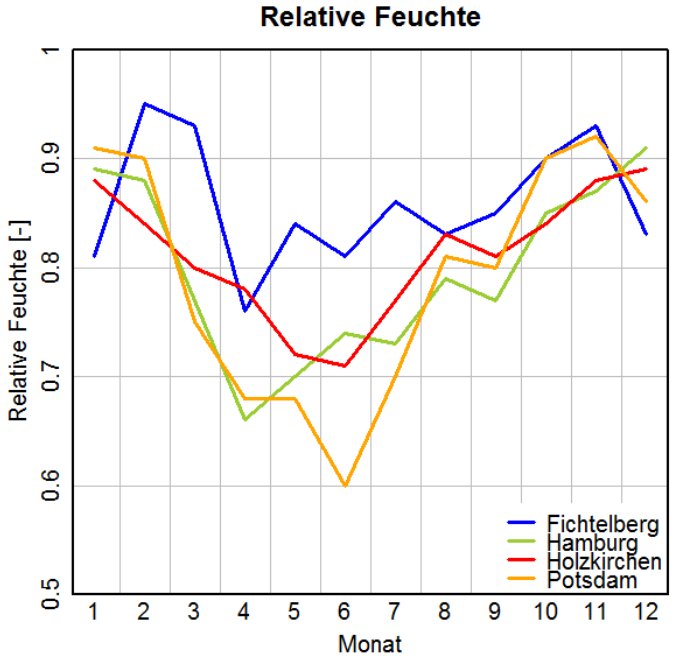


Abb. 3-90: Vergleich der Monatsmittelwerte der rel. Luftfeuchten der vier betrachteten Standorte. Dargestellt sind die jeweiligen Monatsmittelwerte, dazwischen wurde linear interpoliert.

Die rel. Luftfeuchte hängt vom Wasserdampfgehalt der Luft und von der Umgebungstemperatur ab. Dementsprechend ist es nicht verwunderlich, dass der kälteste Standort Fichtelberg die im Mittel höchsten rel. Luftfeuchten aufweist, gefolgt von Holzkirchen. Hamburg und Potsdam weisen einen recht ähnlichen Jahresverlauf mit leicht niedrigeren Luftfeuchten auf, wobei der Sommer in Potsdam nochmal etwas trockener bleibt.

Die nördliche Ausrichtung ist für alle vier Standorte die mit der geringsten solaren Einstrahlung. Infolgedessen treten hier auch die geringsten Fassadenoberflächentemperaturen auf, sodass die Nordorientierung als zweite Worst-Case-Betrachtung mit in die Parameterstudie aufgenommen wird.

Unter diesen außenklimatischen Randbedingungen ergibt sich für fast alle Varianten ein im Vergleich zum Referenzfeuchtegehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte höherer Gesamtwassergehalt im Bauteil. Einzig die nördliche Ausrichtung am Standort Holzkirchen zeigt für einige Fälle einen geringeren Gesamtwassergehalt.

3.6.2 Raumklima

Auf der Innenseite der Konstruktion werden drei verschiedene Raumklimabedingungen angenommen. Dies sind die Raumklimabedingungen der DIN EN 15026:2007-08 jeweils für

eine „normale“ und eine „hohe“ Belegung sowie das Raumklima nach WTA Merkblatt 6-2-01/D. Die Raumklimamodelle leiten die jeweiligen Innenraumbedingungen von den Umgebungstemperaturen ab. Das Raumklima nach WTA 6-2 entspricht dem der EN 15026 mit „normaler“ Belegung wobei die Luftfeuchte für eine kritischere Bemessung nochmals um 5% erhöht wird. Die so entstehenden Transferkurven der rel. Luftfeuchtigkeit sind nachfolgend in Abb. 3-91 exemplarisch dargestellt.

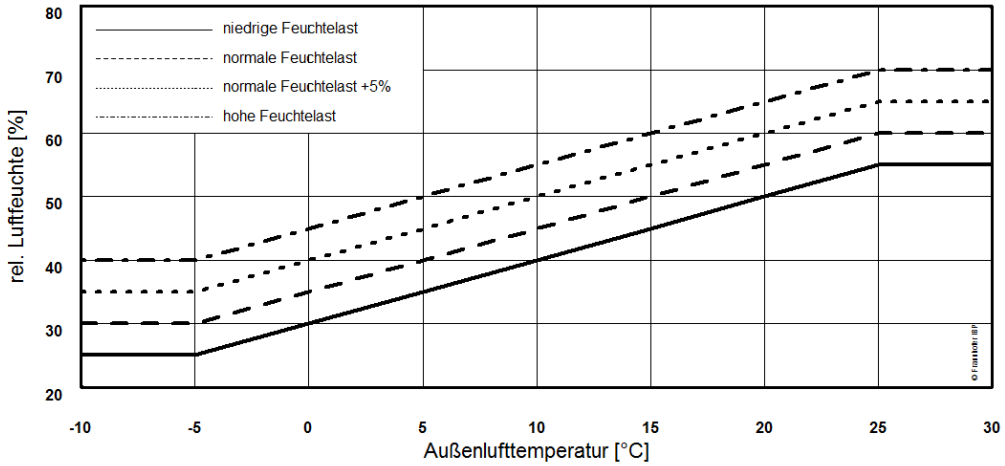


Abb. 3-91: Ableitung der Raumluftfeuchte von der Außenlufttemperatur.

Für die Parameterstudie wurden die Fälle mit einer normalen, um 5 % erhöhten und hohen Feuchtelast betrachtet. Am Beispiel des Standortes Holzkirchen fluktuieren die daraus resultierenden Raumluftfeuchten zwischen 30 % und 70 % im Jahresverlauf.
Neben der rel. Feuchte wird auch die Temperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur zwischen 20 °C und 25 °C variiert. Die Transferkurve ist nachfolgend in Abb. 3-92 dargestellt.

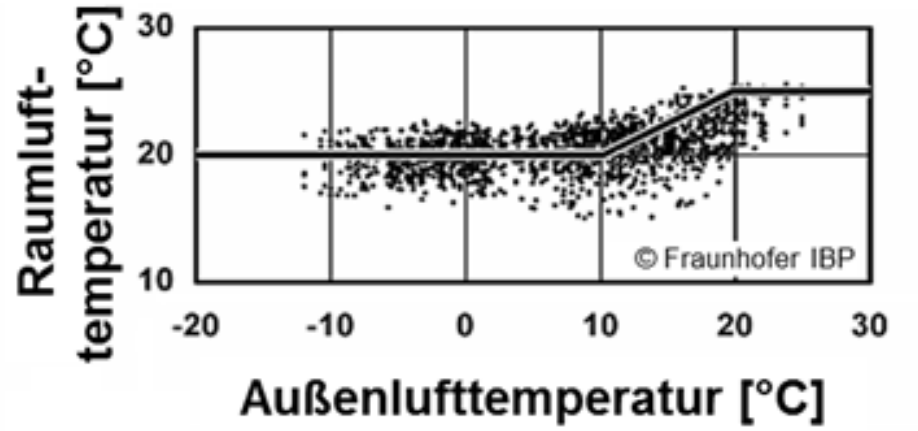


Abb. 3-92: Transferkurve der Raumlufttemperatur von der Umgebungstemperatur

3.6.3 Farbgebung der Oberfläche

Die Farbgebung der Fassade hat einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Konstruktion und damit auf den sich einstellenden Temperaturgradienten sowie auf die

Feuchteverhältnisse im Bauteil. Für den Standort Holzkirchen ist dies für zwei exemplarische Tage im Winter und Sommer in Abb.3-93 dargestellt.

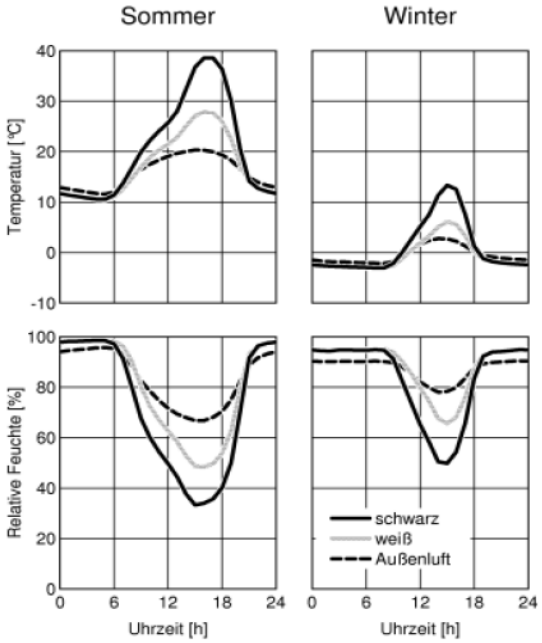


Abb.3-93: Exemplarischer Verlauf der Oberflächentemperatur an -gedämmten Prüfkörpern mit unterschiedlicher Farbgebung der Außenoberfläche aus Künzel et al. 2006.

Die in Abb.3-93 betrachteten gedämmten Prüfkörper zeigen einen deutlichen Einfluss der Farbgebung auf die Temperaturen der äußeren Oberfläche. Im Sommer beträgt die Temperaturdifferenz etwa 10 K zwischen einer dunklen und einer gleich exponierten hellen Oberfläche. Bezogen auf die rel. Feuchte an der Oberfläche bedeutet dies eine Differenz von ca. 10 %. Um die in der Praxis am häufigsten auftretende Bandbreite an unterschiedlichen Farbgebungen abzudecken, werden in der Parameterstudie eine helle Oberfläche mit einem Absorptionsgrad von α = 0,4 für einen typischen hellen Putz und eine dunklere Oberfläche für einen Naturstein oder eine Ziegelfassade mit einen Absorptionsgrad von α = 0,6 betrachtet. Dunklere Farbgebungen würden zu einer noch stärkeren Erwärmung und günstigeren Bedingungen führen, kommen in der Praxis aber nur selten zum Einsatz und sollten nur im Einzelfall berücksichtigt werden. Auch Sonderfälle, wie sie z.B. bei der Verwendung von IR-aktiven Beschichtungen auftreten, werden hier nicht näher betrachtet

3.6.4 Dampfbremse und Deckschichten an der Innenseite

Die Innenoberfläche wird je Dämmstoffsystem mit zwei Varianten betrachtet: Die erste entspricht dem jeweiligen Systemaufbau ohne zusätzliche dampfbremsende Schicht. Die zweite Variante spiegelt z.B. die Nutzung als Feuchtraum wider und berücksichtigt einen zusätzlichen s_d-Wert von 2 m z.B. durch Fliesen an der Innenoberfläche (Holm und Künzel 1999).

3.7 Auswahl und Definition der Bewertungskriterien

Für die Bewertung werden die für das jeweilige Dämmstoffsystem relevanten Bewertungsgrößen aus der folgenden Gesamtliste ausgewählt:

- Schimmelpilzrisiko an der Innenoberfläche (Sedlbauer 2001)
- Tauwassermenge im Dämmstoff bei hydrophoben Mineralfaserdämmstoffen in Anlehnung an die DIN 4108-3:2014
- Überschreitung der Grenzwerte für den Durchfeuchtungsgrad und die rel. Porenluftfeuchte in der Grenzschicht zwischen Innendämmung und Bestandsmauerwerk nach WTA Merkblatt 6-5
- Überschreitungshäufigkeit eines 30 prozentigen Durchfeuchtungsgrades im äußeren Teil des Bestandsmauerwerkes. In Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5 als Kriterium für die Frostbeständigkeit
- Überschreitung der kritischen Holzfeuchte von 18 M.% nach DIN 68800-2:2012-02

Zunächst werden alle Kriterien, die für ein Dämmstoffsystem relevant sind, untersucht. Beispielsweise kann im Vorfeld schon die Holzfeuchte bei einer EPS-Dämmplatte als irrelevant ausgeschlossen werden. Für die Darstellung der detaillierten sowie der zusammengefassten Ergebnisse wird die sog. Heatmap gewählt. Zur Analyse und übersichtlichen Visualisierung von großen Datenmengen wurde sie schon 1873 (Loua 1873) eingesetzt. Damals wurde die Visualisierungsform von dem französischen Statistiker Toussaint Loua zur Darstellung der Bevölkerungsverteilung von Paris verwendet (Loua 1873).

Für die Auswertung der Parameterstudie wird je Dämmstoffsystem und Innenraumklima jeweils ein Satz an Heatmaps erstellt. Dies dient dazu, die Anzahl der Fälle für einen Heatmap-Satz zu reduzieren - bei der Unterteilung in die drei Innenraumklimabedingungen mit unterschiedlichen Feuchtelasten (normal, Bemessung, hoch) ergeben sich gerade noch gut auf einer Seite darstellbare Variantenzahlen. Die Spalten enthalten die unterschiedlichen Variationen des Dämmstoffsystems (Wärmeleitfähigkeit und Dicke) sowie die vier unterschiedlichen Bestandskonstruktionen. Die Zeilen enthalten die unterschiedlichen Außenklimabedingungen und Orientierungen sowie die Strahlungsparameter außen und den s_d-Wert der Innenoberfläche. Die Ergebnisbewertung der jeweiligen Variante wird farblich in der zugehörigen Zelle dargestellt. Zum besseren Verständnis ist dieser Aufbau exemplarisch in Abb.3-94 dargestellt. Exemplarisch ist eine Ergebnis Heatmap in Abb.3-95 dargestellt.

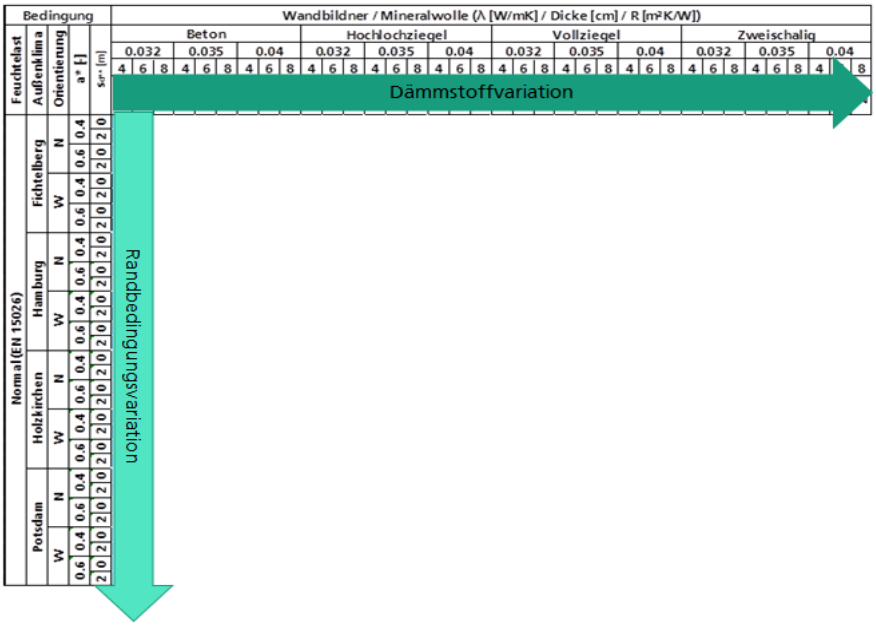


Abb.3-94: Exemplarischer Aufbau der Heatmap des Mineralwolle-Dämmsystems für das Innenraumklima nach EN 15026 mit normaler Feuchtelast. In den Spalten werden die Ergebnisse der Dämmstoffkombinationen (versch. Wärmeleitfähigkeit und Dicke) mit den verschiedenen Bestandswänden, dargestellt. Die Zeilen stehen für die jeweilige Randbedingungskombination aus Standort, Orientierung, Farbgebung außen und sd-Wert an der Innenoberfläche. Innerhalb dieser Matrix wird die Bewertung des Ergebnisses farblich in der zugehörigen Zelle dargestellt.

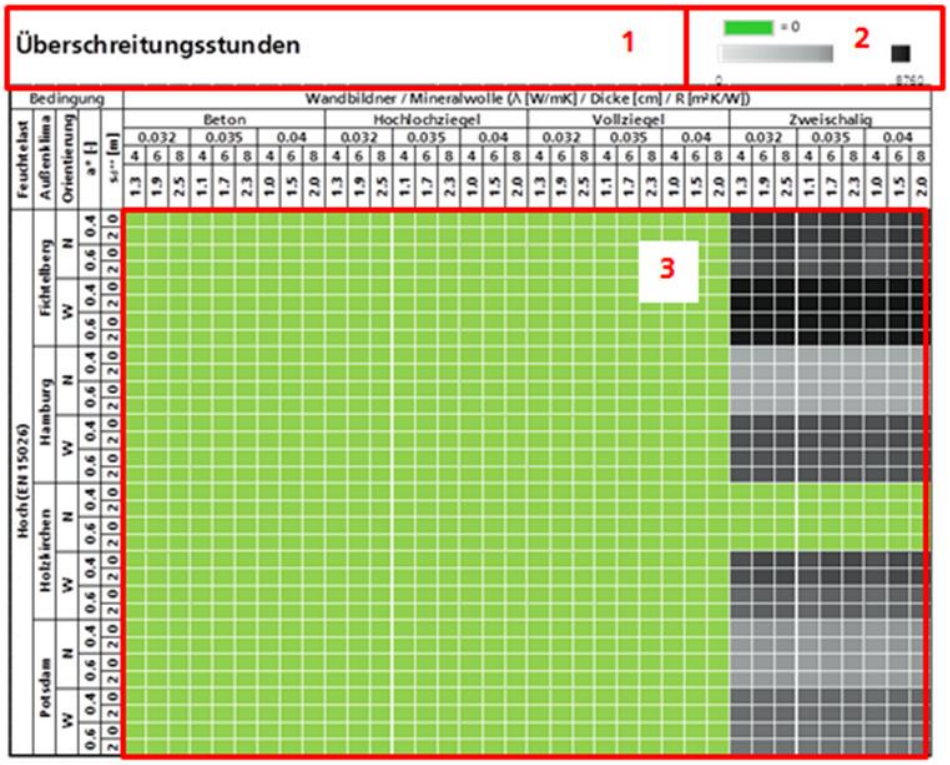


Abb.3-95: Exemplarische Heat Map für die Anzahl an Überschreitungsstunden des für Frostschäden kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30% im Außenbereich des Mauerwerks. Die betrachtete Bewertungsgröße ist jeweils links oben angegeben (1), die Skalierung rechts oben (2) und Wertebereich oder Bewertung der Variante in der Tab. (3) hinterlegt.

Im obigen Beispiel ist die Überschreitungsdauer des kritischen Grenzwertes der einzelnen Varianten farblich dargestellt. Tritt in einer Variante keine Überschreitung des Grenzwerts auf, wird das Feld grün dargestellt, bei Überschreitung wird das Feld zunächst weiß und bei höheren Wertenzunehmend schwarz dargestellt. Durch diese farbliche Unterscheidung lassen sich die kritischen Varianten schnell und intuitiv erfassen.

3.7.1 Maximale Tauwassermenge in hydrophoben Faserdämmstoffen

Für dieses Bewertungskriterium wird basierend auf den Anforderungen der DIN 13788:2012 ein Grenzwert von 200 g/m² herangezogen. Bleiben die anfallenden Tauwassermengen unterhalb dieses Wertes ist kein Ablaufen des Tauwassers zu erwarten. Ausgewertet werden lediglich hydrophobe mineralische Faserdämmstoffe, da die Sorption der Fasern hier eine untergeordnete Rolle spielt. Ausgewertet wird jeweils der kritischste Zentimeter der betrachteten Innendämmung. Aufgrund des Temperaturgradienten ist dies der an die Grenzschicht zur Bestandswand angrenzende Zentimeter der Dämmstoffschicht.

3.7.2 Schimmelpilzrisiko auf der Innenoberfläche

Die Bewertung des Schimmelpilzrisikos auf der Innenoberfläche erfolgt zunächst anhand der sog. LIM_{Bau}-Kurven (LIM = Lowest Isopleth of Mould) nach Sedlbauer 2001. Die minimalen Wachstumsbedingungen für Schimmel können von sogenannten Isoplethen abgeleitet werden, die die Keimdauer und das Wachstum abhängig von Temperatur und relativer Feuchte für die auf Innenoberflächen vorkommenden Schimmelpilz-Spezies darstellen. Für die LIM-Kurven wurden die Keim- und Wachstumseigenschaften zusammengefasst und die eine „Hüllkurve“ mit dem geringsten Wachstumsrisiko ermittelt. Hierbei wird unterschieden zwischen der Grenzkurve LIM 0 für das Wachstum auf optimalem Substrat und LIM_{Bau}I für biologisch verwertbare Baustoffe sowie LIM_{Bau}II für biologisch kaum verwertbare Baustoffe. Bleiben die Temperatur- und Feuchte-Kombinationen auf der Baustoffoberfläche unter der dazugehörigen LIM-Kurve, kann Schimmelwachstum ausgeschlossen werden. Steigen die Bedingungen allerdings über längere Zeiträume über die Kurve, kann ggf. Wachstum auftreten. In diesem Fall erfolgt eine detaillierter Betrachtung mit dem instationären Schimmelpilzwachstumsmodell WUFI® Bio (Sedlbauer 2001). Die verwendeten LIM-Kurven sind in Abb.3-96 dargestellt.

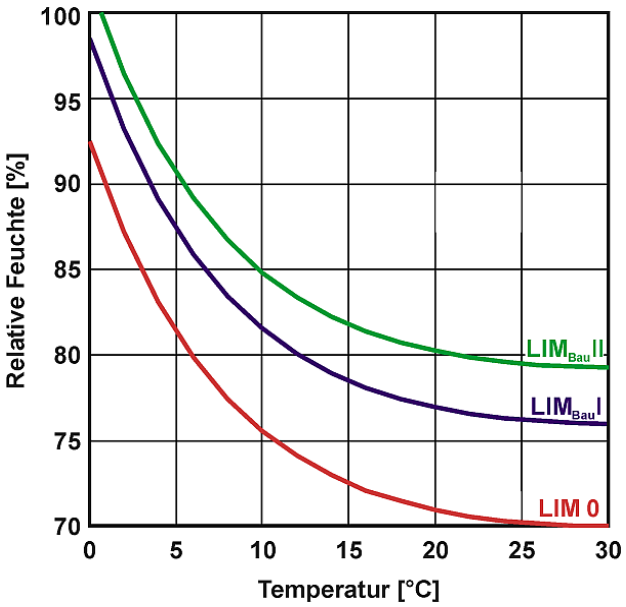


Abb.3-96: Minimale Keim- und Wachstumsbedingungen für Schimmelsporen auf biologisch verwertbaren ($LIM_{Bau}I$) und nicht verwertbaren Substraten ($LIM_{Bau}II$) wie sie im Baubereich vorkommen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Temperatur und relativen Feuchte nach Sedlbauer 2001. Zum Vergleich ist die LIM-Kurve für ein biologisch optimales Substrat (LIM 0) dargestellt.

Im Rahmen der Parameterstudie wird zunächst für das letzte Berechnungsjahr geprüft, ob es zu einer Überschreitung der LIM_{Bau}-Kurven kommt. Ist dies der Fall werden diese Einzelfälle manuell mit WUF I® Bio bewertet.

3.7.3 Feuchte im Bereich der Grenzschicht zum Bestandsmauerwerk

Die Auswertung der Feuchte an der Grenzschicht zwischen Innendämmung und Bestandswand folgt den Vorgaben des WTA Merkblatt 6-5 zur Bewertung von Innendämmsystemen. Bewertet wird hierbei der Durchfeuchtungsgrad und die rel. Porenluftfeuchte in der Grenzschicht zwischen dem Innendämmsystem und der Bestandsmauer. Bei der Bewertung darf zunächst ein Durchfeuchtungsgrad von 30 % bezogen auf das im Baustoff enthaltene Luftvolumen nicht überschritten werden. Wird dieser Grenzwert doch überschritten, gilt als zweite Grenze eine relative Luftfeuchte von 95 %, um das Auftreten von Frostschäden ausschließen zu können. Im Gegensatz zum Außenputz oder entsprechenden Mauerbildnern sind Innenputze nicht zwangsweise frostbeständig. Hinzu kommt, dass höhere Feuchten in diesem Bereich auch zur Fäule von Holzbestandteilen im Untergrund führen könnten. Es werden daher immer beide Bewertungen herangezogen, da eine hohe rel. Porenluftfeuchten unterhalb eines 30 prozentigen Durchfeuchtungsgrades zwar nicht zu Frostproblemen, sehr wohl aber zu einem Risiko von Holzfäule führen kann.

3.7.4 Erhöhung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks

Die Verwendung von Innendämmsystemen führt durch die Verringerung des Wärmestroms und je nach System durch die Verringerung der Rücktrocknung in den Innenraum zu einem verminderten Austrocknungspotentials und damit auch zu einem Anstieg des Feuchtegehalts in

der Bestandswand (Künzel 2004). Nachdem die Mauerbildner bzw. die äußeren Bauteilschichten in aller Regel ohnehin frostbeständig sind, führt ein Überschreiten der Grenzwerte nach WTA Merkblatt 6-5 hier in vielen Fällen nicht zu Problemen. Der Planer muss in einem solchen Fall lediglich prüfen, ob frostbeständige Mauerbildner bzw. Außenputze verwendet wurden. Ist dies nicht der Fall, erfolgt eine orientierende Bewertung der Veränderung des Frostschadensrisikos im Außenbereich der Bestandswand. Dazu wird der Feuchtegehalt in 5 cm Tiefe unter der Außenoberfläche zur Bewertung herangezogen. Diese Position wird gewählt, da in diesem Bereich bei frei bewitterten Bauteilen erfahrungsgemäß meist die höchsten mittleren Wassergehalte auftreten (Künzel 2004). Zwar treten nach Schlagregenereignissen direkt an der Außenoberfläche noch höhere Wassergehalte auf, diese trocknen aber in der Folge auch deutlich schneller zurück, während sich weiter innen die Feuchte über einen längeren Zeitraum hält. Bei verputzten Mauerwerken wird die Putzschicht nicht in die Bewertung mit einbezogen, sondern die Dicke des ausgewerteten Bereichs um die Putzschichtdicke reduziert.

3.7.5 Wachstum von holzzerstörenden Pilzen im Dämmstoff

Die Bewertung der Holzfeuchte in der Holz- und Naturfaserdämmungen erfolgt für die Gefährdungsklasse 0 in der Nutzungsklasse 2 nach DIN EN 1995 [12]. Hierbei darf gemäß DIN 68800-2 [13] ein massebezogener Wassergehalt von 18 M. % nicht länger als drei Monate und ein Wassergehalt von 20 M. % gar nicht überschritten werden. Für die Auswertung wird die maximal auftretende Materialfeuchte im kritischsten Zentimeter des Dämmstoffes ausgewertet. Eine Auswertung der Tauwassermenge ist hier nicht sinnvoll, da die Naturfasern die Feuchte speichern und die Tauwassergrenzwerte ggf. bereits überschritten werden, bevor sich überhaupt flüssiges Wasser zwischen den Fasern bilden kann.

3.7.6 Anstieg des Feuchteniveaus durch das Innendämmsystem

Für alle betrachteten Varianten wird der Gesamtwassergehalt im Vergleich zur Ausgleichsfeuchte bei 80 % Umgebungsluftfeuchte dargestellt. Für den Gesamtwassergehalt selbst gibt es abgesehen von einem kontinuierlichen Anstieg keinen Grenzwert und ein höherer Gesamtwassergehalt bedeutet nicht automatisch ein ungünstigeres Feuchteverhalten einer Variante. Dennoch kann der Gesamtwassergehalt für einen Vergleich zum allgemein als unkritisch angesehenen Referenzwassergehalt bei 80 % herangezogen werden. Niedrigere Wassergehalte sind demnach immer unproblematisch, während höhere Wassergehalte ggf. zu höheren Wärmeverlusten führen. Da die Wärmeleitfähigkeit der meisten Materialien beim Referenzwassergehalt ermittelt wird und damit nur für Feuchtegehalte bis zu diesem Wert gilt, ist der U-Wert solcher Konstruktionen ggf. zu überprüfen. Da diese Größe im Rahmen des Projekts nur orientierend angewandt wird, sind die zugehörigen Heatmaps nur im Anhang im vollständigen Heatmap-Satz des jeweiligen Dämmstoffsystems dargestellt.

3.7.7 Zusammenfassendes Bewertungsschema

Die zuvor beschriebenen Einzelbewertungen werden für jedes Dämmsystem separat in einer Gesamtbewertung zusammengefasst. Diese erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche

Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien wird individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet. Die allgemeine Bewertung der Kriterien wird zur besseren Verdeutlichung am Beispiel der Mineralfaserdämmung exemplarisch vorgestellt. Hierzu werden zunächst in Tab. 3-21 die für die Mineralfaserdämmung notwendigen Einzelkriterien festgelegt und gewichtet.

Tab. 3-21: Exemplarische Gewichtung der Einzelbewertungen für die Gesamtbewertung am Beispiel einer hydrophoben Mineralfaserdämmung.

Nr.	Kriterium	Gewichtung	Ampel
1)	Überschreitung von 95% rel. Feuchte im Mauerwerk nach WTA Merkblatt 6-5	Nur kritisch, wenn schimmel- oder fäulnisanfällige Materialien wie z.B. Gips oder Tapetenreste im Bereich der Grenzschicht vorhanden sind	gelb
2)	Überschreitung eines kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30% für den äußeren Bereich des Mauerwerks in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5	Nur kritisch, wenn das Bestandsmauerwerk nicht frostbeständig ist	gelb
3)	Überschreitung der zulässigen Tauwassermenge von 200 g/m² nach DIN 13788:2012 im inneren Zentimeter der Dämmung zum Bestandsmauerwerk	Schadensrisiko bei abfließendem Tauwasser	rot
4)	Höhe des Gesamtwassergehaltes der Konstruktion	Informativ – niedrige Wassergehalte sind ggf. günstiger	grün

Die Gewichtung und die zugehörige Ampelfarbe werden individuell für jedes Dämmstoffsystem festgelegt. Dabei fließt ein, welche Konsequenzen das nicht Einhalten einzelner Kriterien hat. Wie oben bereits beschrieben kann es bei einer „gelben“ Ampel erforderlich sein, bestimmte zusätzliche Anforderungen zu erfüllen. Beispielsweise muss sichergestellt werden, dass keine feuchteempfindlichen Alt-Putze (Gipsputz) im Bereich der Grenzschicht vorhanden oder die Materialien der Bestandswand frostbeständig sind. Sind diese Punkte gewährleistet, bleibt das jeweilige Ergebnis ohne negative Auswirkungen. Bei einer „roten“ Ampel hingegen handelt es sich um ein Versagenskriterium, welches für diese Parameterkombination immer zu Problemen führt. Das heißt die Konstruktionsvariante kann unter diesen Randbedingungen so nicht ausgeführt werden. Für das Beispiel aus Tab. 3-21 ist die zugehörige Übersichtsbewertung in Abb.3-97 dargestellt.

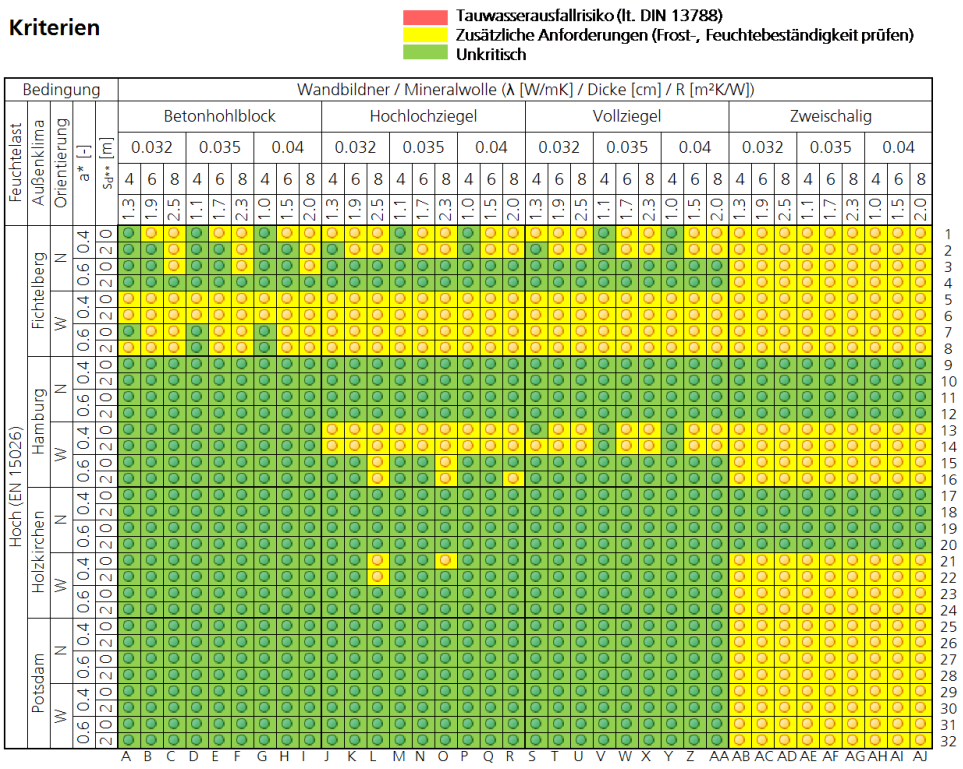


Abb.3-97: Zusammenfassende Bewertung für ein hypothetisches Dämmsystem mit Mineralfaserdämmung (basierend auf den – Heatmaps für die einzelnen Bewertungskriterien).

Wie aus Abb.3-97 ersichtlich wird, gibt es für dieses System einige Fälle, die nur unter gewissen Voraussetzungen eingesetzt werden können. Für die gelb bewerteten Fälle wird dann im konkreten Fall untersucht, welches der Schadenkriterien der Grund für gelbe Kategorisierung ist. Verantwortlich hierfür kann jedes der in Tab. 3-21 genannten Kriterien sein. Entsprechend sind dann in der Folge auch unterschiedliche Empfehlungen für das jeweilige System zu treffen. Ein Versagenskriterium, gekennzeichnet durch eine rote Ampel, tritt in diesem Beispiel in keiner Variante auf. Für jedes Dämmstoffsystem sind in diesem Bericht die drei zusammenfassenden Heatmaps für die drei Innenraumklimata dargestellt. Die zugrundeliegenden Heatmaps für die Einzelkriterien befinden sich jeweils im Anhang für das jeweilige Dämmsystem.

3.8 Ergebnisse und Bewertung der Feuchteverhältnisse

3.8.1 Numerische Qualitätsprüfung der erzielten Berechnungsergebnisse

Zunächst wird die numerische Qualität der durchgeführten Simulationen bewertet. Gerade bei Konstruktionen, die hohe Feuchtegehalte oder Akkumulationen aufweisen, kann die Lösung der Feuchtebilanzgleichungen manchmal schwierig und evtl. auch mit Fehlern behaftet sein, was vor der eigentlichen Bewertung der Ergebnisse überprüft und ausgeschlossen werden muss. Für die hygrothermische Simulation mit WUFI® kann die numerische Qualität der Berechnung über die Anzahl der Konvergenzfehler in Kombination mit den auftretenden Bilanzunterschieden abgeschätzt werden. Dabei gilt, dass die Unterschiede in den Bilanzen das entscheidende Kriterium sind. Die Bilanzen beschreiben die Differenz zwischen dem Anfangs- und Endgesamtwassergehalt (Bilanz 1) und dem Integral der Feuchteströme über die

Bauteiloberflächen und planmäßigen Quellen und Senken (Bilanz 2). Treten hier größere Abweichungen zwischen den beiden Bilanzen auf, ist durch numerische Fehler Feuchte im Bauteil entstanden oder verschwunden, was nicht zulässig wäre. Die numerische Prüfung erfolgt für jede einzelne Simulation und die Auswertung ist exemplarisch für die Varianten mit mineralischer Faserdämmung in Abb.3-98 dargestellt. In diesem Fall treten bei keiner der 3456 Varianten Bilanzunterschiede auf. Auch die Anzahl der Konvergenzfehler wird für alle Berechnungsvarianten in einer Übersicht je Dämmsystem betrachtet. Für die Mineralfaserdämmsysteme ist diese Übersicht exemplarisch in Abb.3-99 dargestellt, wobei auch hier keine Konvergenzfehler auftreten, was einer Zuverlässigkeit der Ergebnisse in allen 3456 Varianten (= 100 %) entspricht.

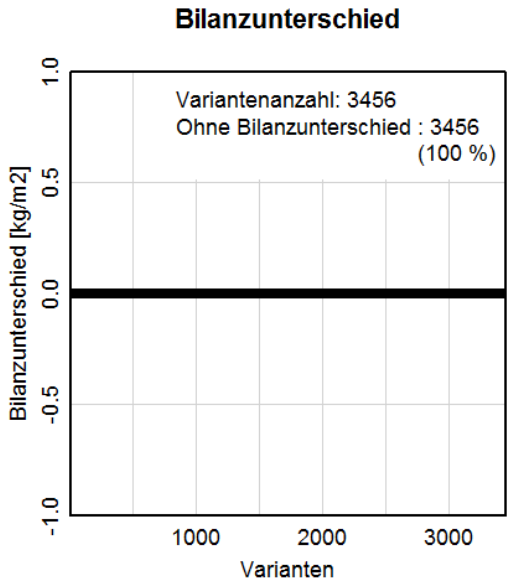


Abb.3-98: Übersichtsplot der Bilanzunterschiede der 3456 Varianten mit hydrophober mineralischer Faserdämmung.

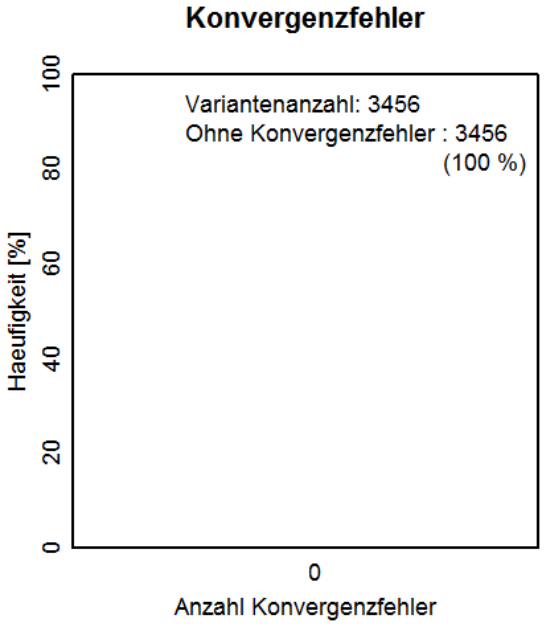


Abb.3-99: Übersichtsgrafik Anzahl an Konvergenzfehlern der 3456 Varianten mit hydrophober mineralischer Faserdämmung.

Weiterhin wird überprüft, ob der Gesamtwassergehaltsverlauf der jeweiligen Variante den eingeschwungenen Zustand erreicht hat und nach wie vielen Jahren dies der Fall ist. Der eingeschwungene Zustand einer Variante wurde hierfür mit einer maximalen jährlichen Änderung < 0,5% festgelegt. Die im WTA Merkblatt 6-2-01/D festgeschriebene Grenze von max. 1 % Änderung gegenüber dem Vorjahresmittelwert führt in der optischen Auswertung mehrjähriger Gesamtwassergehaltsverläufe zu einem optisch immer noch gut erkennbaren Anstieg des Gesamtwassergehaltes. Daher erscheint die vorgeschlagene 1-%-Abweichung als Grenzwert eher ungeeignet. Stattdessen wurde der Grenzwert iterativ weiter abgesenkt - ab etwa 0,5% ist der weitere Anstieg des Gesamtwassergehaltes kaum mehr erkennbar. Exemplarisch ist diese Überprüfung für eine einzelne Variante in Abb.3-100 dargestellt.

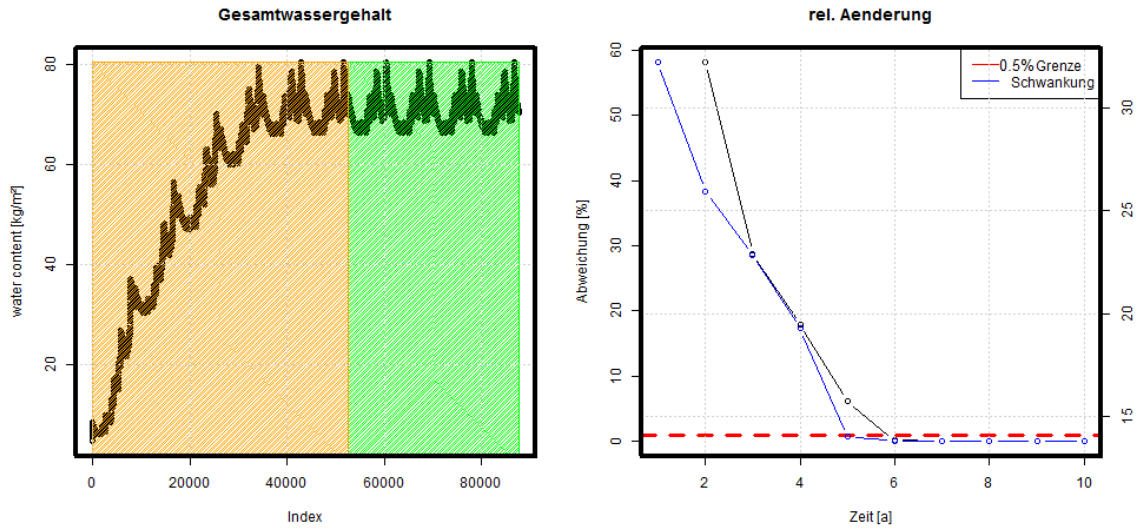


Abb.3-100: Gesamtwassergehaltsverlauf einer exemplarischen Simulation (links) und relative Änderung von einem Jahr auf das nächste (rechts).

In Abb.3-100 ist links der Gesamtwassergehaltsverlauf dargestellt. Im ansteigenden Bereich ist das Diagramm orange, ab dem ersten Jahr, in dem die jährliche Änderung den Grenzwert unterschreitet, ist das Diagramm dann grün eingefärbt. Der eingeschwungene Zustand muss immer erreicht werden. Wäre dies innerhalb der berechneten 25 Jahre nicht der Fall, würde der Berechnungszeitraum entsprechend verlängert. Die Überprüfung erfolgt in kumulierter Darstellung für alle untersuchten Varianten, wie in Abb.3-101 exemplarisch dargestellt.

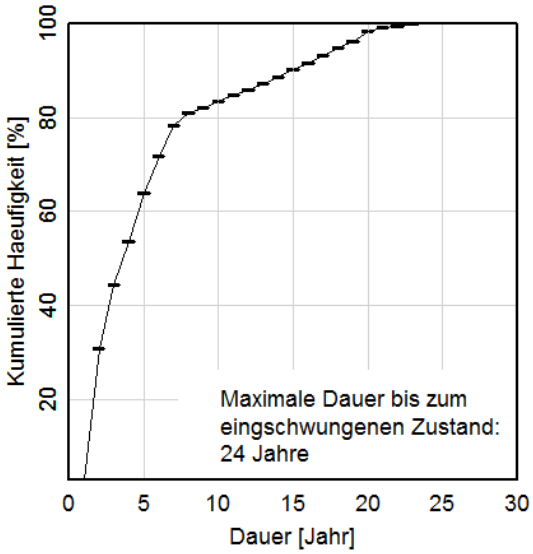


Abb.3-101: Überprüfung auf den eingeschwungenen Zustand, exemplarisch für alle Varianten einer hydrophoben Mineralfaserdämmung.

Wie Abb.3-101 zeigt, musste für diesen exemplarischen Fall eine Berechnungsdauer von 25 Jahren gewählt werden, damit alle Varianten den eingeschwungenen Zustand erreichen. Nach Erreichen des eingeschwungenen Zustands wird in der Regel das jeweils letzte Jahr des Bewertungszeitraums für die weiteren Analysen verwendet. Einzige Ausnahme sind die Putzsysteme, bei denen zusätzlich noch das zweite Berechnungsjahr bewertet wurde.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.6 vorgestellten Randbedingungen ergeben sich je nach Anzahl der Dämmstoffkombinationen zum Teil mehrere hundert Varianten je Dämmstoffsystem. Um diese große Datenmenge möglichst einfach und nachvollziehbar bewerten zu können, müssen für die detaillierte Ergebnisdarstellung einige Vereinfachungen getroffen werden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass keine relevanten Informationen verloren gehen. Um diesen Widerspruch aufzulösen, werden zunächst alle Varianten eines Dämmstoffsystems betrachtet und in einem zweiten Schritt die relevanten Ergebnisse noch einmal detailliert betrachtet. Hierzu wurde ein mehrstufiges Bewertungsverfahren entwickelt, der Ablauf ist nachfolgend in Abb.3-102 skizziert.

Der Reihe nach wird zuerst die numerische Qualität der Ergebnisse sichergestellt. Treten hier Probleme auf werden diese zunächst beseitigt bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen wird. Die Lösung hängt vom Einzelproblem ab: Sind z.B. nicht alle Varianten eingeschwungen wird die Berechnungszeit entsprechend verlängert. Konvergieren Fälle nicht werden die numerischen Gitter entsprechend verändert bzw. verfeinert. Im nächsten Schritt werden automatisiert die für das jeweilige Dämmstoffsystem beschriebenen Bewertungskriterien auf alle Varianten angewandt. Dann werden die jeweils nicht relevanten Bewertungskriterien (z.B. Fäulniskriterien bei unempfindlichem Dämmstoff) ausgeschlossen. Wenn beispielsweise für ein Dämmstoffsystem in keiner Randbedingungskombination Schimmelpilzbedingungen an der Innenoberfläche erzeugt werden, dann ist hierfür im Folgenden auch keine detaillierte Einzelfallbewertung sinnvoll. Die detaillierte Bewertung erfolgt dann nur für die verbleibenden Kriterien, welche in einer Bewertungs-Heatmap übersichtlich zusammengefasst werden.

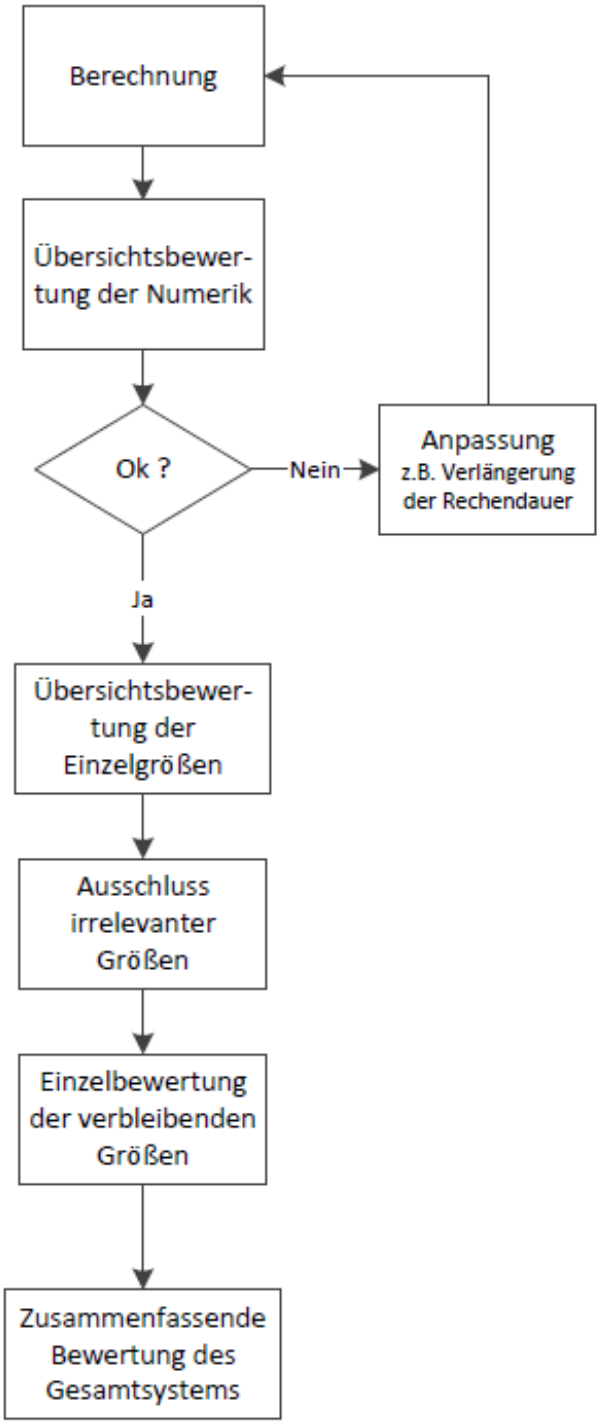


Abb.3-102: Mehrstufiger Bewertungsalgorithmus für die Anwendung im Rahmen der Parameterstudie des Regelquerschnitts.

3.8.2 Holzfaser-Dämmplatten

Wie zuvor beschrieben werden zwei Holzfaserplatten mit und ohne Hydrophobierung der Holzfasern betrachtet.

Für die Holzfaserdämmung werden die folgenden Einzelkriterien bewertet:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des kritischen Grenzwassergehaltes der Holzfaserdämmung nach DIN 68800-2:2012-02
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang. Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die Holzfaserdämmungen in Tab. 3-22 erläutert.

Tab. 3-22: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der Holzfaserdämmungen.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	→ Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	→ Frostbeständigkeit oder Holzfäulerisiko, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	→ Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	Überschreitung der maximalen Holzfeuchte von 18 M.% (20 M.-%) in der Faserdämmung nach DIN 68800-2:2012-02	→ Versagenskriterium Holzfäulerisiko in der Dämmung

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird jeweils die zusammenfassende Heatmap für die hohe Feuchtelast vorgestellt. Die der Bewertung zugrunde liegenden Einzelbewertungen sowie die

Zusammenfassungen für die normale Feuchtelast und das Bemessungs-Raumklima befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 1 bis Abb. A.3. 6.

3.8.2.1 Nicht hydrophobierte Holzfaserdämmung

Die zusammenfassende Bewertung der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmung ist für ein Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast nach EN 15026 nachfolgend in Abb.3-103 dargestellt.

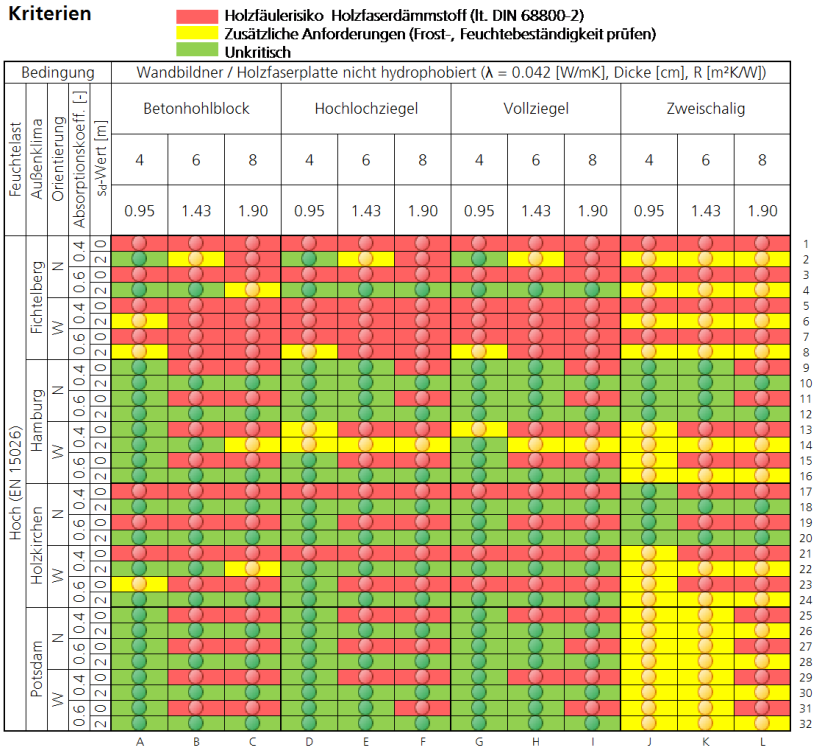


Abb.3-103: Zusammenfassende Bewertung für die nicht hydrophobierte Holzfaserdämmung.

Abb.3-103 zeigt, dass eine nicht hydrophobierte Holzfaserdämmung in 4 cm Stärke meist ohne dampfbremsende Schicht an der Innenoberfläche eingesetzt werden kann. An besonders kalten Standorten sollte zusätzlich eine dampfbremsende Schicht an der Innenseite vorgesehen werden (s_d-Wert 2 m). Nur am Standort Fichtelberg ist aufgrund der Kombination aus sehr niedrigen Temperaturen und starker Schlagregenbelastung bei Westorientierung auch diese Lösung nicht geeignet. An den anderen Standorten kann das Dämmsystem mit einer zusätzlichen dampfbremsenden Schicht mit einem s_d-Wert von 2 m auf der Innenoberfläche auch in den Dicken von 6 und 8 cm eingesetzt werden.

Da Holzfaserdämmungen ohne Dampfbremse vor allem bei Raumnutzungen mit normaler oder geringer Belegung (Schulen, Kindergärten, Behörden o. ä.) eingesetzt werden, sind die kritischen Ergebnisse für die hohe Belegung wenig überraschend. Die in Abb. A.3. 6 dargestellte zusammenfassende Heatmap zeigt, dass bei einem Raumklima mit normaler Belegung alle untersuchten Varianten an den Standorten Potsdam, Hamburg und Holzkirchen uneingeschränkt funktionsfähig sind. Lediglich in Fichtelberg überschreiten einige Varianten mit

größeren Dämmstärken und diffusionsoffener Innenoberfläche sowie entsprechender Schlagregenbelastung die Grenzwerte.

Bei der Bewertung sollte noch beachtet werden, dass der Grenzwert für Holzfaserdämmungen aus DIN 68800-2:2012-02 eher konservativ ist. Da generelle Grenzwerte für die verschiedenen Holzwerkstoffkategorien bisher nicht verfügbar sind, kann jedoch nur auf die Anforderungen nach Norm zurückgegriffen werden. Um den Einsatzbereich der Materialien zu erweitern, wären ggf. weitere Untersuchungen sinnvoll, die sich explizit mit der spezifischen Feuchtebeständigkeit der als Innendämmung eingesetzten Holzfaserdämmstoffe befassen.

3.8.2.2 Hydrophobierte Holzfaserdämmung

Die zusammenfassende Bewertung der zweiten Holzfaserdämmung mit einer zusätzlichen Hydrophobierung ist nachfolgend in Abb.3-104 für ein Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast nach EN 15026 dargestellt.

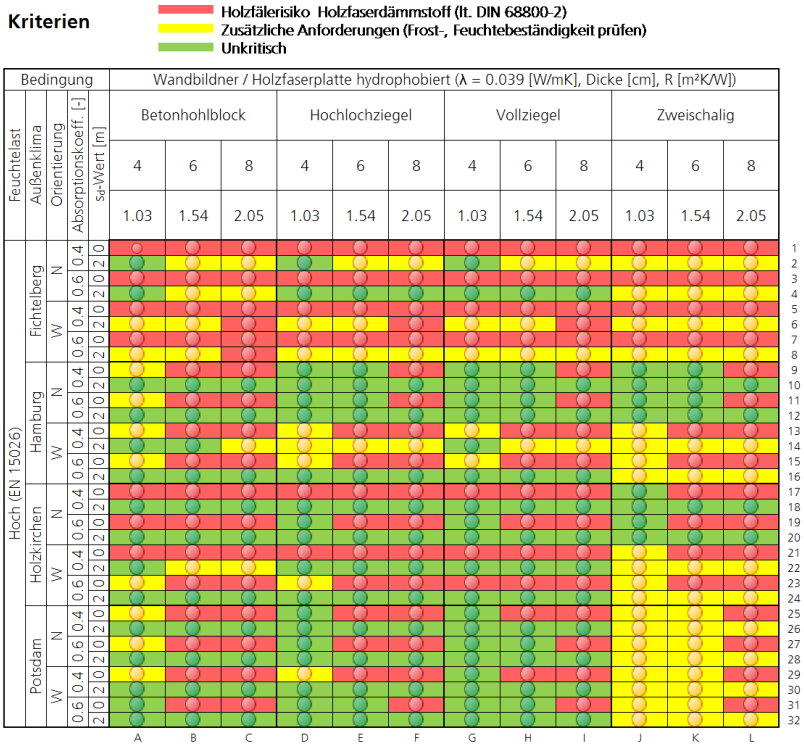


Abb.3-104: Zusammenfassende Bewertung für die hydrophobierte Holzfaserdämmung.

Wie bei der nicht hydrophobierten wird auch bei der hydrophobierten Holzfaserdämmung deutlich, dass viele der Varianten ohne raumseitig dampfbremsende Schicht zu hohe Feuchtegehalte erreichen und somit nicht funktionsfähig sind. Mit diffusionsoffener Innenoberfläche funktioniert die 4 cm dicke hydrophobierte Dämmung nur noch an den milderen Standorten Potsdam und Hamburg, während die nicht hydrophobierte Platte auch noch in Holzkirchen ohne Dampfbremse eingesetzt werden kann.

Bei den Varianten mit dampfbremsender Schicht mit einem s_d-Wert von 2 m auf der Innenoberfläche überschreiten dagegen lediglich zwei Varianten bei Westorientierung in

Fichtelberg die kritischen Grenzwerte. Ansonsten ist mit einer dampfbremsenden Schicht mit s_d-Wert 2 m an der Innenoberfläche und feuchtebeständigen Materialien in den kritischen Bereichen die Funktionsfähigkeit aller anderen Varianten sichergestellt.

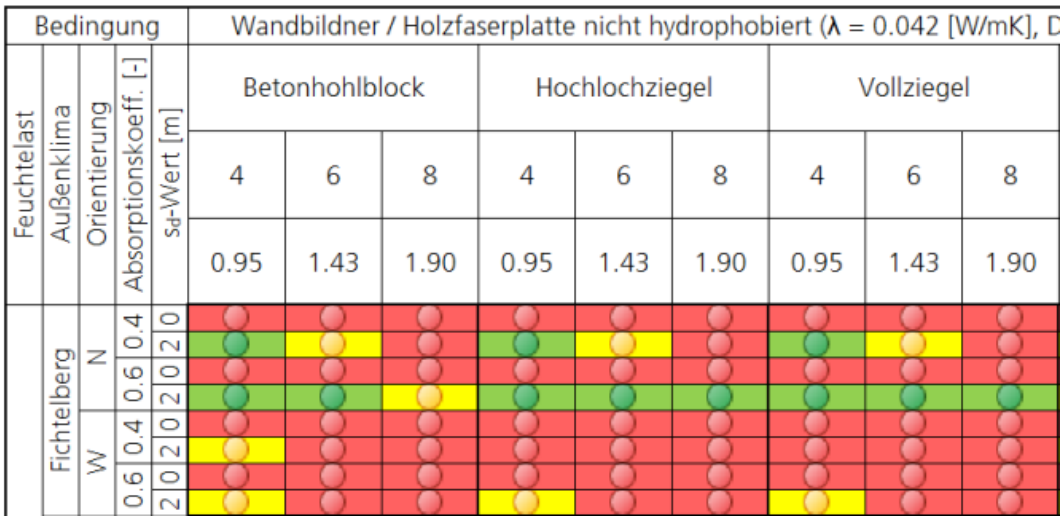
Eine Holzfaserdämmung ohne Dampfbremse auf der Innenseite wird häufig bei Nutzungen mit nur normaler oder geringer Belegung im Innenraum (Schulen, Kindergärten, Behörden o.ä.) eingesetzt. Die Heatmap im Anhang A.3.6 zeigt, dass bei Raumklima mit normaler Belegung im Innenraum an normalen Standorten alle Varianten auch ohne dampfbremsende Schicht funktionieren. Nur in Fichtelberg werden bei 8 cm Dämmstärke in einigen Fällen die Grenzwerte überschritten.

Ansonsten ist, wie bereits erwähnt, jeweils der zu hohe Wassergehalt im Außenbereich der Dämmung für die „rote“ Bewertung maßgeblich. Hierbei wird der Grenzwert von 18 M.-% für Holzwerkstofffeuchte aus DIN 68800-2:2012-02 zu Grunde gelegt. Ob dieser für die eingesetzten Materialien ggf. zu vorsichtig angesetzt ist, sollte bei Bedarf gesondert untersucht werden.

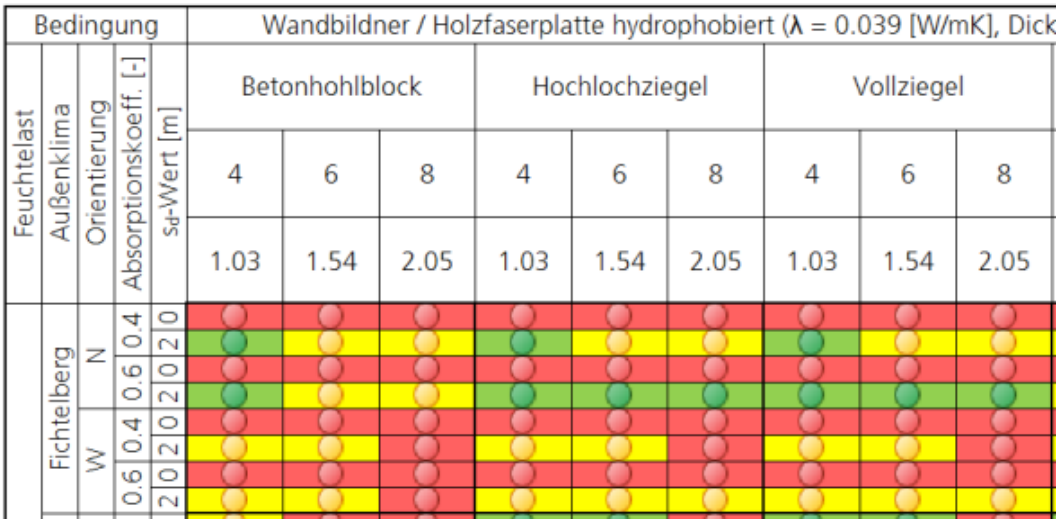
3.8.2.3 Vergleich der beiden Holzfaserdämmstoffe

Bei beiden Dämmstofftypen kommt es bei hoher Feuchtelast im Innenraum aufgrund der fehlenden Dampfbremse und des hohen Feuchtegehalts auf der Kaltseite der Dämmung zu vielen nicht funktionsfähigen Varianten.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Dämmstofftypen führen dabei auch zu einem leicht abweichenden hygrothermischen Verhalten. Während sich die hydrophobe Holzfaserdämmung bei großer Starkregenbelastung günstiger verhält, hat die nicht hydrophobierte Variante Vorteile bei hauptsächlich diffusiv eingetragener Feuchte. Dies wird anhand der beiden Standorte Fichtelberg und Potsdam für die Bereiche A1 bis I8 und A25 bis I32 bei einem Innenraumklima mit hoher Feuchtelast deutlich. Zunächst wird in Abb.3-105 und Abb.3-106 dieser Bereich für den Standort Fichtelberg (niedrigste Temperaturen und höchste Schlagregenbelastung) verglichen.

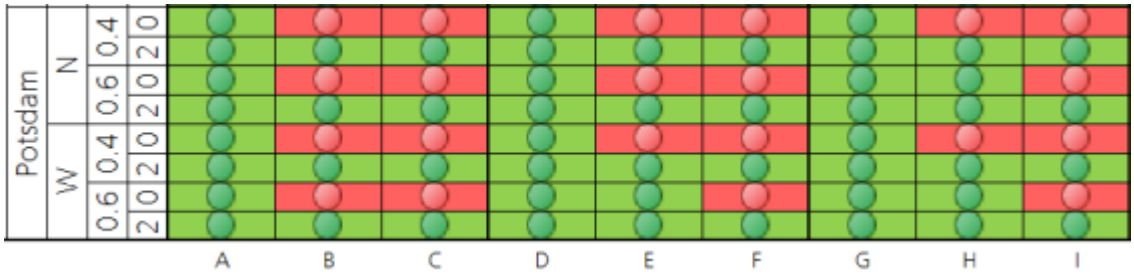


·105: Zusammenfassende Gesamtbewertung der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Fichtelberg, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb.3-103.

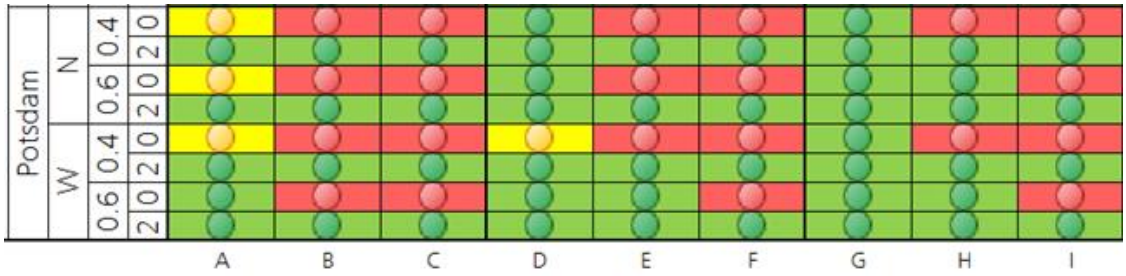


·106: Zusammenfassende Gesamtbewertung der hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Fichtelberg, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb. A.3. 12.

Dabei zeigt sich, dass die hydrophobierte Dämmung bei hoher Schlagregenbelastung tendenziell geringere Feuchtegehalte erreicht. Insgesamt tritt bei 13 Varianten weniger ein Überschreiten der Grenzwerte auf, als bei Verwendung der nicht hydrophobierten Dämmung. Dies ist auf den geringeren Feuchteaustausch des Dämmstoffs mit dem Bestandsuntergrund zurückzuführen. Für die in Abb.3-105 und Abb.3-106 verglichenen Varianten ist jeweils die Schlagregenbelastung der entscheidende Einflussparameter. Je weniger bzw. langsamer Feuchte aus dem Bestandsuntergrund aufgenommen werden kann, desto positiver wirkt sich das in diesen Fällen auf das Systemverhalten aus. Daher verhält sich die hydrophobierte Dämmung hier günstiger. Als nächstes wird der wärmere Standort Potsdam mit deutlich geringerem Schlagregeneinfluss in Abb.3-107 und Abb.3-108 betrachtet.

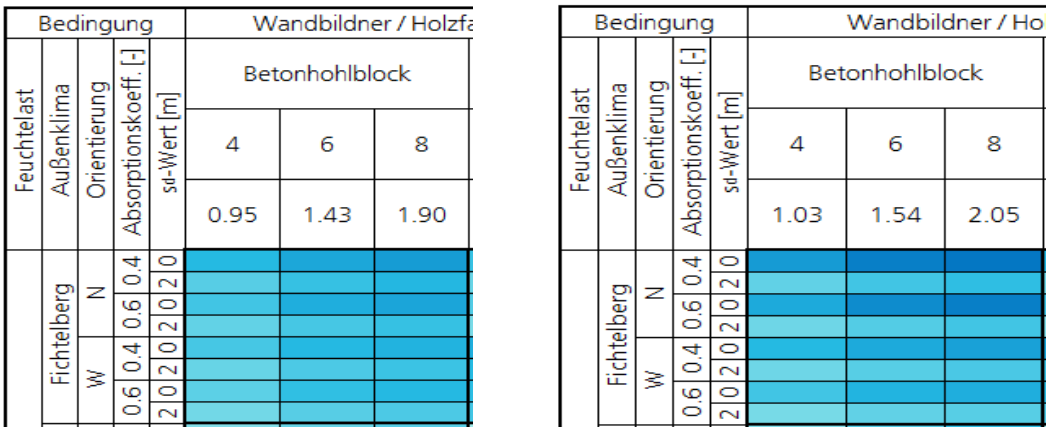


·107: Zusammenfassende Gesamtbewertung der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Potsdam, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb.3-103.



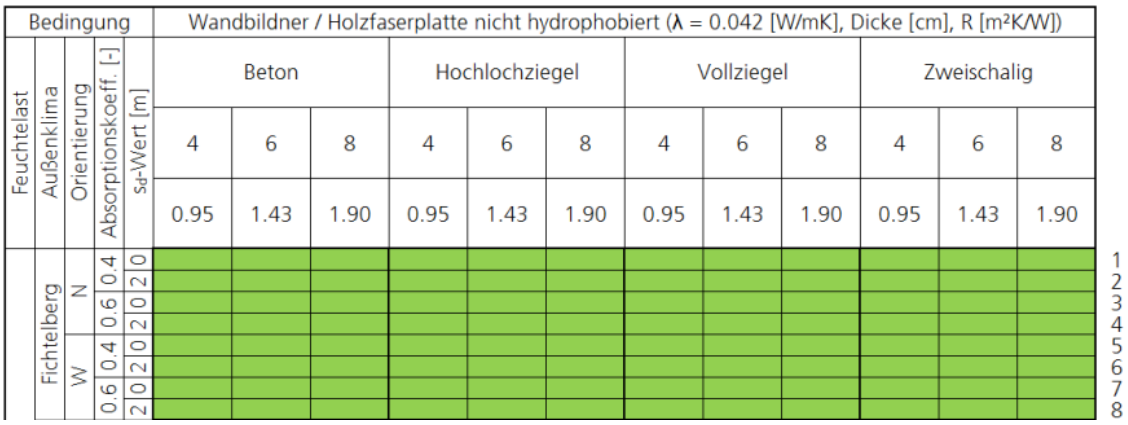
·108: Zusammenfassende Gesamtbewertung der hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Potsdam, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb. A.3. 12.

Bei dem milderen Klima mit geringerer Niederschlagsbelastung verhält sich nun die nicht hydrophobierte Variante geringfügig günstiger. Der Feuchteeintrag kommt hier hauptsächlich durch Diffusion aus dem Innenraum. Daher treten die kritischen Fälle immer dann auf, wenn sich keine zusätzliche dampfbremsende Schicht auf der Innenoberfläche befindet. Die nicht hydrophobierte Variante verhält sich hier aufgrund der etwas höheren Sorptionsfeuchte günstiger. Die Auswirkung dieses Unterschiedes auf den Wassergehalt des Bestandsmauerwerks wird exemplarisch für den Bereich A1 bis C8 in Abb.3-109 betrachtet.

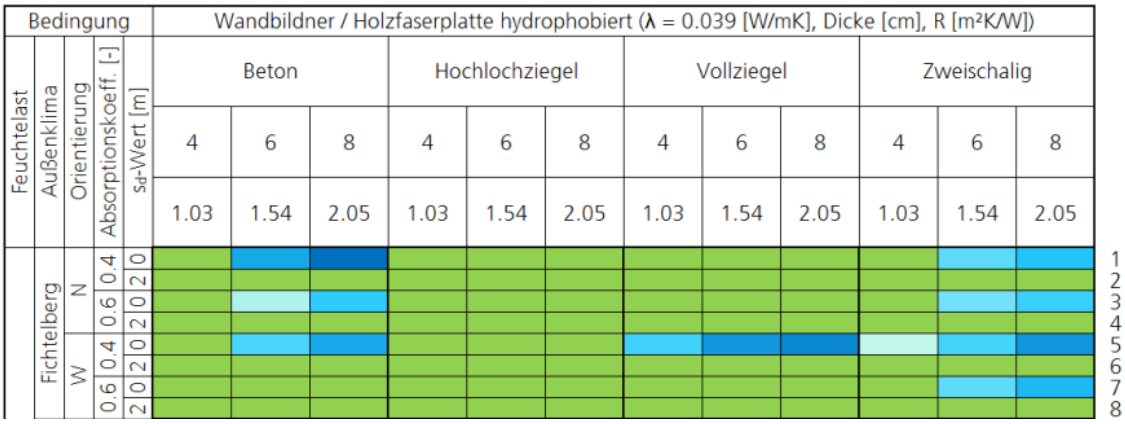


·109: Absolute Änderung des Gesamtwassergehaltes im Mauerwerk. Die nicht hydrophobe Holzfaserdämmung ist auf der linken Seite dargestellt die hydrophobierte Holzfaserdämmung ist auf der rechten Seite. Ausschnitte aus den Abb. A.3. 11 bzw. Abb. A.3. 5.

Der Wassergehalt bei der hydrophobierten Variante steigt stärker an, was in Abb.3-109 durch den dunkleren Blauton ersichtlich wird. Dies ist aus dem reinen Vergleich der kritischen massebezogenen Wassergehalte nicht direkt erkennbar, da bei einem Überschreiten der Grenzwerte die Ampel rot eingefärbt ist. Die genaue Höhe der Überschreitung wird dann nur in Kombination mit dem kritischen Durchfeuchtungsgrad in Abb.3-110 und Abb.3-111 deutlich.



·110: Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für ein Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast, Dargestellt ist der Bereich A1 – L8 als Ausschnitt aus Abb. A.3. 2.



-111: Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für ein Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast, Dargestellt ist der Bereich A1 – L8 als Ausschnitt aus Abb. A.3. 2

Die Gegenüberstellung in Abb.3-110 und Abb.3-111 zeigt, dass sich die höhere Sorptionsfähigkeit der Holzfasern der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmplatte in 19 Fällen positiv auf den in der Grenzschicht auftretenden maximalen Wassergehalt auswirkt. Dämmstoffübergreifend ist der kritischste Standort Fichtelberg gefolgt von Holzkirchen, Hamburg und Potsdam.

3.8.3 Hanffaser Dämmplatte

Die Hanffaserdämmplatte wird vollflächig mit dem bestehenden Untergrund verklebt und anschließend mit einem Innenputz versehen. Der betrachtete Aufbau ist in Kapitel 3.4.2 beschrieben. Für die Hanffaserdämmung werden die folgenden Detailbewertungen durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des kritischen Grenzwassergehaltes der Hanffaserdämmplatte nach DIN 68800-2:2012-02
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die Hanffaserdämmung in Tab. 3-23 erläutert.

Den in Tab. 3-23 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-112 die zusammenfassende Bewertung für die Hanffaserdämmplatte bei hoher Feuchtelast dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 18. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 13 bis Abb. A.3. 17.

Abb.3-112 zeigt, dass die Hanffaserdämmplatte in 4 cm Stärke meist ohne dampfbremsende Schicht an der Innenoberfläche eingesetzt werden kann. An besonders kalten Standorten bzw. stark schlagregenbelasteten Standorten sollte zusätzlich eine dampfbremsende Schicht an der Innenseite vorgesehen werden. Am Standort Fichtelberg ist aufgrund der Kombination aus sehr niedrigen Temperaturen und starker Schlagregenbelastung bei Westorientierung diese Lösung nur bis 5 cm Dicke geeignet – an allen anderen Standorten kann das Dämmsystem mit dampfbremsende Schicht mit s_d-Wert 2 m auf der Innenoberfläche auch in der Dicke von 6 cm eingesetzt werden.

Tab. 3-23: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der Hanffaserdämmplatte.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	Überschreitung der maximalen Feuchte von 18 M.% (20 M.-%) in der Faserdämmung nach DIN 68800-2:2012-02	-> Versagenskriterium Fäule der Dämmung

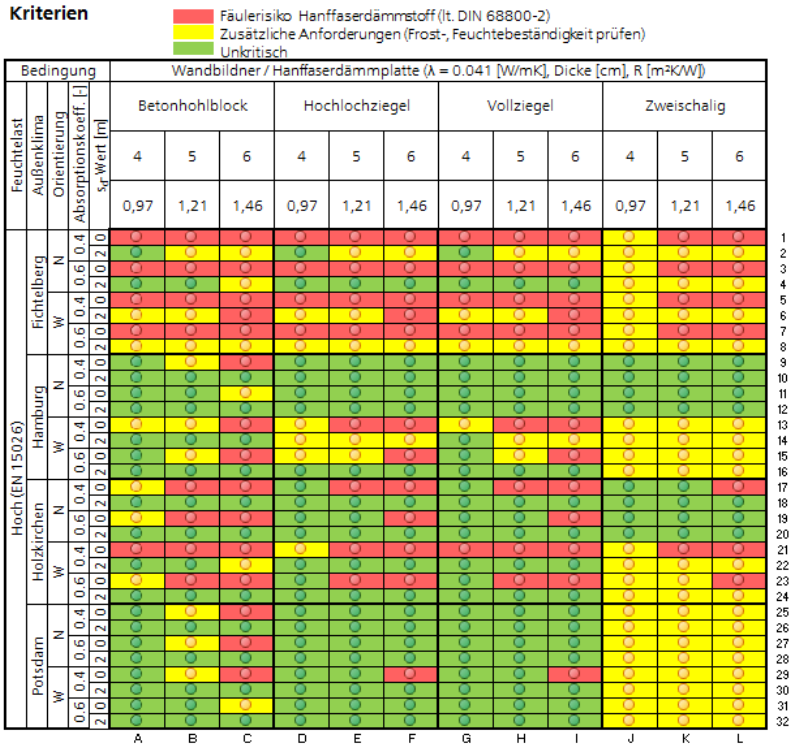


Abb.3-112 : Zusammenfassende Bewertung für die Hanffaserdämmplatte.

Da Naturfaserdämmungen ohne Dampfbremse vor allem für Raumnutzungen mit normaler oder geringer Belegung (Schulen, Kindergärten, Behörden o.ä.) gedacht sind, sind die kritischen Ergebnisse bei hoher Belegung im Innenraum wenig überraschend. Die im Anhang Abb. A.3.

18 dargestellte zusammenfassende Heatmap für ein Raumklima mit normaler Belegung (unten) zeigt, dass die untersuchten Varianten an allen vier Standorten inklusive Fichtelberg auch ohne Dampfbremse bei Verwendung von frostbeständigen Materialien uneingeschränkt funktionsfähig sind.

Zusätzlich ist noch zu beachten, dass der Grenzwert der DIN 68800-2:2012-02 für statisch beanspruchte Holzwerkstoffe gilt. Da generelle Grenzwerte für verschiedene Werkstoffe auf Basis natürlicher Fasern bisher nicht verfügbar sind, kann jedoch nur auf die Anforderungen nach Norm zurückgegriffen werden. Um den Einsatzbereich der Materialien zu erweitern, wären ggf. auch weitere Untersuchungen sinnvoll, die sich explizit mit der spezifischen Feuchtebeständigkeit der als Innendämmung eingesetzten Hanffasern befassen.
Für die hier untersuchte Hanffaserdämmung gibt es derzeit allerdings noch keine belastbaren Grenzwerte. Es sollte daher überprüft werden, ob zur Erweiterung des Einsatzbereichs dieser Materialien nicht eine genauere Untersuchung von deren Feuchteverhalten sinnvoll wäre. Da Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen unter anderen Aspekten wie CO_2-Bedarf oder „grauer“ Energie z.T. deutliche Vorteile gegenüber den konventionellen Dämmstoffen haben, wäre eine Erweiterung von deren Einsatzbereich durchaus wünschenswert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Hanffaserdämmplatte bei normaler Feuchtelast in der Regel ohne dampfbremsende Schichten auf der Innenoberfläche eingesetzt werden kann. Dies belegen die zugehörigen Heatmaps im Anhang. Zu hohe Feuchten ergeben sich in diesen Fällen nur am eher extremen Standort Fichtelberg, der allerdings Bedingungen repräsentiert, die in Deutschland nur für wenige Standorte relevant sind. Die Hanffaserdämmplatte sollte daher vorzugsweise in Gebäuden eingesetzt werden, die eine normale oder geringe Feuchtelast im Innenraum aufweisen. Bei stärkeren Belegungen ist zumindest bei größeren Dämmdicken der Einsatz von moderaten Dampfbremsen oder dampfbremsenden Schichten zu empfehlen.

3.8.4 Kork-Lehm-Dämmplatte

Für die in Kapitel 3.4.3 beschriebene Kork-Lehm-Dämmung werden die folgenden Detailbewertungen durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des kritischen Grenzwassergehaltes der Kork-Lehm-Dämmplatte nach DIN 68800-2:2012-02
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Bei der Bewertung der massebezogenen Materialfeuchte ist zu beachten, dass ein Konglomerat aus zwei unterschiedlichen Materialien (Kork und Lehm) bewertet wird. Der Grenzwert ist nur für den Kork-Anteil relevant.

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die Kork-Lehm-Dämmung in Tab. 3-24 erläutert.

Tab. 3-24: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der Kork-Lehm Dämmung.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	Überschreitung der maximalen Materialfeuchte von 18 M.% (20 M.-%) in der Dämmung nach DIN 68800-2:2012-02	-> Versagenskriterium Fäule der Dämmung (Nur für den Kork von Relevanz)

Den in Tab. 3-24 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-113 die zusammenfassende Bewertung für die Kork-Lehm Dämmplatte bei hoher Feuchtelast dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 24. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 19 bis Abb. A.3. 23.

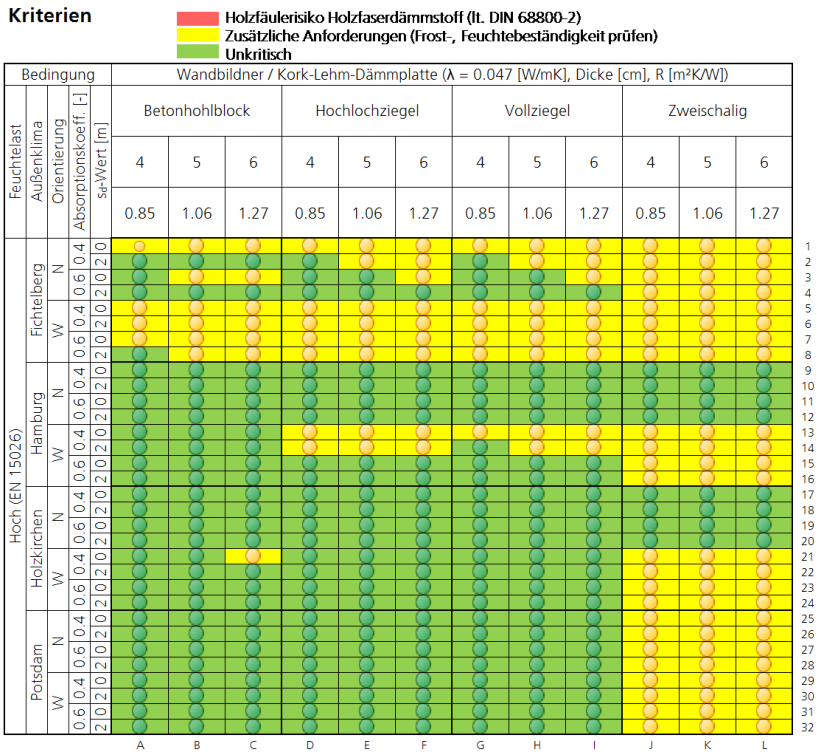


Abb.3-113 : Zusammenfassende Bewertung für die Kork-Lehm Dämmung.

Wie Abb.3-113 zeigt, versagt keine der betrachteten Varianten. Der größte Einflussfaktor ist die Schlagregenbelastung des jeweiligen Klimastandortes. Die kritischen Standorte sind dabei mit abnehmendem Risiko Fichtelberg, Hamburg, Holzkirchen und Potsdam. Das Raumklima hat nur einen vergleichbar geringen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Konstruktion. Die Dämmstoffplatte ist selbst insoweit dampfbremsend und kapillaraktiv, dass sie auch ohne separate dampfbremsende Schicht den Feuchteeintrag aus dem Innenraum auch bei hoher Belegung auf ein unkritisches Maß begrenzt. Dementsprechend ist auch der Einfluss eines zusätzlichen s_d-Wertes auf der Innenoberfläche weniger stark ausgeprägt.

Das Innendämmsystem aus Kork-Lehm Dämmplatten weist infolge des etwas höheren Diffusionswiderstands kombiniert mit dem Flüssigtransport des Lehms insgesamt auch bei hohen Raumluftfeuchten ein recht gutmütiges Verhalten auf. Den größten kritischen Einfluss weist dementsprechend die Schlagregenbelastung auf die Fassade auf. Hier ergeben sich für die Varianten mit einem großen Feuchteeintrag von außen in Fichtelberg und Hamburg zusätzliche Anforderungen an die Frost- und Feuchtebeständigkeit der eingesetzten Materialien. In Holzkirchen und Potsdam bleiben dagegen bis auf eine Ausnahme alle untersuchten einschaligen Varianten im unkritischen Bereich.

Da für die Kork-Lehm-Dämmstoffplatte keine spezifischen Grenzwerte hinsichtlich der Feuchtebeständigkeit bekannt sind, werden wie bei anderen natürlichen Dämmstoffen auch, die Grenzwerte für Holzfäule der DIN 68800-2:2012-02 verwendet – auch wenn dieser in Anbetracht der infolge des Lehms erhöhten Masse nur bedingt aussagekräftig ist. Für die betrachteten Fälle stellt diese Auswertung kein Problem dar, da alle Varianten die

Anforderungen erfüllen. Zwar führt die durch den Lehm erhöhte Masse zu einer günstigeren Bewertung - da Kork im Gegenzug aber vermutlich deutlich unempfindlicher gegen Feuchte ist als Holz und Holzwerkstoffe, wäre es ggf. sinnvoll zu überprüfen, welche Feuchtegrenzwerte für das Material geeignet sind. Ggf. wäre auch ein Einsatz des Materials in deutlich feuchterer Umgebung denkbar. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen weisen bezüglich Aspekten wie CO_2-Bedarf oder dem geringen Bedarf an „grauer“ Energie z.T. deutliche Vorteile gegenüber konventionellen Dämmstoffen auf. Dementsprechend ist ein möglichst breiter Einsatzbereich solcher Materialien wünschenswert.

3.8.5 Aerogel-Hochleistungsdämmputz

Der aerogelhaltige Hochleistungsdämmputz wird direkt auf das jeweilige Bestandsmauerwerk aufgebracht. Die Innenoberfläche bildet dann eine auf den Dämmputz aufgetragene Deckputzschicht. Der betrachtete Aufbau ist in Kapitel 3.4.4 beschrieben. Für den Hochleistungsdämmputz werden die folgenden Detailbewertungen durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für den Aerogel-Hochleistungsdämmputz in Tab. 3-25 erläutert.

Den in Tab. 3-25 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-114 die zusammenfassende Bewertung für den Aerogel-Hochleistungsdämmputz bei hoher Feuchtelast dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 29. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 25 bis Abb. A.3. 28.

Tab. 3-25: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung des aerogelhaltigen Hochleistungsdämmputzes.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	-	-> kein Versagenskriterium vorhanden

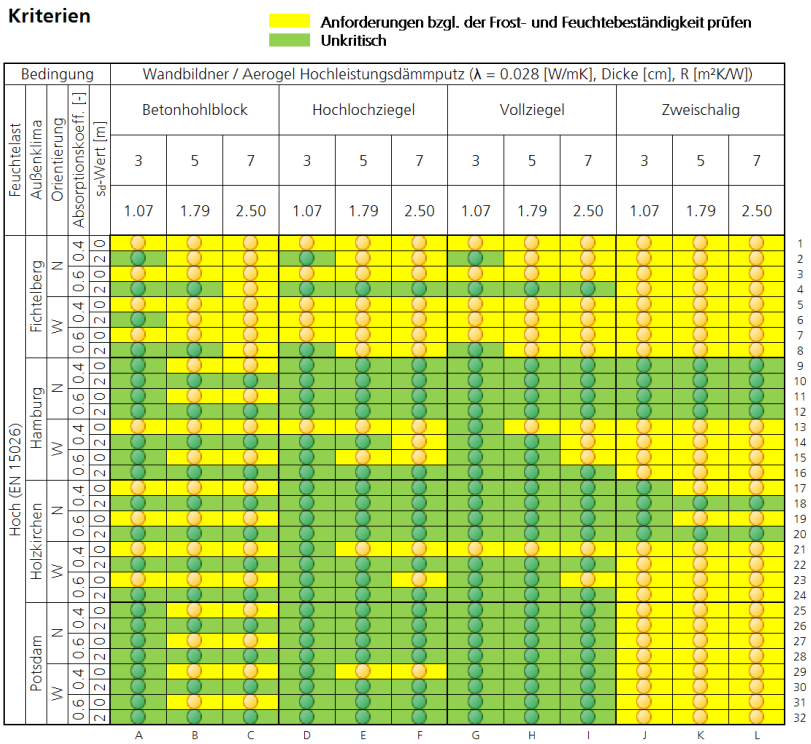


Abb.3-114 : Zusammenfassende Bewertung für den Aerogel Hochleistungsdämmputz.

Da bei Putzsystemen durch die Baufeuchte ebenfalls eine erhebliche Feuchtemenge in die Konstruktion eingebracht wird, wird zusätzlich das zweite Berechnungsjahr betrachtet, das in

den meisten Fällen noch nicht eingeschwungen ist. Das Vorgehen dafür ist identisch zu der Auswertung am Ende des Berechnungszeitraums. Der zugehörige Satz an Heatmaps ist im Anhang in Abb. A.3. 30 aufgeführt. Bei keiner Variante ergeben sich für das zweite Berechnungsjahr (mit Baufeuchte) zusätzliche Anforderungen, die nicht auch im eingeschwungenen Zustand bestehen. Eine besondere Berücksichtigung der durch den Dämmputz eingebrachten Feuchte ist daher nicht erforderlich.

3.8.6 Hochleistungsdämmputz

Auch der konventionelle Hochleistungsdämmputz wird direkt auf das jeweilige Bestandsmauerwerk aufgebracht. Um auch bei den betrachteten großen Schichtstärken die notwendige Festigkeit aufzuweisen folgt als nächstes eine Schicht Armierungsmörtel. Die Innenoberfläche bildet dann eine auf den Armierungsputz aufgetragene Deckputzschicht. Der betrachtete Aufbau ist in Kapitel 3.4.5 beschrieben. Für den Hochleistungsdämmputz werden die folgenden Detailbewertungen durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für den konventionellen Hochleistungsdämmputz in Tab. 3-26 erläutert.

Den in Tab. 3-26 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-115 die zusammenfassende Bewertung für den Hochleistungsdämmputz bei hoher Feuchtelast dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 35. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 31 bis Abb. A.3. 34.

Tab. 3-26: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung des konventionellen Hochleistungsdämmputzes.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	-	-> kein Versagenskriterium vorhanden

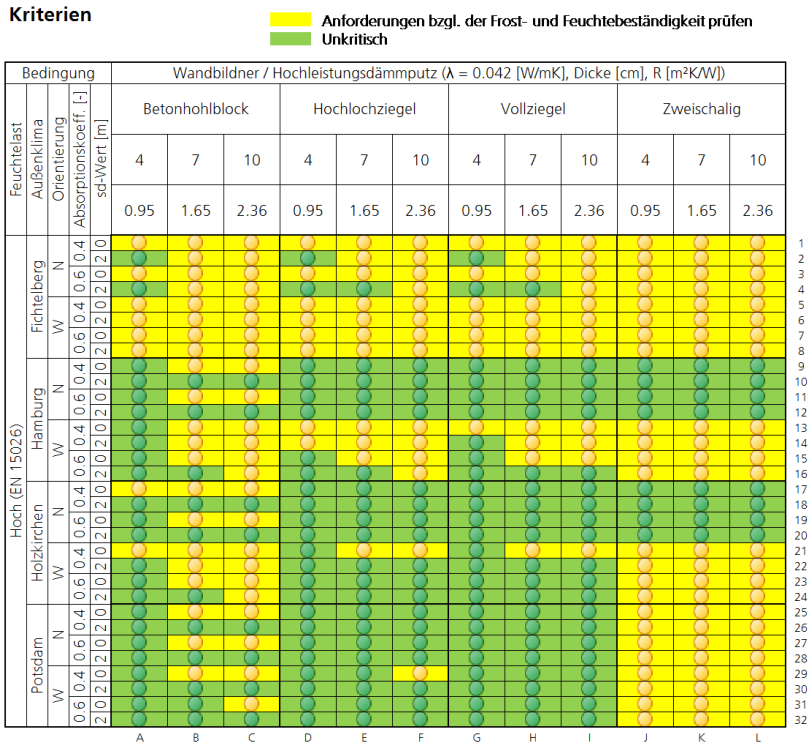


Abb.3-115 : Zusammenfassende Bewertung für den Hochleistungsdämmputz.

Abb.3-115 veranschaulicht, dass selbst bei einer hohen inneren Feuchtelast alle untersuchten Varianten bei Einsatz geeigneter Materialien schadensfrei bleiben. Bei etwa der Hälfte der betrachteten Fälle ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Feuchte- und

Frostbeständigkeit der Materialien im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5 bzw. an der Außenoberfläche. Die gilt vor allem bei einer hohen Schlagregenbelastung wie am Standort Fichtelberg und für die Wetterschale der zweischaligen Konstruktion. Hier ist lediglich sicherzustellen, dass die im Bereich der Wetterschale verwendeten Klinker frostbeständig sind. Das Hochlochziegel- und das Vollziegel-Mauerwerk verhalten sich hingegen sehr ähnlich und sind an den normalen Standorten außer Fichtelberg tendenziell eher unproblematisch.
Die Varianten mit raumseitig dampfbremsender Schicht mit 2 m s_d-Wert weisen ein etwas günstigeres Verhalten auf als die nach innen diffusionsoffenen Varianten. Dies gilt vor allem bei etwas weniger sorptionsfähigen Untergründen wie z.B. dem Betonhohlblock-Mauerwerk, da dieses im Winter nur wenig ankommende Feuchte aufnehmen kann. Das Innendämmsystem erweist sich insgesamt als gutmütiges Dämmsystem. Die Dämmwirkung ist jedoch vor allem bei geringer Schichtdicke eher moderat.

Da bei Putzsystemen durch die Baufeuchte ebenfalls eine erhebliche Feuchtemenge in die Konstruktion eingebracht wird, wird zusätzlich das zweite, in den meisten Fällen noch nicht eingeschwungene Berechnungsjahr zusammenfassend betrachtet. Das Vorgehen dafür ist identisch zu der Auswertung am Ende des Berechnungszeitraums. Der zugehörige Satz an Heatmaps ist im Anhang in Abb. A.3. 36 aufgeführt. Bei keiner Variante ergeben sich für das zweite Berechnungsjahr (Baufeuchte) zusätzliche Anforderungen, die nicht auch im eingeschwungenen Zustand bestehen. Eine besondere Berücksichtigung der durch den Dämmputz eingebrachten Feuchte ist daher nicht erforderlich.

3.8.7 Mineral-Dämmplatte

Die Mineraldämmplatte wird vollflächig mit dem Bestandsuntergrund verklebt. Hierzu werden im Rahmen der Untersuchung ein Dünnbettmörtel und ein Leichtmörtel verwendet. Die Innenoberfläche bildet dann eine auf der Dämmplatte aufgetragene Schicht Leichtmörtel. Der betrachtete Aufbau ist in Kapitel 3.4.6 beschrieben. Für die Mineraldämmplatte werden die folgenden Detailbewertungen durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an (WTA Merkblatt 6-5)
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach EN 15026 (DIN EN 15026:2007-08) direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die Mineraldämmplatte in Tab. 3-27 erläutert.

Tab. 3-27: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung die Mineraldämmplatte.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA 6-5 (WTA Merkblatt 6-5) kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA 6-5 (WTA Merkblatt 6-5) kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA 6-5 (WTA Merkblatt 6-5) kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	-	-> kein Versagenskriterium vorhanden

Den in Tab. 3-27 festgelegten Bewertungskriterien folgend, ist in den nachfolgenden Unterkapiteln jeweils die zusammenfassende Heatmap bei hoher Feuchtelast dargestellt. Es werden wie in Kapitel 3.4.6 beschrieben zwei unterschiedliche Klebemörtel verwendet. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die Detailergebnisse des dampfdichteren und einen geringeren Flüssigtransport aufweisenden Dünnbettmörtels dargestellt, da diese tendenziell kritischer sein dürften. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 37 bis Abb. A.3. 41.

3.8.7.1 Mineral-Dämmplatte mit Dünnbettmörtel als Kleberschicht

Den in Tab. 3-27 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-116 die zusammenfassende Bewertung für die Mineraldämmplatte bei einem Raumklima mit hoher Belegung dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz für die drei verschiedenen Raumklimabedingungen befindet sich im Anhang in Abb. A.3. 43.

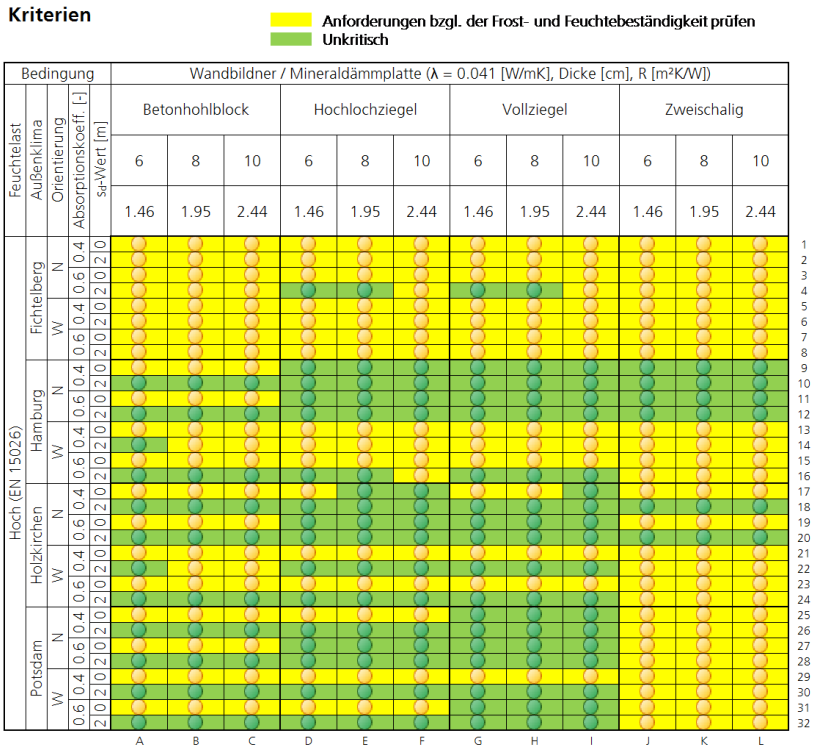


Abb.3-116 : Zusammenfassende Bewertung für die Mineraldämmplatte.

Abb.3-116 belegt, dass selbst bei einer hohen inneren Feuchtelast alle untersuchten Varianten bei Einsatz geeigneter Materialien schadensfrei bleiben. Die zusätzlichen Anforderungen an die Feuchte- und Frostbeständigkeit der hier eingesetzten Materialien ergeben sich vor allem aufgrund der Überschreitung der rel. Feuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Innendämmung und Bestandswand. Diese Anforderungen treten vermehrt bei feuchtem Innenraumklima und Schlagregenbelastung von außen auf. Dies zeigt sich am deutlichsten am Standort Fichtelberg. An den anderen Standorten tritt dies vor allem in den Varianten ohne zusätzliche dampfbremsende Schicht an der Innenoberfläche auf.

3.8.7.2 Mineral-Dämmplatte mit Leichtmörtel als Kleberschicht

Die Bewertung der Variante mit Leichtmörtel erfolgt im Vergleich zur Variante mit Dünnbettmörtel. In Tab. 3-28 ist die Anzahl an Varianten dargestellt, für die in Abhängigkeit des jeweiligen Raumklimas und des verwendeten Mörteltyps in der Grenzschicht zusätzliche Anforderungen bestehen.

Tab. 3-28: Anzahl an Varianten für die zusätzliche Anforderungen bestehen, in Abhängigkeit des Raumklimas und des Mörteltyps im Bereich der Grenzschicht.

Raumklima	EN 15026 mit normaler Feuchtelast	WTA 6-2 :2014	EN 15026 mit hoher Feuchtelast
Leichtmörtel	136	185	229
Dünnbettmörtel	138	184	232

Der Vergleich zeigt, dass die Wahl der unterschiedlichen Mörtel nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Gesamtbewertung des Dämmstoffsystems hat (vgl. Abb. A.3. 42 & Abb. A.3. 43). Der Dünnbettmörtel verhält sich dabei sogar geringfügig kritischer und weist somit keine Vorteile gegenüber dem normalen Leichtmörtel auf.

Aufgrund der deutlich unterschiedlichen w- und μ-Werte ergibt sich für die beiden Mörtel eine unterschiedlich starke feuchtetechnische „Interaktion“ des Dämmstoffsystems mit dem Bestandsmauerwerk. Zur Bewertung erfolgt ein Vergleich des Feuchtegehaltes der verschiedenen Varianten unter Verwendung der jeweiligen Referenzklimata mit dem Referenzwassergehalt der Konstruktion bei beidseitig konstant 80 % rel. Luftfeuchte. Der variantenbezogene Vergleich mit dem Referenzwassergehalt ist in Abb. A.3. 40 und Abb. A.3. 41 für die beiden Mörtel dargestellt. Entsteht bei Verwendung der Referenzklimata ein geringerer Wassergehalt als er sich bei 80 % rel. Luftfeuchte einstellen würde, ist die jeweilige Variante dabei gelb eingefärbt. Die Anzahl der Varianten, die im Vergleich zum Referenzwassergehalt trockener bleiben, ist wiederum nach den verschiedenen Raumklimata gegliedert in Tab. 3-29 aufgelistet.

Tab. 3-29: Anzahl an Varianten mit Feuchtegehalten unter dem Referenzwassergehalt bei 80 % r.F.

Raumklima	EN 15026 mit normaler Feuchtelast	WTA 6-2 :2014	EN 15026 mit hoher Feuchtelast
Leichtmörtel	115	76	58
Dünnbettmörtel	132	90	62

Tab. 3-29 zeigt, dass bei Verwendung des Leichtmörtels insgesamt mehr Varianten Feuchtegehalte unter dem Referenzwassergehalt von 80 % r.F. aufweisen als bei Verwendung des Dünnbettmörtels. Das Verhältnis ist allerdings auch von der Feuchtelast im Innenraum abhängig. Während bei den Raumklimabedingungen nach EN 15026 mit normaler Belegung oder nach WTA 6-2 betrachtet 17 bzw. 14 Varianten trockener bleiben, ist dies bei hoher Feuchtelast nur noch bei 4 Varianten der Fall. Die Systemvariante mit Dünnbettmörtel führt also aufgrund des etwas geringeren Rücktrocknungspotentials der Bestandswand tendenziell zu leicht höheren Wassergehalten als die Variante mit Leichtmörtel.

3.8.8 Organische Aerogel-Dämmplatte

Die organische Aerogel-Dämmplatte wird vollflächig mit dem Untergrund verklebt. Die Innenoberfläche bildet dann ein Armierungsmörtel gefolgt von einem Deckputz. Der konkrete Aufbau ist in Kapitel 3.4.7 beschrieben. Für die organische Aerogel-Dämmplatte werden die folgenden Detailbewertungen durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5

- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die organische Aerogel-Dämmplatte in Tab. 3-30 erläutert.

Tab. 3-30: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der organischen Aerogeld-Dämmplatte.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	-	-> kein Versagenskriterium vorhanden

Den in Tab. 3-30 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-114 die zusammenfassende Bewertung für die organische Aerogel-Dämmplatte bei hoher Feuchtelast dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 48. Die der

Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 44 bis Abb. A.3. 47.

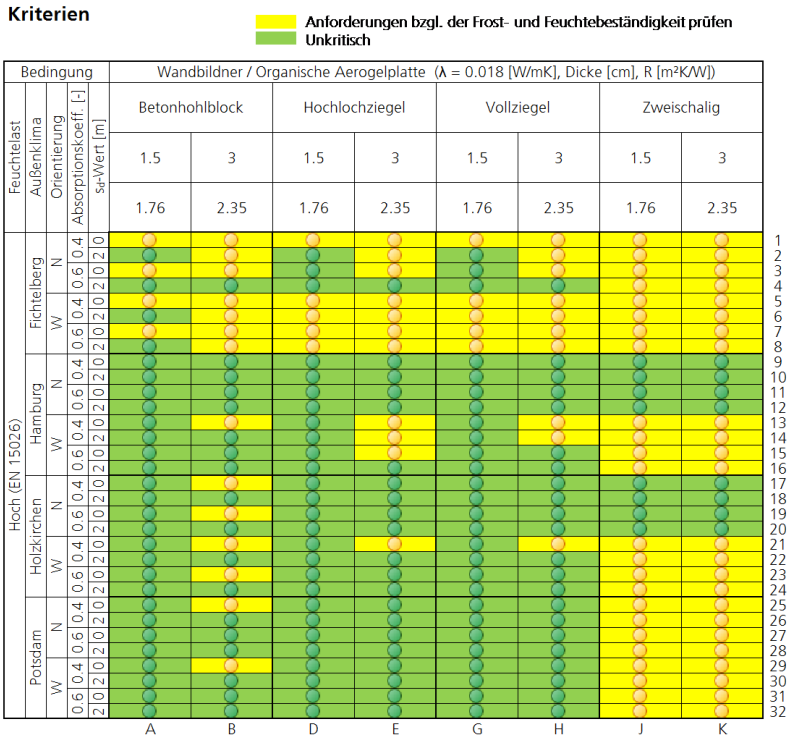


Abb.3-117 : Zusammenfassende Bewertung für die organische Aerogel-Dämmplatte.

Abb.3-117 veranschaulicht, dass selbst bei einer hohen inneren Feuchtelast alle untersuchten Varianten bei Einsatz geeigneter Materialien schadensfrei bleiben. Bei circa 40 % der betrachteten Fälle ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Feuchte- und Frostbeständigkeit der eingesetzten Materialien im Bereich der Grenzschicht zwischen Innendämmung und Bestandswand. Diese treten vor allem bei einer hohen Schlagregenbelastung wie am Standort Fichtelberg oder bei der Wetterschale der zweischaligen Konstruktion auf. Die Varianten mit raumseitig dampfbremsender Schicht mit 2 m s_d-Wert weisen meist ein günstigeres Verhalten auf als die nach innen diffusionsoffenen Varianten.

Insgesamt erweist sich das Innendämmsystem als eher feuchteunempfindlich. Trotz der geringen Dämmstoffstärken ergeben sich aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeiten gute Wärmewiderstände. Aufgrund seiner diffusionsoffenen Eigenschaften ist das Dämmsystem besonders für Einsatzbereiche mit geringer oder normaler Feuchtelast im Raum geeignet. Positiv wirkt sich in diesen Fällen ein gewisser kapillarer Rücktransport aus dem Bereich der Grenzschicht zum Bestandsmauerwerk aus. Da dieser allerdings erst bei höheren Feuchtegehalten einsetzt, ergeben sich daraus zusätzliche Anforderungen an die Feuchte- und Frostbeständigkeit des Bestandsuntergrunds bzw. des Bestandsmauerwerks – kritische Grenzwerte bezüglich einer Schädigung des Dämmsystems selbst treten aber in keinem Fall auf, sodass keine rot markierten Varianten zu verzeichnen sind.

Feuchteempfindliche Materialien wie Holz oder Gipsputz sollten an der Grenzschicht bei Varianten mit erhöhten Anforderungen trotzdem nicht vorhanden sein. Sind die Bestandsmaterialien frost- und feuchtebeständig kann das Dämmsystem bei allen untersuchten Varianten auch mit hoher Feuchtelast im Innenraum eingesetzt werden.

3.8.9 Mineralische Aerogel-Dämmplatte

Die mineralische Aerogel-Dämmplatte wird mit einem Ständerwerk auf der Bestandswand aufgebracht. Den raumseitigen Abschluss bilden eine feuchtevariable Dampfbremse sowie eine Gipskartonplatte, die mit dem Ständerwerk verschraubt wird. Der betrachtete Gesamtaufbau aus Innendämmsystem und Bestandswand ist in Kapitel 3.4.8 beschrieben. Es werden folgende Detailbewertungen für das Dämmstoffsystem durchgeführt:

- Bewertung der maximal auftretenden Tauwassermenge im kritischsten Zentimeter der Dämmung nach DIN EN ISO 13788:2012
- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertungen der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang. Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die organische Aerogel-Dämmplatte in Tab. 3-31 erläutert.

Den in Tab. 3-31 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-118 die zusammenfassende Bewertung für die mineralische Aerogel-Dämmplatte bei hoher Feuchtelast dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 54. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 49 bis Abb. A.3. 53.

Tab. 3-31: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung des Systems mit mineralischer Aerogel-Dämmplatte.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrads von 30 % im Bereich der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandswand	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	Überschreitung der nach DIN 13788:2012 zulässigen maximalen Tauwassermenge von 200 g/m² im kritischen Zentimeter der Dämmung	-> Versagenskriterium Ablaufen von flüssigem Tauwasser

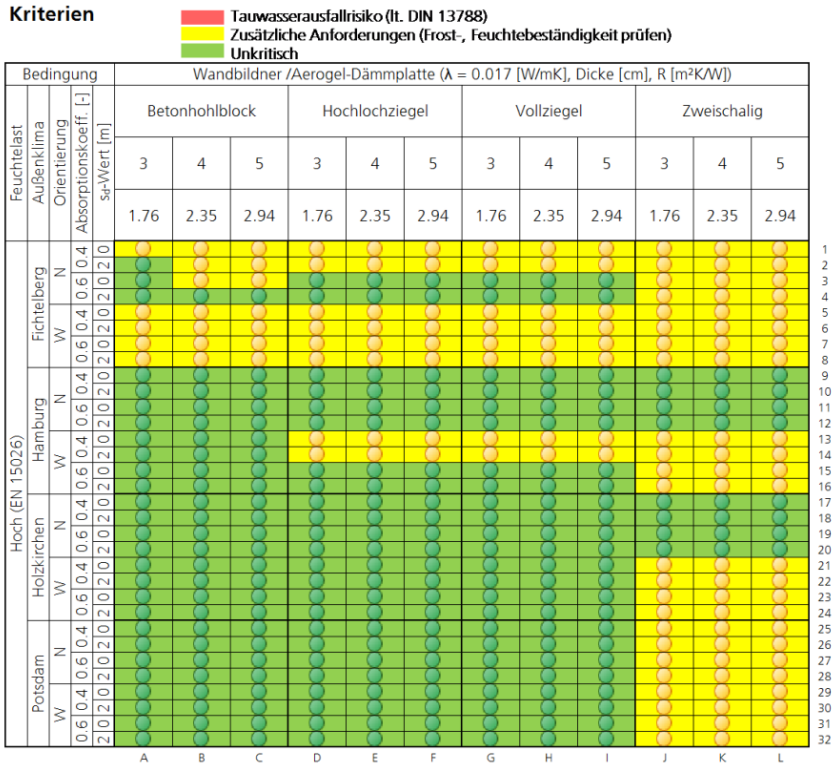


Abb.3-118 : Zusammenfassende Bewertung für die mineralische Aerogel-Dämmplatte.

Abb.3-118 zeigt, dass selbst bei einer hohen inneren Feuchtelast alle untersuchten Varianten bei Einsatz geeigneter Materialien schadensfrei bleiben. Bei ca. einem Viertel der betrachteten Fälle ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Materialien im Bereich der Grenzschicht in Anlehnung an das WTA Merkblatt 6-5. Diese sind vor allem bei einer hohen Schlagregenbelastung wie am Standort Fichtelberg oder für die Wetterschale der zweischaligen Konstruktion zu beachten. Die Varianten mit raumseitig dampfbremsender Schicht mit 2 m s_d-Wert weisen kein günstigeres Verhalten auf als die Varianten ohne zusätzliche dampfbremsende Schicht. Dies ist auf die im Aufbau verwendete feuchtevariable Dampfbremse zurückzuführen, da diese im Winter die Konstruktion vor Feuchteeinträgen schützt und trotzdem eine Trocknung im Sommer erlaubt. Das Aufbringen einer zusätzlichen dampfbremsenden Schicht an der Innenoberfläche z.B. durch einen Fliesenbelag im Bereich der Nassräume hat dabei erwartungsgemäß keine Verbesserung des Systemverhaltens zur Folge.

Insgesamt ist das betrachtete Dämmsystem eher unempfindlich, bei starker Schlagregenbelastung ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Bestandsmaterialien. Der klimatisch kritischste Standort ist Fichtelberg, gefolgt von Hamburg und Holzkirchen. Potsdam ist auf Grund der geringen Schlagregenbelastung und den vergleichsweise moderaten Temperaturen am unkritischsten.

Von den betrachteten Varianten überschreitet keine die kritische Tauwassermenge von 200 g/m² - alle betrachteten Varianten sind damit funktionsfähig. Zusätzliche Anforderungen bestehen bei einem Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast nach EN 15026 bei etwa einem Drittel der betrachteten Varianten. Die meisten dieser Fälle sind auf eine Erhöhung des Wassergehaltes in der Wetterschale des zweischaligen Wandaufbaus zurückzuführen. Hier ist lediglich sicherzustellen, dass die im Bereich der Wetterschale verwendeten Klinker frostbeständig sind.

3.8.10 EPS-Innendämmung als Verbund-Dämmplatte und als verputztes System

Bewertet wird zum einen eine Verbundplatte aus grauem EPS Platte und einer aufkaschierten Gipskartonplatte und zum anderen eine konventionelle weiße Dämmplatte mit Gipsputz. Es werden folgende Detailbewertungen für das Dämmstoffsystem durchgeführt:

- Bewertung der rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des max. Durchfeuchtungsgrades in der Grenzschicht nach WTA Merkblatt 6-5
- Bewertung des Frostschadensrisikos im Außenbereich des Bestandsmauerwerks (in 5 cm Tiefe) in Anlehnung an WTA Merkblatt 6-5
- Gesamtwassergehalt im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80 % rel. Luftfeuchte

Die Bewertung der Einzelkriterien sind in den Einzel-Heatmaps jeweils im Anhang dargestellt. Die zusammenfassende Gesamtbewertung wird für den kritischen Fall eines Innenraumklimas

mit einer hohen inneren Feuchtlast nach DIN EN 15026:2007-08 direkt im Bericht dargestellt und beschrieben. Die Heatmaps für die beiden anderen betrachteten Innenraumklimata befinden sich ebenfalls im Anhang.

Die Gesamtbewertung des Dämmsystems erfolgt mit Hilfe eines Ampel-Schemas. Grün bedeutet dabei generell unkritische Verhältnisse. Bei gelb sind gewisse zusätzliche Anforderungen zu überprüfen, während rot „nicht funktionsfähig“ bedeutet, wobei mindestens ein maßgebliches Kriterium nicht eingehalten wird. Die Einteilung der Kriterien ist individuell für jedes Dämmstoffsystem erarbeitet und für die EPS-Verbundplatte in Tab. 3-32 erläutert.

Tab. 3-32: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der EPS-Innendämmung.

Ampelfarbe	Grenzwert	Kriterium
Grün	Kein Grenzwert überschritten	
Gelb	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung der nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht	-> Frostbeständigkeit oder Holzfäule, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
	Überschreitung des nach WTA Merkblatt 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrad von 30 % in 5 cm Tiefe des Bestandsmauerwerks	-> Frostbeständigkeit, falls empfindliche Materialien in diesem Bereich
Rot	-	-> kein Versagenskriterium vorhanden

3.8.10.1 Verbundplatte mit grauem EPS

Zunächst wird die zusammenfassende Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS bei hoher Feuchtelast vorgestellt. Im nächsten Unterkapitel folgt der Vergleich zur herkömmlichen weißen EPS Dämmung.

Den in Tab. 3-32 festgelegten Bewertungskriterien folgend ist in Abb.3-119 die zusammenfassende Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS dargestellt. Der vollständige Heatmap-Satz befindet sich im Anhang unter Abb. A.3. 59. Die der Bewertung zu Grunde liegenden Einzelbewertungen befinden sich im Anhang von Abb. A.3. 55 bis Abb. A.3. 58.

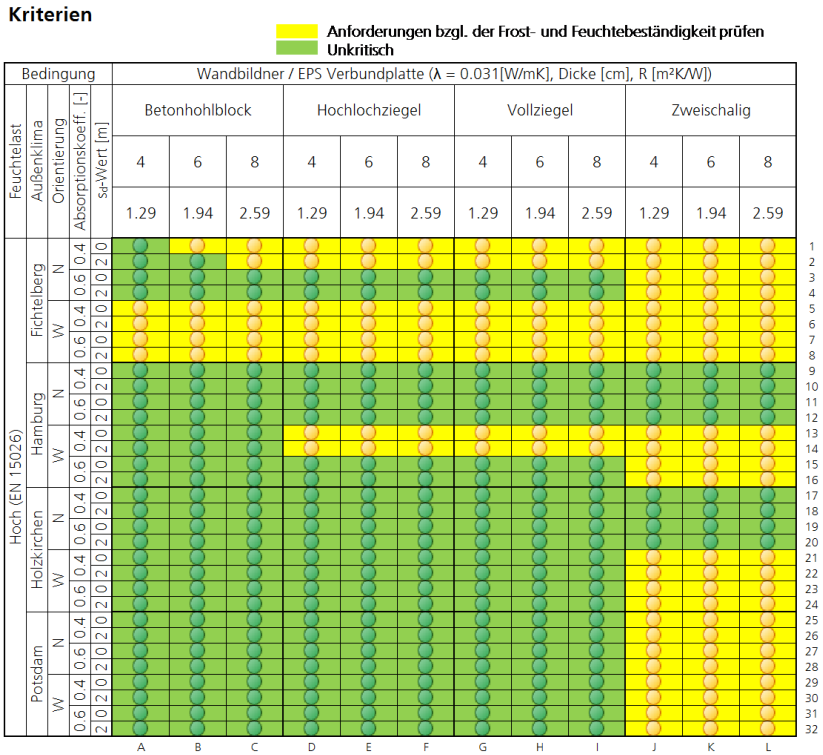
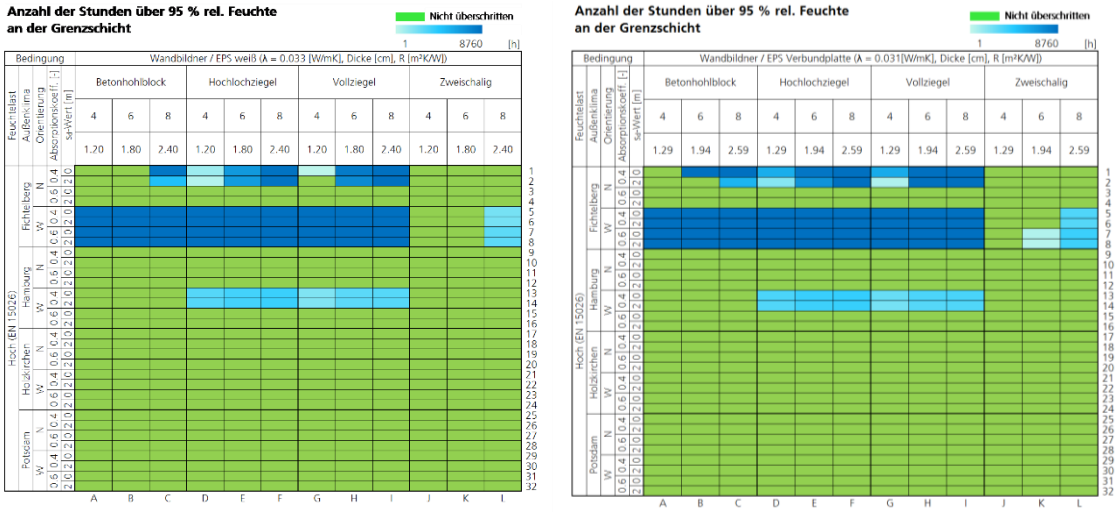


Abb.3-119 : Zusammenfassende Bewertung für die graue EPS-Verbundplatte.

Selbst bei einer hohen inneren Feuchtelast sind alle untersuchten Varianten bei Einsatz geeigneter Materialien schadensfrei. Bei etwas mehr als einem Viertel der betrachteten Fälle bestehen zusätzliche Anforderungen an die Feuchte- und Frostbeständigkeit der eingesetzten Materialien im Bereich der Grenzschicht zwischen Innendämmung und Bestandswand. Die meisten zusätzlichen Anforderungen bestehen bei einer hohen Schlagregenbelastung wie am Standort Fichtelberg oder im Bereich der Wetterschale der zweischaligen Konstruktion. Diese ist auf das geringe Rücktrocknungspotential der Wetterschale zurückzuführen.

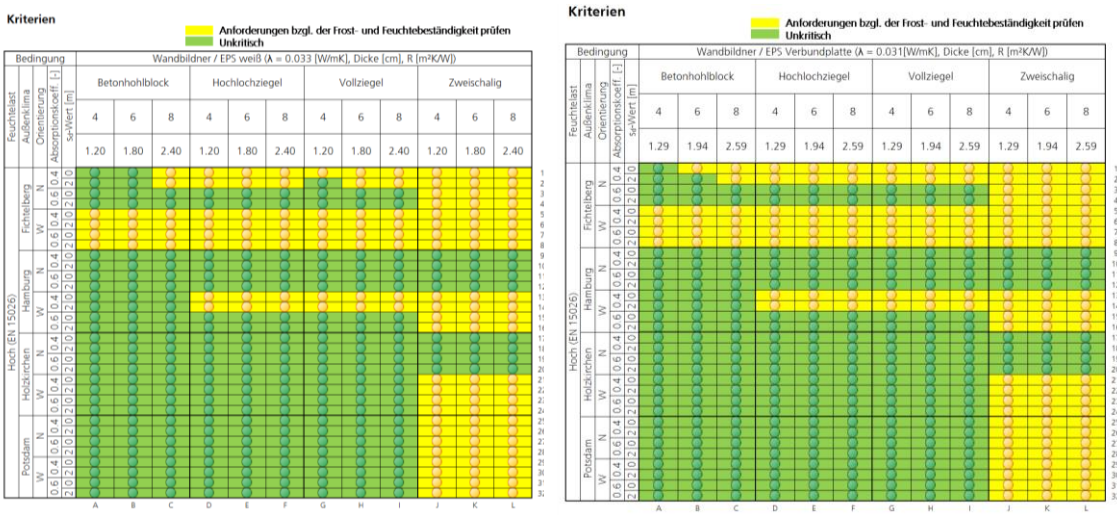
3.8.10.2 Konventionelle weiße EPS-Dämmung mit Innenputz

Abschließend werden die Ergebnisse für die graue EPS-Verbundplatte denen eines herkömmlichen weißen EPS-Dämmstoffs mit Innenputz gegenübergestellt. Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich wiederum auf das Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast. Die Ergebnisse für die entsprechenden anderen Raumklimata befinden sich im Anhang. Da das Kriterium des Durchfeuchtungsgrads im Bereich der Grenzschicht selbst bei hohen Raumluftfeuchten keine problematische Variante aufzeigt, wird der erste Vergleich für das zweite WTA-6-5-Kriterium von maximal 95 % rel. Luftfeuchte in der Grenzschicht durchgeführt. Dieser Vergleich der beiden Dämmstoffplatten ist in Abb.3-120 dargestellt.



·120 :Vergleichende Bewertung der Überschreitungsdauer von 95 % rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht. Auf der linken Seite ist die Bewertung für den weißen EPS-Dämmstoff auf der rechten Seite die Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS dargestellt.

Wie Abb.3-120 zeigt, verhalten sich die beiden EPS-Varianten sehr ähnlich. Die graue EPS-Verbundplatte weist auf Grund des besseren Wärmewiderstands leicht kritischere Bedingungen auf, was sowohl an den drei zusätzlichen blauen Varianten im Bereich G2 sowie K7/8 als auch an der längeren Überschreitungsdauer der einzelnen Varianten erkennbar wird.
Abschließend werden in Abb.3-121 die zusammenfassenden Bewertungen aller Kriterien einander gegenübergestellt.



·121 :Vergleich der zusammengefassten Bewertung der beiden EPS-Varianten. Auf der linken Seite ist die Bewertung für einen weißen EPS-Dämmstoff, auf der rechten Seite die Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS dargestellt.

Die Bewertungen in Abb.3-121 unterscheiden sich lediglich in einer Variante im Bereich G2, was auf eine leicht höhere relative Feuchte in der Grenzschicht zurückzuführen ist.
Insgesamt ist also trotz der bekannten thermischen Vorteile des grauen Materials bei gleichen Dicken der Dämmung keine Differenzierung von Systemen mit grauem oder weißem EPS als

Verbundplatte oder verputztes System erforderlich. Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass bei der Funktionsfähigkeit der Verbundplatte bei gleichen Randbedingungen auch ein herkömmlicher weißer EPS-Dämmstoff funktionieren würde.

3.9 Zusammenfassung und Ausblick

Bei den hygrothermischen Untersuchungen mit Variation der Dämmsysteme, Bestandskonstruktionen und Klimabedingungen wurde der Simulationsablauf in Form einer vollständigen Parametersimulation durchgeführt. Das Vorgehen hat sich sowohl hinsichtlich der Umsetzbarkeit als auch hinsichtlich der Bewertung bewährt – allerdings ist darauf zu achten, dass bereits im Vorfeld umfassende Überlegungen zu Art und Umfang der Auswertung erforderlich sind, weil jede nachträgliche Änderung mit entsprechendem Aufwand und Neuaufsetzen des Simulationsszenarien verbunden ist. Gegenüber dem sonst meist üblichen Worst-Case-Ansatz zur Beschränkung der Simulationen auf das notwendige Mindestmaß bietet diese Parametersimulation den Vorteil, dass alle Kombinationen von Randbedingungen explizit berücksichtigt und bewertet werden. Dadurch entsteht eine zusätzliche Sicherheit, da nichts übersehen oder vorab aufgrund evtl. falscher Annahmen ausgeschlossen werden kann. Dieser Vorteil wird mit deutlich höheren Anforderungen an die Simulations-Hardware und -Dauer erkauft. Die Anforderungen an den Nutzer verschieben sich etwas von der Bauteilbewertung hin zum effizienten Handling großer Datenmengen und setzen entsprechende Erfahrung bei der Vorab-Definition der Bewertungskriterien und Auswertepositionen voraus.

Um für Bemessungszwecke auf der sicheren Seite zu liegen, wurden in der Ergebniszusammenstellung in diesem Bericht die Varianten dargestellt, die die höchste Feuchtelast im Innenraum (nach EN 15026 mit hoher Belegung) aufweisen. Trotz dieser extremen Beanspruchung ist ein großer Teil der im Rahmen des Projektes untersuchten etwa 21.000 Varianten ohne jede Einschränkung umsetzbar. Bei den dampfbremsenden und kapillaraktiven Systemen ist ein weiterer großer Teil hygrothermisch unbedenklich, wenn die Bestandswand an der Grenzschicht und im Außenbereich frostbeständig ist. Dies ist bei den meisten Außenoberflächenmaterialien ohnehin der Fall und kann im Bereich der Innenoberfläche in vielen Fällen z.B. durch das Entfernen von feuchteempfindlichen oder gipshaltigen Materialschichten sichergestellt werden.

Bei den diffusionsoffenen Naturfaser-Dämmsystemen aus Holz und Hanf, die ohne Dampfbremse verbaut werden, wird im Außenbereich der Dämmung der entsprechend DIN 68800 vorsichtig angesetzte Grenzwert von 18 M.-% angewandt. Dieser Feuchtegehalt wird in etwa 30 bis 40 % der Fälle mit hoher Feuchtelast im Raum nicht eingehalten, was zum einen zu Festigkeitsverlusten und bei langfristiger und deutlicher Überschreitung auch zu Fäulnisprozessen führen könnte. Materialspezifische Grenzwerte für Innendämmstoffe aus Naturfaser stehen hier bisher nicht zur Verfügung. Diese sind jedoch essentiell, um die Einsatzbereiche solcher Materialien zu erweitern. Wird bei den Naturfaserdämmungen auf der Raumseite eine moderat dampfbremsende Schicht mit einem s_d-Wert von 2 m ergänzt oder ein weniger feuchtes Raumklima angenommen, bleiben nur noch wenige, nicht funktionierende Fälle übrig. Diese sind auf ein sehr kaltes Außenklima oder eine extreme Schlagregen-

beanspruchung zurückzuführen. Da die diffusionsoffenen Innendämmungen vor allem für den Einsatz in Gebäuden mit normaler bis geringer Feuchtelast gedacht sind, gilt aber auch hier, dass die Systeme für den vorgesehenen Einsatzbereich meist gut funktionieren.

Die Frostbeständigkeit der Mauerbildner wurde im Rahmen der Studie in Anlehnung an die Grenzwerte des WTA-Merkblatts 6-5 bewertet. Diese allgemeingültigen Grenzwerte müssen aufgrund der sehr großen Bandbreite der Frostbeständigkeit der Einzelmaterialien vergleichsweise weit auf der sicheren Seite liegen. Während viele Materialien erst jenseits von 90 % Durchfeuchtungsgrad Frostschäden erfahren, gibt es immer wieder gut belegte Einzelfälle, bei denen Schäden bereits bei Überschreitung von etwa 30 % Durchfeuchtungsgrad aufgetreten sind. Hier ergibt sich im Sinne einer möglichst guten Ausschöpfung der Möglichkeiten bei der thermischen Sanierung noch Forschungsbedarf, um die spezifische Frostbeständigkeit von Mauerbildnern und Materialgruppen genauer eingrenzen zu können.

Über die oben genannten Kriterien hinaus sind im Einzelfall die jeweilige Schlagregenbelastung und die Sicherstellung eines angemessenen Schlagregenschutzes der Fassade zu beachten. Dauerhaft hohe Feuchtegehalte sollten auch bei feuchteunempfindlichen und frostbeständigen Materialien vermieden werden, um mikrobiellen Bewuchs an der Außenoberfläche sowie das Korrosionsrisiko von evtl. vorhandenen Metallen zu begrenzen und nicht zu weit vom eigentlich für den Gleichgewichtsfeuchtegehalt bei 80 % r.F. definierten U-Werten abzuweichen. Auch hier ergibt sich noch weiterer Forschungsbedarf, da bisher weder Richt- noch Grenzwerte für die maximalen Feuchtegehalte unempfindlicher Bestandsmauerwerke zur Verfügung stehen.

Die Untersuchungen in Kapitel 3.3.1.2 haben gezeigt, dass die Definition allgemeiner Abminderungsfaktoren für die Schlagrebenbelastung schwierig bleibt. Die eigenen Messungen haben signifikant geringere Belastungen erst bei Umgebungsbebauungen mit Abständen unter 6 m ergeben. Eine Abminderung, mit der die Machbarkeit einer Innendämmung steht oder fällt, sollte daher mit einer genauen Analyse der Verhältnisse vor Ort und nach Möglichkeit auch mit Messungen abgesichert werden. Die dafür neu entwickelte Regenmessplatte ermöglicht eine adäquate Berücksichtigung der objektspezifischen Schlagregenbelastung und liefert für die Innendämmungsthematik hinreichend genaue Ergebnisse. Für allgemeine Aussagen sind dagegen noch umfangreichere Messungen erforderlich, als sie im Rahmen dieses Projekts durchgeführt werden konnten.

Für die Beurteilung des Schlagregenschutzes hat die Anpassung der Umrechnungs-Funktionen von in situ gemessen w-Werten gezeigt, dass auf Grund der geringen Anzahl an Stichproben die Regressionsgeraden sehr sensitiv auf einzelne Extremwerte wie z.B. die Messwerten des Kalksandsteins (vgl. Tab. 3-10) reagieren. Für die Zukunft wäre es daher wünschenswert die vorhandenen Regressionsgeraden durch eine größere Messdaten-Basis zu validieren oder ggf. weiter anzupassen. Auch ist noch zu untersuchen, ob der lineare Regressionsansatz auf den Bereich mit höheren w-Werten übertragbar ist. Weiterhin wären Vergleichsmessungen zwischen dem WAM-Verfahren und Labormessungen sinnvoll, um auch hier eine geeignete Umrechnungsfunktion definieren und validieren zu können.

3.10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1: In der linken Deutschlandkarte sind alle PLZ Bereiche braun markiert, zu denen in der Datenbank des ZUB (ZUB 2010) überhaupt Einträge vorhanden sind. Auf der rechten Seite sind die Verbreitungsgebiete der gewählten Bauteilaufbauten für Deutschland basierend auf den Verbreitungsdaten aus ZUB 2010, 2009 in grün dargestellt. 113
Abb. 3-2: Bauteilaufbau der Vollziegelwand. 114
Abb. 3-3: Bauteilaufbau des zweischaligen Mauerwerks. 115
Abb. 3-4: Bauteilaufbau des Hochlochziegel-Mauerwerks. 116
Abb. 3-5: Bauteilaufbau des Außenwandaufbaus mit Betonhohlblocksteinen. 117
Abb. 3-6: Wetterturm auf der Freilandversuchsfläche des IBP in Holzkirchen. 121
Abb. 3-7: Verwendeter Schlagregenmesser auf einer Versuchsfassade des Freilandversuchsgeländes in Holzkirchen. 122
Abb. 3-8: Verteilung von 10 Schlagregenmessern auf der westlich orientierten Außenwand in drei unterschiedlichen Höhen. 123
Abb. 3-9: Boxplot der Schlagregenmessungen für die drei unterschiedlichen Höhen von 0,8 m, 1,4 m und 2,1 m. Der Median des jeweiligen Datensatzes ist auf zwei Stellen gerundet im Interquartilsbereich dargestellt. 123
Abb. 3-10: Übersichtsdarstellung der Schlagregenmessstationen auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen. 124
Abb. 3-11: Umgebungsbebauung der Messposition 1. 125
Abb. 3-12: Umgebungsbebauung der Messposition 2. 125
Abb. 3-13: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 1 im Bereich der Gebäudekante des Betonlabors. 126
Abb. 3-14: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 2 im Erdgeschoss im Bereich des Erkers. 126
Abb. 3-15: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 2 in 5m Höhe in Wandmitte. 127
Abb. 3-16: Umgebungsbebauung der Messposition 4. 128
Abb. 3-17: Umgebungsbebauung der Messposition 5. 129
Abb. 3-18: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 4. 129
Abb. 3-19: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 5. 130
Abb. 3-20: Umgebungsbebauung der Messposition 6. 131
Abb. 3-21: Darstellung des Verhältnisses von Schlagregen (R_S) zu Normalregen (R_N) über der zugehörigen gemittelten Windgeschwindigkeit für die Messposition 6. 131
Abb. 3-22: Schematische Darstellung des w-Wertes über der Messzeit bzw. über der Wurzel der Zeit aus Haindl 2017. 133
Abb. 3-23: Prüfanordnung eines Wasseraufnahmeversuchs nach DIN EN ISO 15148 (Haindl 2017). 134

Abb. 3-24: Vergleich der Anforderungen an eine Außenwand bei Verwendung einer Innendämmung nach WTA Merkblatt 6-4 mit den Kriterien der DIN 4108-3:2014. .135
Abb. 3-25: Prüfrohr nach Karsten; links: Wasseraufnahmeversuch an Fassade; rechts: Funktionsschema, eigene Darstellung aus Neumann 2009. 136
Abb. 3-26: Links ist das Prüfrohr nach Pleyers dargestellt; daneben das Funktionsschema mit der schematischen Wasserausbreitung aus (Haindl 2017). 137
Abb. 3-27: Prüfplatte nach Franke; links: Wasseraufnahmeversuch an einem Mauerwerk; rechts: Funktionsschema, aus Haindl 2017. 137
Abb. 3-28: Herstellerfoto des derzeitigen Vertriebsmodells WAM 100 B aus hf sensor GmbH 2016. Die Nummern bezeichnen die einzelnen Funktionselemente (1: Pumpe, 2: Saugrohr, 3: Befestigungswinkel, 4: Messkammer, 5: Wasserdüse). 139
Abb. 3-29: Vergleichsmessung mit unterschiedlicher Befüllhöhe aus Haindl 2017. 141
Abb. 3-30: Wasseraufnahme verschiedener Oberflächen mit zunehmender Höhe der Wassersäule (4,3 cm, 8,5 cm,13 cm) aus Haindl 2017 141
Abb. 3-31: Die verputzte Prüffläche, mit den jeweils betrachteten Messpunkten. 142
Abb. 3-32: Verputzte Außenoberfläche für die Vergleichsmessung (Haindl 2016, 2017). 145
Abb. 3-33: Vergleich der an den ersten 8 Messpunkten aufgenommenen Wassermengen derselben verputzten Oberfläche an zwei Messtagen. 145
Abb. 3-34: Veranschaulichung des Unterschieds zwischen der Skalierung in cm Wassersäule und in ml (Haindl 2016). 146
Abb. 3-35: Abgesunkene Wassersäule im Karsten'schen Prüfröhrchen durch die Kittausdehnung verschieden dicker Kitt – Streifen (Haindl 2017). 146
Abb. 3-36: Abgesunkene Wassersäule der Prüfplatte nach Franke durch die Kittausdehnung (Haindl 2017). 147
Abb. 3-37: Programmoberfläche des Auswerteprogramms nach Niemeyer aus Haindl 2017. .149
Abb. 3-38: Kapillare Wasseraufnahme, dargestellt in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit aus Haindl 2017. 150
Abb. 3-39: Vergleich der in situ Messergebnisse bei Verwendung des Karsten Röhrchens mit den zugehörigen im Labor bestimmten Werten. Das Konfidenzband (dunkelgrau/rot) bezieht sich auf das Konfidenzintervall zur zweifachen Standardabweichung (σ) der Mittelwerte. 152
Abb. 3-40: Vergleich der in situ Messergebnisse bei Verwendung des Karsten Röhrchens mit den zugehörigen im Labor bestimmten Werten. Das Konfidenzband bezieht sich auf das Konfidenzintervall zur zweifachen Standardabweichung (σ) der Mittelwerte. 153
Abb. 3-41: Vergleich der in situ Messergebnisse bei Verwendung der Franke Platte mit den zugehörigen im Labor bestimmten Werten. Das Konfidenzband bezieht sich auf das Konfidenzintervall zur zweifachen Standardabweichung (σ) der Mittelwerte. 155
Abb. 3-42: Auswahlschema für In-situ-Messgeräte in Abhängigkeit der zu untersuchenden Fragestellung aus Haindl 2017. 157
Abb. 3-43: Massive Bestandswand mit Holzfaser-Dämmplatten. 159
Abb. 3-44 : Massive Bestandswand mit Hanffaser-Dämmplatte. 160
Abb. 3-45 : Exemplarische Probekörper der Kork-Lehm-Dämmung. 161
Abb. 3-46 : Massive Bestandswand mit Kork-Lehm-Dämmplatte. 161
Abb. 3-47: Massive Bestandswand mit dem Aerogel–Hochleistungs-Dämmputz. 162
Abb. 3-48: Massive Bestandswand mit Hochleistungs-Dämmputz. 163

Abb. 3-49: Massive Bestandswand mit Mineral-Dämmplatte. 164
Abb. 3-50: Massive Bestandswand mit organischer Aerogel-Dämmplatte....165
Abb. 3-51: Massive Bestandswand mit mineralischer Aerogel-Dämmplatte. 166
Abb.3-52: Massive Bestandswand mit EPS-Dämmung und Innenputz bzw. EPS-Verbund-Dämmplatte mit Gipskarton. 167
Abb. 3-53: Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP in Valley. 168
Abb. 3-54: Solarimeter der Wetterstation am Fraunhofer IBP. 169
Abb. 3-55: Westseite des Versuchsgebäudes mit Wandelementen. 169
Abb. 3-56: Schematische Darstellung des Wandelements. 170
Abb. 3-57: Aufbau des Wandelements. 170
Abb. 3-58: Verbundplatte EPS grau mit aufgebrachtem Kleber. 171
Abb. 3-59: Mineralwolle mit aufkaschiertem Vlies als Innendämmung. 171
Abb. 3-60: Eingefüllter Aerogel-Hochleistungsdämmputz. 172
Abb. 3-61: Muster des Armierungsputzes mit eingelegtem Gewebe. 172
Abb. 3-62: Aufbringen des Leichtputzes auf der Mineraldämmplatte. 173
Abb. 3-63: Schematischer Aufbau der vier Wandelemente. 174
Abb. 3-64: Lage der Messsensoren (rot) im Wandquerschnitt. 175
Abb. 3-65: Ein Wandelement wird mit dem Stapler entnommen. 175
Abb. 3-66: Temperaturverläufe zwischen Mauerwerk und Innendämmung (oben) und der 176
Abb. 3-67: Verlauf der Oberflächentemperatur (oben) und der Außenlufttemperatur (unten) von Januar 2016 bis März 2018. 177
Abb. 3-68: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit der Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton. 177
Abb. 3-69: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton. 178
Abb. 3-70: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit der Verbundplatte EPS grau mit Gipskarton. 179
Abb. 3-71: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit Mineralwolle. 180
Abb. 3-72: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Mineralwolle. 180
Abb. 3-73: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit Mineralwolle. 181
Abb. 3-74: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz. 181
Abb. 3-75: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz. 182
Abb. 3-76: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz. 183
Abb. 3-77: Gemessener Feuchteverlauf für das Wandelement mit Mineraldämmplatte. 183
Abb. 3-78: Gemessener Holzfeuchteverlauf für das Wandelement mit Mineraldämmplatte. 184
Abb. 3-79: Gewichtsverlauf (oben) und Schlagregenbelastung (unten) für das Wandelement mit Mineraldämmplatte. 185
Abb. 3-80: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe Winterperiode 2016/2017. 186
Abb. 3-81: Gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe Winterperiode 2017/2018. 186
Abb. 3-82: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit EPS grau und Gipskartonplatte. 187

Abb. 3-83: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit Mineralwolle und Dampfbremse. 189
Abb. 3-84: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit Aerogel Hochleistungsdämmputz. 190
Abb. 3-85: Vergleich der gemessenen mit berechneten Ergebnissen für das Wandelement mit Mineraldämmplatte. 191
Abb. 3-86: Monatliche Schlagregenbelastungen an den vier Klimastandorten für eine ungeschützte westlich orientierte Lage. 193
Abb. 3-87: Kumulierte Schlagregenmenge für eine ungeschützte westlich orientierte Lage an den vier betrachteten Standorten. 193
Abb. 3-88: Richtungsbezogene Schlagregenmenge auf eine vertikale Oberfläche an den vier betrachteten Standorten. 194
Abb. 3-89: Vergleich der Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur der vier betrachteten Standorte. 194
Abb. 3-90: Vergleich der Monatsmittelwerte der rel. Luftfeuchten der vier betrachteten Standorte. Dargestellt sind die jeweiligen Monatsmittelwerte, dazwischen wurde linear interpoliert. 195
Abb. 3-91: Ableitung der Raumluftfeuchte von der Außenlufttemperatur. 196
Abb. 3-92: Transferkurve der Raumlufttemperatur von der Umgebungstemperatur 196
Abb.3-93: Exemplarischer Verlauf der Oberflächentemperatur an -gedämmten Prüfkörpern mit unterschiedlicher Farbgebung der Außenoberfläche aus Künzel et al. 2006. 197
Abb.3-94: Exemplarischer Aufbau der Heatmap des Mineralwolle-Dämmsystems für das Innenraumklima nach EN 15026 mit normaler Feuchtelast. In den Spalten werden die Ergebnisse der Dämmstoffkombinationen (versch. Wärmeleitfähigkeit und Dicke) mit den verschiedenen Bestandswänden, dargestellt. Die Zeilen stehen für die jeweilige Randbedingungskombination aus Standort, Orientierung, Farbgebung außen und sd-Wert an der Innenoberfläche. Innerhalb dieser Matrix wird die Bewertung des Ergebnisses farblich in der zugehörigen Zelle dargestellt. 199
Abb.3-95: Exemplarische Heat Map für die Anzahl an Überschreitungsstunden des für Frostschäden kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30% im Außenbereich des Mauerwerks. Die betrachtete Bewertungsgröße ist jeweils links oben angegeben (1), die Skalierung rechts oben (2) und Wertebereich oder Bewertung der Variante in der Tab. (3) hinterlegt. 199
Abb.3-96: Minimale Keim- und Wachstumsbedingungen für Schimmelsporen auf biologisch verwertbaren ($LIM_{Bau}I$) und nicht verwertbaren Substraten ($LIM_{Bau}II$) wie sie im Baubereich vorkommen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Temperatur und relativen Feuchte nach Sedlbauer 2001. Zum Vergleich ist die LIM-Kurve für ein biologisch optimales Substrat (LIM 0) dargestellt. 201
Abb.3-97: Zusammenfassende Bewertung für ein hypothetisches Dämmsystem mit Mineralfaserdämmung (basierend auf den – Heatmaps für die einzelnen Bewertungskriterien). 204
Abb.3-98: Übersichtsplot der Bilanzunterschiede der 3456 Varianten mit hydrophober mineralischer Faserdämmung. 205
Abb.3-99: Übersichtsgrafik Anzahl an Konvergenzfehlern der 3456 Varianten mit hydrophober mineralischer Faserdämmung. 205

Abb.3-100: Gesamtwassergehaltsverlauf einer exemplarischen Simulation (links) und relative Änderung von einem Jahr auf das nächste (rechts).....206
Abb.3-101: Überprüfung auf den eingeschwungenen Zustand, exemplarisch für alle Varianten einer hydrophoben Mineralfaserdämmung.....207
Abb.3-102: Mehrstufiger Bewertungsalgorithmus für die Anwendung im Rahmen der Parameterstudie des Regelquerschnitts.....208
Abb.3-103: Zusammenfassende Bewertung für die nicht hydrophobierte Holzfaserdämmung. 210
Abb.3-104: Zusammenfassende Bewertung für die hydrophobierte Holzfaserdämmung. 211
Abb.3-105: Zusammenfassende Gesamtbewertung der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Fichtelberg, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb.3-103. 213
Abb.3-106: Zusammenfassende Gesamtbewertung der hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Fichtelberg, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb. A.3. 12. 213
Abb.3-107: Zusammenfassende Gesamtbewertung der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Potsdam, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb.3-103. 213
Abb.3-108: Zusammenfassende Gesamtbewertung der hydrophobierten Holzfaserdämmung am Standort Potsdam, bei einer hohen Feuchtelast im Innenraum. Ausschnitt aus Abb. A.3. 12. 214
Abb.3-109: Absolute Änderung des Gesamtwassergehaltes im Mauerwerk. Die nicht hydrophobe Holzfaserdämmung ist auf der linken Seite dargestellt die hydrophobierte Holzfaserdämmung ist auf der rechten Seite. Ausschnitte aus den Abb. A.3. 11 bzw. Abb. A.3. 5. 214
Abb.3-110: Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für ein Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast, Dargestellt ist der Bereich A1 – L8 als Ausschnitt aus Abb. A.3. 2. 215
Abb.3-111: Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für ein Raumklima mit einer hohen inneren Feuchtelast, Dargestellt ist der Bereich A1 – L8 als Ausschnitt aus Abb. A.3. 2 215
Abb.3-112 : Zusammenfassende Bewertung für die Hanffaserdämmplatte. 217
Abb.3-113 : Zusammenfassende Bewertung für die Kork-Lehm Dämmung. 220
Abb.3-114 : Zusammenfassende Bewertung für den Aerogel Hochleistungsdämmputz. 222
Abb.3-115 : Zusammenfassende Bewertung für den Hochleistungsdämmputz. 224
Abb.3-116 : Zusammenfassende Bewertung für die Mineraldämmplatte. 227
Abb.3-117 : Zusammenfassende Bewertung für die organische Aerogel-Dämmplatte. 230
Abb.3-118 : Zusammenfassende Bewertung für die mineralische Aerogel-Dämmplatte. 232
Abb.3-119 : Zusammenfassende Bewertung für die graue EPS-Verbundplatte. 235
Abb.3-120 :Vergleichende Bewertung der Überschreitungsdauer von 95 % rel. Feuchte im Bereich der Grenzschicht. Auf der linken Seite ist die Bewertung für den weißen EPS-Dämmstoff auf der rechten Seite die Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS dargestellt. 236

Abb.3-121 :Vergleich der zusammengefassten Bewertung der beiden EPS-Varianten. Auf der linken Seite ist die Bewertung für einen weißen EPS-Dämmstoff, auf der rechten Seite die Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS dargestellt. 236

3.11 Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1: Bauteilschichten der Konstruktion Vollziegelmauerwerk. 114
Tab. 3-2: Bauteilschichten der Konstruktion "zweischaliges Mauerwerk". 115
Tab. 3-3: Bauteilschichten der Konstruktion "Hochlochziegel Mauerwerks". 116
Tab. 3-4: Bauteilschichten der Konstruktion "Betonhohlblock-Mauerwerk“. 117
Tab. 3-5: Gegenüberstellung ausgewählter Prüfnormen zur Bestimmung des w-Werts aus Haindl 2016. 133
Tab. 3-6: Klassifizierung von Baustoffen (Zürcher und Frank 2010). 135
Tab. 3-7: Vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Messgeräte und Wassersäulen bzgl. der äquivalenten Windgeschwindigkeit. 140
Tab. 3-8: Wasseraufnahme der verputzten Prüffläche bei Verwendung des Prüfrohrs nach Karsten an zehn Messtagen (Haindl 2017). 143
Tab. 3-9: Vergleich der theoretischen mit der tatsächlichen Prüffläche der drei In-situ-Messgeräte. 144
Tab. 3-10: Mittlere w–Werte der in situ Messungen und der Labormessung nach DIN EN ISO 15148:2002 aus Haindl 2017. 151
Tab. 3-11: Aufbau der Holzfaser-Innendämmsysteme 160
Tab. 3-12: Aufbau des Hanffaser- Dämmplatte 160
Tab. 3-13: Aufbau der Kork-Lehm-Dämmung. 162
Tab. 3-14: Aufbau des Aerogel-Hochleistungs-Dämmputzes. 163
Tab. 3-15: Aufbau des Hochleistungs-Dämmputz. 163
Tab. 3-16: Bauteilaufbau des Innendämmsystems mit mineralischer Dämmplatte. 165
Tab. 3-17: Bauteilaufbau des Innendämmsystems mit organischer Aerogel-Dämmplatte. 166
Tab. 3-18: Bauteilaufbau bei Verwendung der mineralischen Aerogel-Dämmplatte 167
Tab. 3-19: Bauteilaufbau der beiden EPS-Innendämmsysteme 168
Tab. 3-20: Untersuchte Innendämmungen. 171
Tab. 3-21: Exemplarische Gewichtung der Einzelbewertungen für die Gesamtbewertung am Beispiel einer hydrophoben Mineralfaserdämmung. 203
Tab. 3-22: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der Holzfaserdämmungen. 209
Tab. 3-23: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der Hanffaserdämmplatte. 217
Tab. 3-24: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der Kork-Lehm Dämmung. 219
Tab. 3-25: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung des aerogelhaltigen Hochleistungsdämmputzes. 222
Tab. 3-26: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung des konventionellen Hochleistungsdämmputzes. 224
Tab. 3-27: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung die Mineraldämmplatte. 226
Tab. 3-28: Anzahl an Varianten für die zusätzliche Anforderungen bestehen, in Abhängigkeit des Raumklimas und des Mörteltyps im Bereich der Grenzschicht. 227

Tab. 3-29: Anzahl an Varianten mit Feuchtegehalten unter dem Referenzwassergehalt bei 80 % r.F. 228
Tab. 3-30: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der organischen Aerogeld-Dämmplatte. 229
Tab. 3-31: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung des Systems mit mineralischer Aerogel-Dämmplatte. 232
Tab. 3-32: Ampelschema der zusammenfassenden Bewertung der EPS-Innendämmung. 234

3.12 Literaturverzeichnis

Abuku, Masaru; Janssen, Hans; Roels, Staf (2009): Impact of wind-driven rain on historic brick wall buildings in a moderately cold and humid climate. Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption. In: *Energy and Buildings* (1), S. 101–110. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.07.011.

Arndt, Horst (2014): Wärmeschutz und Feuchte in der Praxis. Funktionssicher und Energie sparend bauen. 3. Aufl. s.l.: Beuth Verlag GmbH (Beuth Praxis). Online verfügbar unter http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2033055.

DIN EN ISO 15148:2002, 2002: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.

Blocken, B.; Carmeliet, J. (2015): Impact, runoff and drying of wind-driven rain on a window glass surface: Numerical modelling based on experimental validation. In: *Building and Environment*, S. 170–180. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.006.

Blocken, B.; Dezsö, G.; van Beeck, J.; Carmeliet, J. (2009): The mutual influence of two buildings on their wind-driven rain exposure and comments on the obstruction factor. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (5-6), S. 180–196. DOI: 10.1016/j.jweia.2009.06.003.

Blocken, Bert; Carmeliet, Jan (2006): On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings. In: *Building and Environment* (12), S. 1798–1810. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.022.

Blocken, Bert; Roels, Staf; Carmeliet, Jan (2007): A combined CFD–HAM approach for wind-driven rain on building facades. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (7), S. 585–607. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.12.001.

DENA (2004): Energetische Bewertung von Bestandsgebäuden, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Deutscher Wetterdienst (2017): Windkarte der mittleren Windgeschwindigkeit. 10m über Grund. DWD. Online verfügbar unter http://www.dwd.de/DE/leistungen/windkarten/deutschland_und_bundeslaender.html#buehneTop, zuletzt geprüft am 03.07.2017.

Fahrmeir, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard (2004): Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Fünfte, verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch), zuletzt geprüft am 03.08.2017.

Franke, Lutz (2015): Die WA-Prüfplatte nach Franke zur Beurteilung der Wasseraufnahme von Fassaden. Hg. v. TuTech Innovation GmbH. TU Hamburg-Harburg. Online verfügbar unter www.tuhh.de/t3resources/bp/PDF/WAPruefplatteneu.pdf, zuletzt geprüft am 30.04.2015.

Fülle, Claudia (2011): Klimarandbedingungen in der hygrothermischen Bauteilsimulation. Ein Beitrag zur Modellierung von kurzwelliger und langwelliger Strahlung sowie Schlagregen. Dissertation:, zuletzt geprüft am 05.01.2017.

Haindl, Kerstin (2016): Das Karsten'sche Prüfröhrchen im Vergleich mit weiteren zerstörungsfreien in-situ-Messmethoden zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme. Projektarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes. HS Augsburg, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

Haindl, Kerstin (2017): Untersuchung verschiedener In-situ-Testverfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit von Baukonstruktionen. Masterarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes. HS Augsburg, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

hf sensor GmbH (2016): Bedienungsanleitung WAM 100 B Wasseraufnahmemessgerät für Fassaden. Hg. v. hf sensor GmbH. Online verfügbar unter http://www.hf-sensor.de/download/wam100b.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

Holm, Andreas; Künzel, Hartwig (1999): Trocknung von Mauerwerk mit Wärmedämmverbundsystemen und Einfluß auf den Wärmedurchgang, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

DIN 68800-2:2012-02: Holzschutz Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, zuletzt geprüft am 06.11.2015.

DIN 68800-2:2012-02: Holzschutz Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, zuletzt geprüft am 06.11.2015.

Karagiozis, A.; Hadjisophocleous, G.; Cao, S.: Wind-driven rain distributions on two buildings. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vols 67–68.

Karsten, Rudolf (1997): Bauchemie. Handbuch für Studium und Praxis. Heidelberg: C. F. Müller Verlag.

Knöfel, D.; Henkel, S.; Aschhoff, P. (1995): Ist die Messung der Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfrohr zuverlässig? In: *Bautenschutz + Bausanierung* (6), S. 36–41.

Kubilay, A.; Derome, D.; Blocken, B.; Carmeliet, J. (2014): Numerical simulations of wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings and validation by field measurements. In: *Building and Environment*, S. 283–295. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.07.008.

Kubilay, A.; Derome, D.; Blocken, B.; Carmeliet, J. (2015): Wind-driven rain on two parallel wide buildings: Field measurements and CFD simulations. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, S. 11–28. DOI: 10.1016/j.jweia.2015.07.006.

Künzel, H. M. (1994a): Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Fassaden nach Hydrophobierungsmaßnahmen. In: *IBP Mitteilung 21,* zuletzt geprüft am 05.01.2017.

Künzel, Hartwig (1994b): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Künzel, Hartwig (2004): Frostschäden an Putz und Mauerwerk Ursachen und Vermeidung: 12. Wiener Sanierungstage, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

Künzel, Hartwig; Künzel, Helmut; Sedlbauer, Klaus (2006): Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm - Verbundsystemen. In: *Bauphysik,* zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Loua, Toussaint (1873): Atlas statistique de al population de Paris: Harvard University.

Marzen, Miriam; Iserloh, Thomas; Lima, João L.M.P. de; Ries, Johannes B. (2016): The effect of rain, wind-driven rain and wind on particle transport under controlled laboratory conditions. In: *CATENA*, S. 47–55. DOI: 10.1016/j.catena.2016.05.018.

Neumann, Hans-Hermann (2009): Praxis-Handbuch Wärmedämm-Verbundsysteme. Baustoffkunde, Verarbeitung, Schäden, Sanierung. Köln: Rudolf Müller Verlag.

Niemeyer Rolf (2013): Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme mit dem Prüfröhrchen nach Karsten. Online verfügbar unter http://www.denkmalpflege.niedersachsen.de/portal//search.php?_psmand=45&q=pr%C3%BCfr%C3%B6hrchen+karsten, zuletzt geprüft am 19.08.2015.

Pleyers, Gerd (1999): Zerstörungsfreie Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme von Baustoffen - das Prüfröhrchen nach Pleyers. In: F. H. Wittmann und Andreas Gerdes (Hg.): Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen V. Esslingen, November/Dezember 1999. Freiburg: Aedificatio Publishers, S. 472–483.

R Core Team (2016): R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.

Schnapauff, Volker; Dahmen, Günter; Oswald, Rainer (1993): Schlagregenschutz von Außenwänden Zur Bewährung und Beurteilung wasseraufnehmender Fassadenkonstruktionen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Sedlbauer, Klaus (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, zuletzt geprüft am 22.08.2017.

Stelzmann, M. (2015): In-situ-Messgerät für die zerstörungsfreie Messung der kapillaren Wasseraufnahme von Fassaden. Online verfügbar unter https://www.baufachinformation.de/in-situ-messgeraet-fuer-die-zerstoerungsfreie-messung-der-kapillaren-wasseraufnahme-von-fassaden/ul/13129012182, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

Twelmeier, Heiko (2012): In-situ-Messung der Wasseraufnahme an Mauerwerksfassaden. In: G. Geburtig und J. (Hrsg.) Gänßmantel (Hg.): Messtechnik - Der Weisheit letzter Schluss? Tagungsband zum 4. Sachverständigentag der WTA-D im November 2011 in Weimar. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

DIN EN 15026:2007-08, 2007: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

DIN 13788:2012, 2012: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen-Raumseitige Oberflächentemperaturen zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren, zuletzt geprüft am 24.08.2017.

DIN 4108-3:2014-11: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

DIN 4108-3:2014, 2014: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für die Planung und Ausführung, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Wehle, Barbara; Gariglio, Federico (2015): Wasseraufnahmekoeffizienten historischer Aussenputze. Wasseraufnahmekoeffizienten der Aussenputze historischer Gebäude der Bauperiode 1850-1920, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

Wendler, E.; Snethlage, R. (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten - Anwendung und Interpretation der Meßwerte. In: *Bautenschutz + Bausanierung,* zuletzt geprüft am 31.07.2017.

WTA Merkblatt 6-4: WTA-Merkblatt: Innendämmung nach WTA I Planungsleitfaden, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

WTA Merkblatt 6-5: WTA-Merkblatt: Innendämmung nach WTA II Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

WTA Merkblatt 6-2-01/D, 2014: WTA-Merkblatt: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.

Zirkelbach, Daniel; Schöner, Tobias (2016): Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation. Klimamodelle, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

ZUB (2009): Katalog regionaltypischer Materialien im Gebäudebestand mit Bezug auf die Baualtersklassen und Ableitung typischer Bauteilaufbauten, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

ZUB (2010): Fortschreibung der existierenden Deutschlandkarte für Altbaumaterialien und -konstruktionen zur Verbesserung der regionalen Breite und bautechnischen Detailtiefe im Wohngebäudebestand. Zentrum für Umweltbewusstes Bauen. Online verfügbar unter http://www.altbaukonstruktionen.de, zuletzt geprüft am 21.08.2017.

Zürcher, Christoph; Frank, Thomas (2010): Bauphysik. Bau & Energie. 3., überarb. u. aktualis. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverl.

A.3 Energetische und feuchtetechnische Bemessung durch hygrothermische Simulation

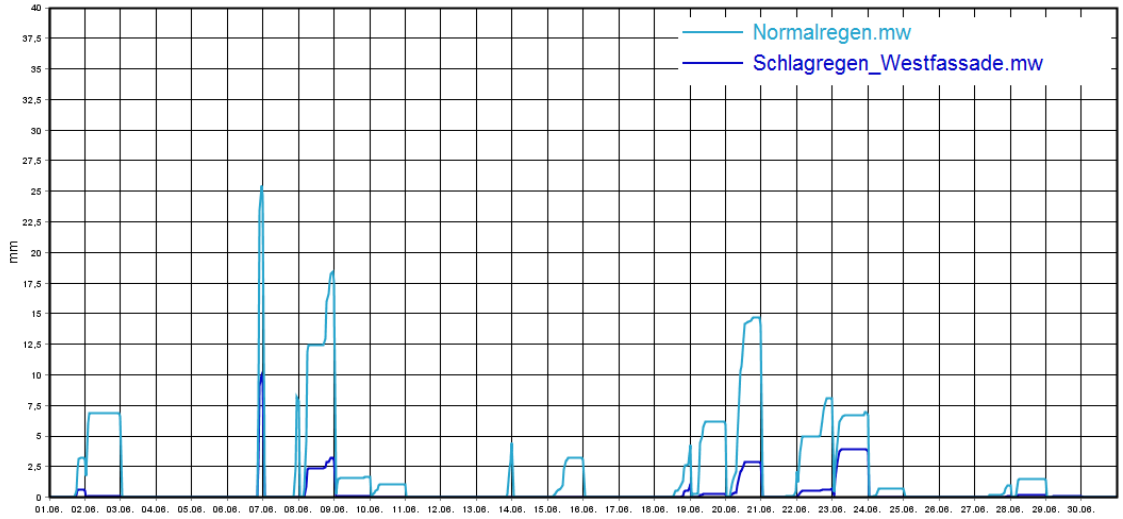


Abbildung A- 1: Niederschlagsereignisse im Juni 2015 am Standort Holzkirchen

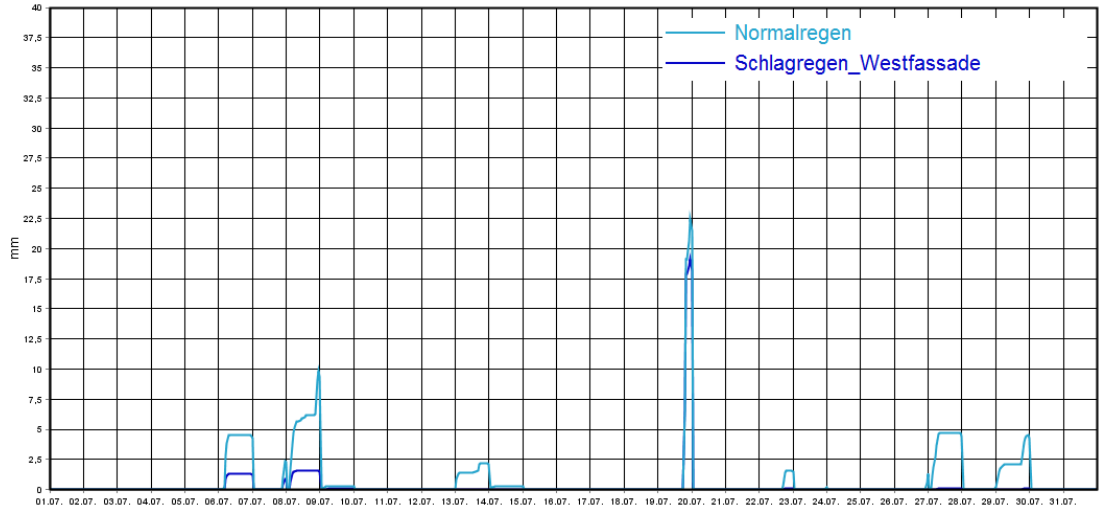


Abbildung A- 2: Niederschlagsereignisse im Juli 2015 am Standort Holzkirchen

A.3.1 Ergebnis-Heatmaps: Nicht hydrophobierte Holzfaser

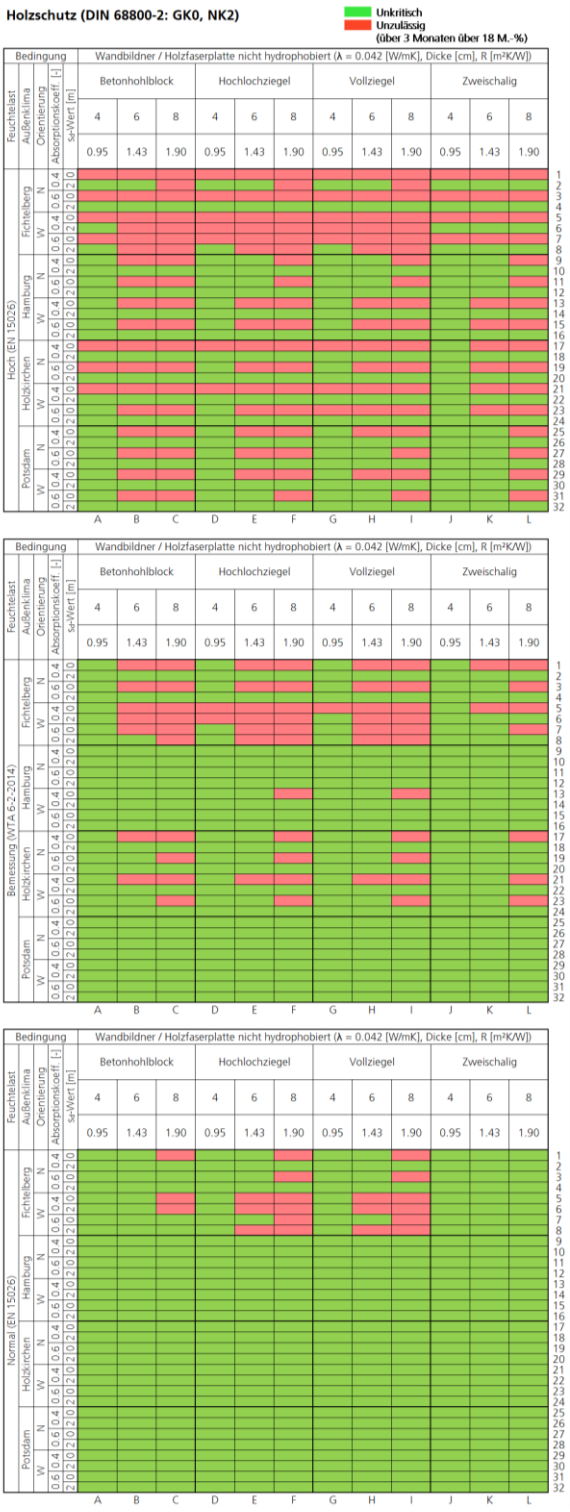


Abb. A.3. 1: Bewertung des massebezogenen Wassergehaltes der nicht hydrophobierten Holzfaserdämmung nach den Grenzwerten der DIN 68800-2:2012-02.



Abb. A.3. 2: Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Grün bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Ausgewertet wird der kritische Zentimeter der Dämmstoffschicht im Bereich der Grenzschicht zum Be-

standsmauerwerk. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante blau und mit zunehmender Dauer dunkler eingefärbt.

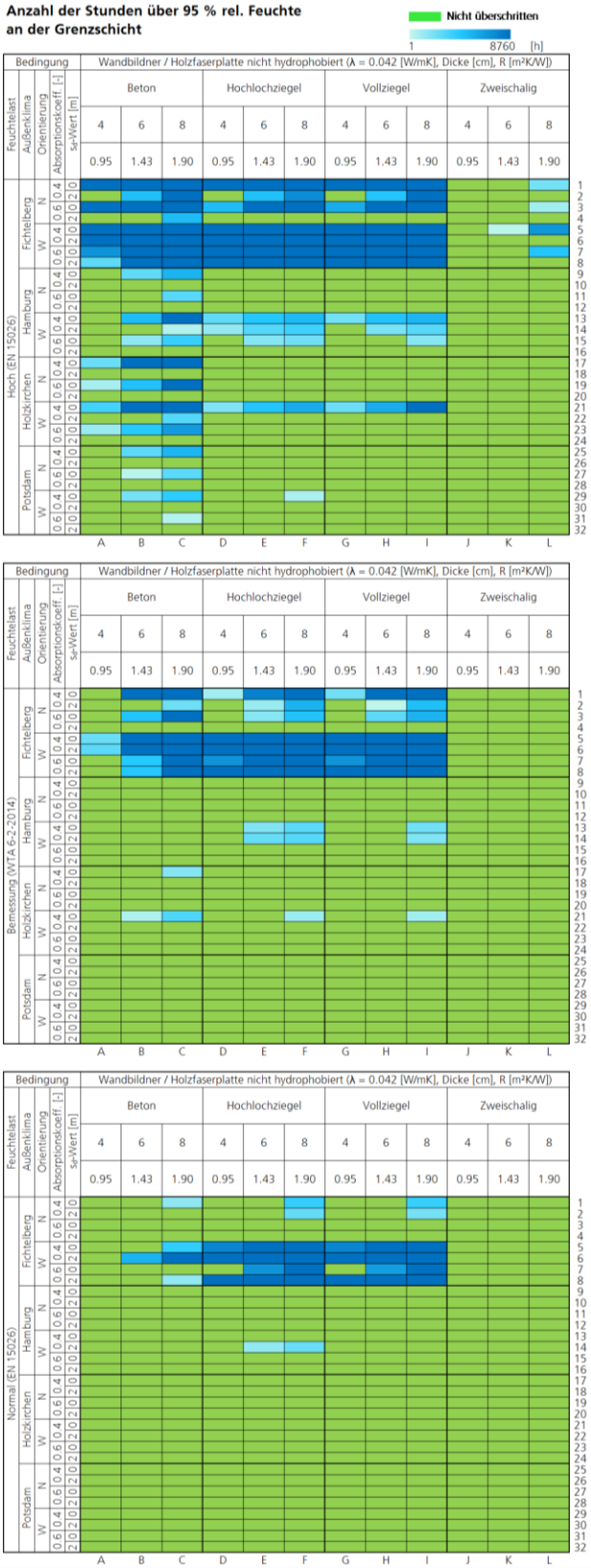


Abb. A.3. 3: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht Innendämmung-Bestandswand. Grün bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung

kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante blau und mit zunehmender Dauer dunkler eingefärbt.

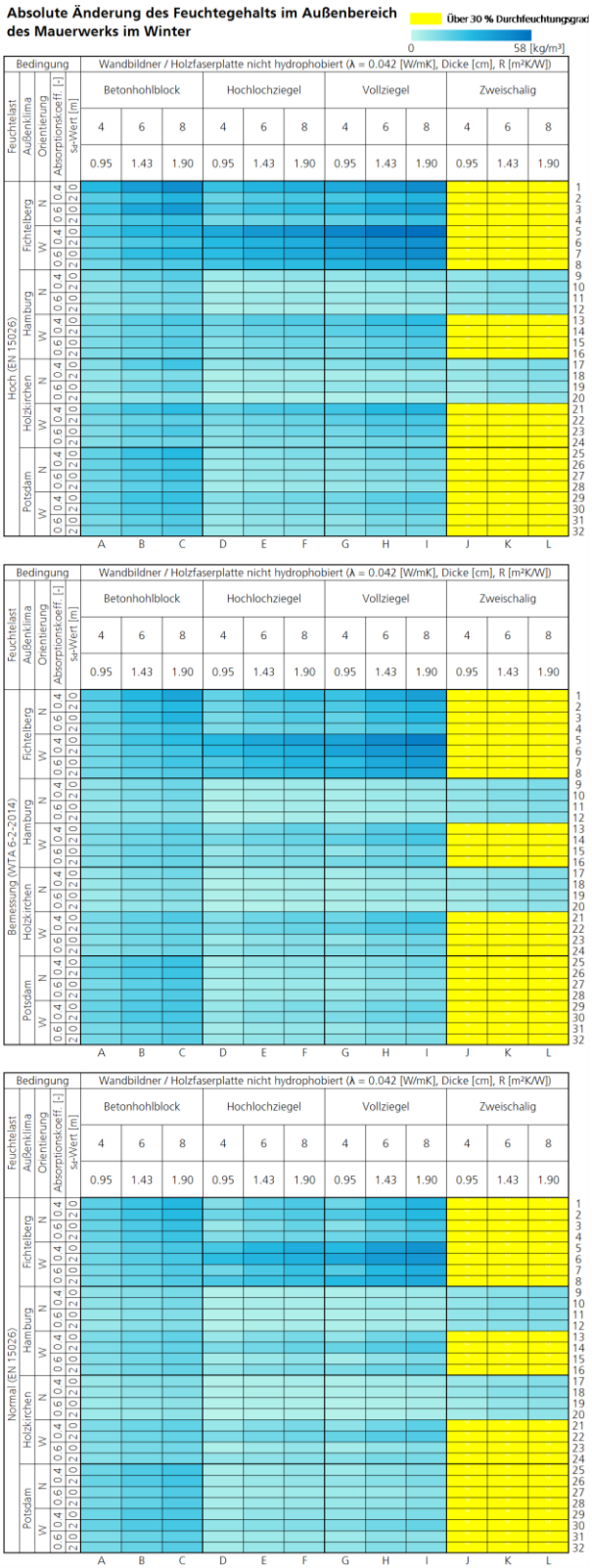


Abb. A.3. 4: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem

jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%-igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

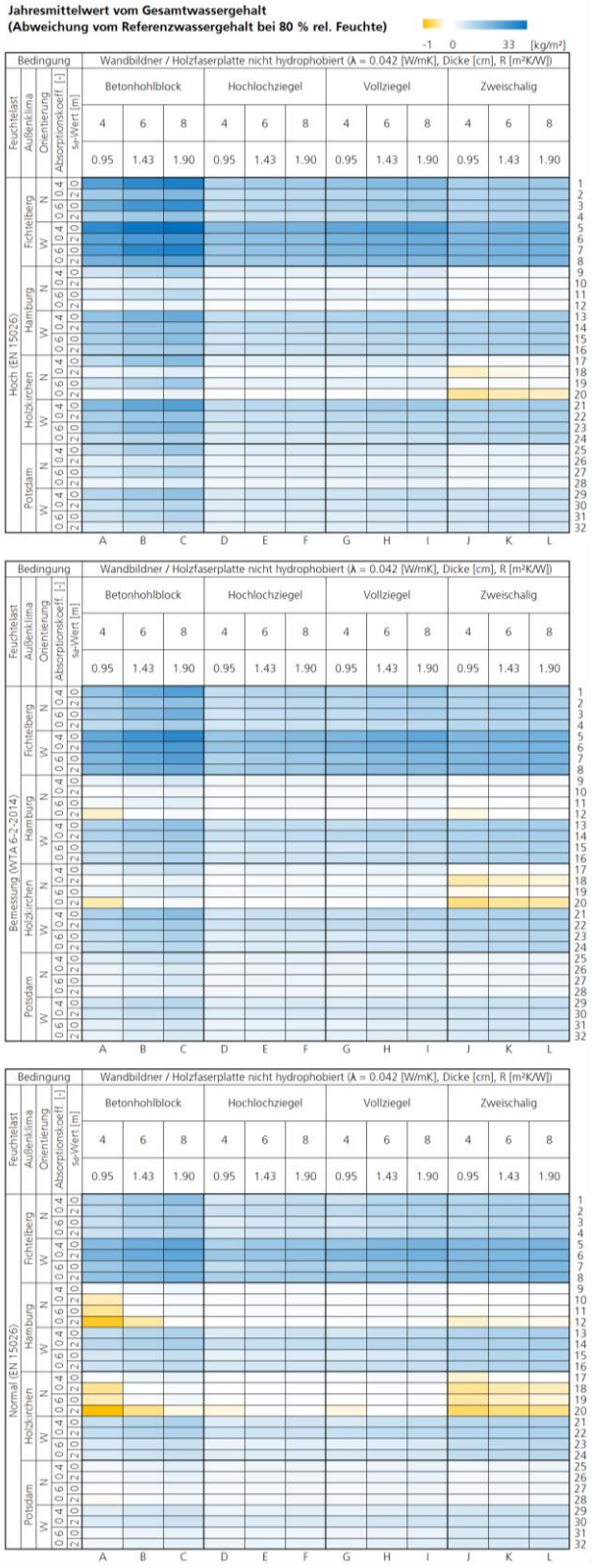


Abb. A.3. 5: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der

Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt. Das Beispiel entspricht dem Verhalten bei einer hohen inneren Feuchtelast.

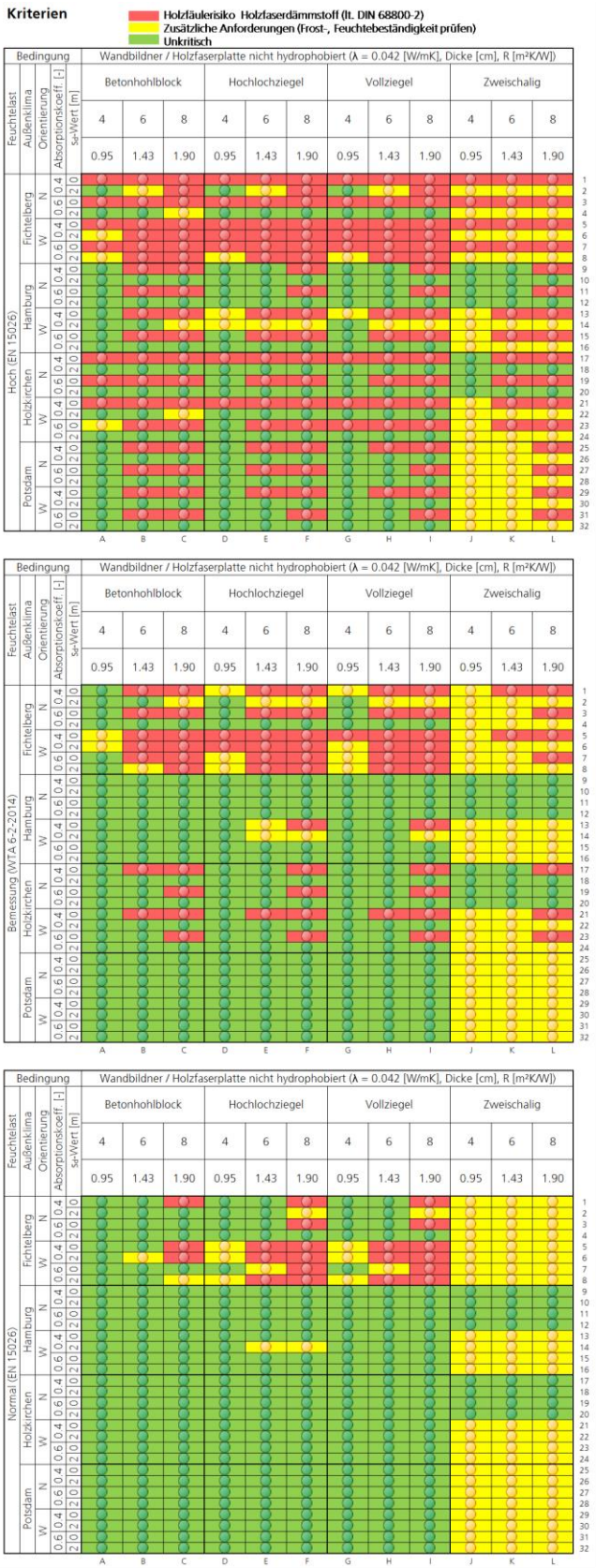


Abb. A.3. 6 : Zusammenfassende Bewertung für die nicht hydrophobierte Holzfaserdämmung.

A.3.2 Ergebnis-Heatmaps: Hydrophobierte Holzfaserdämmung

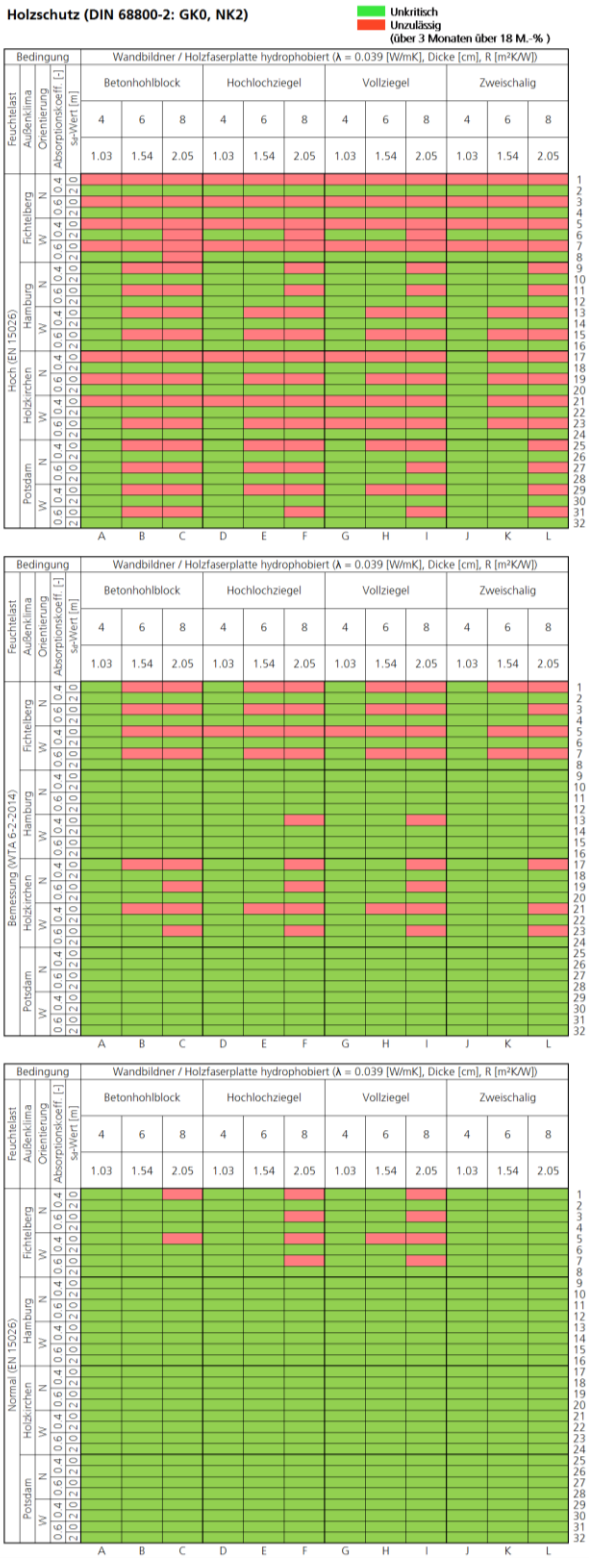


Abb. A.3. 7: Bewertung des massebezogenen Wassergehaltes der hydrophobierten Holzfaserdämmung nach den Grenzwerten der DIN 68800-2:2012-02.



Abb. A.3. 8: Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30%. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt.

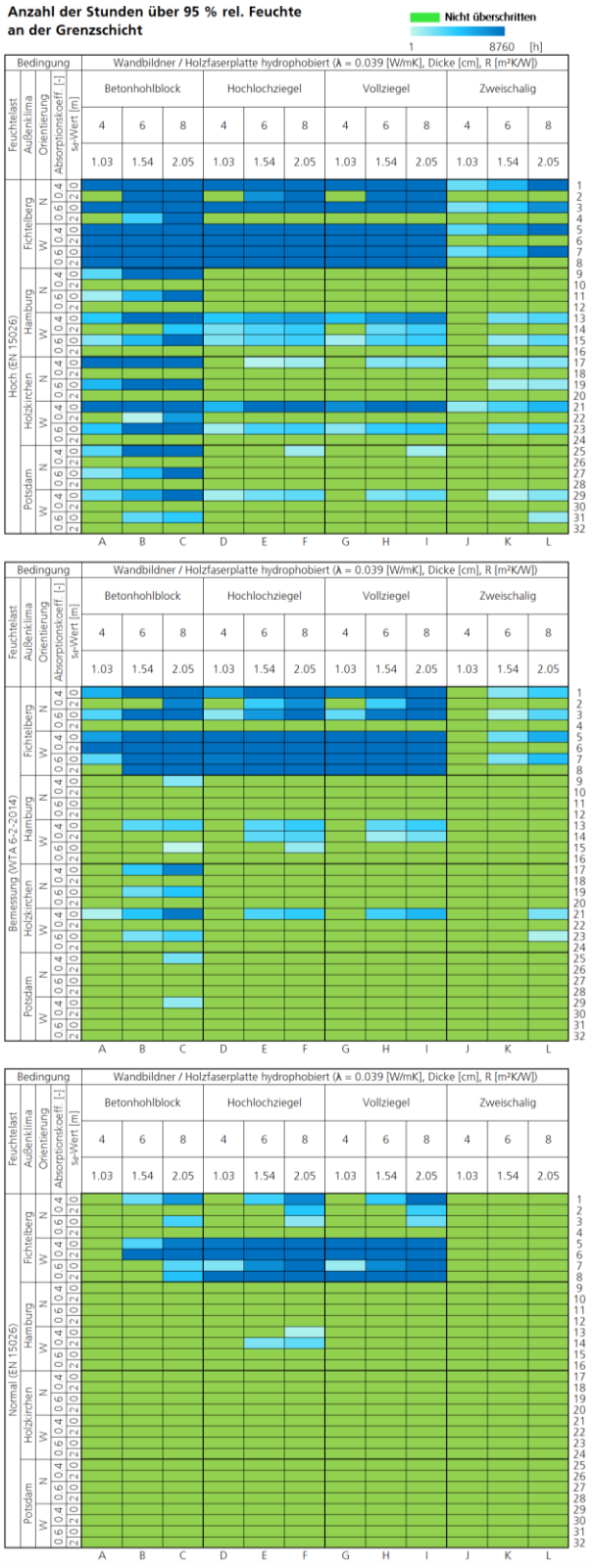


Abb. A.3. 9 : Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

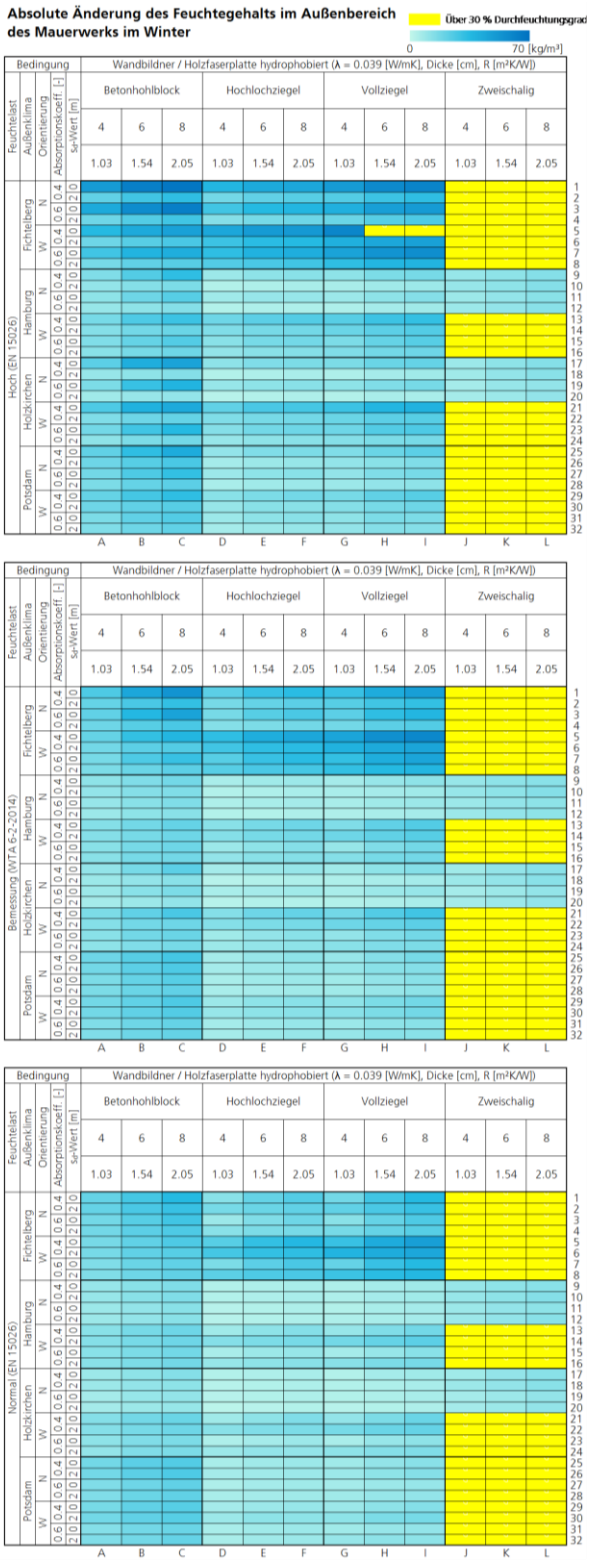


Abb. A.3. 10 : Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem

jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

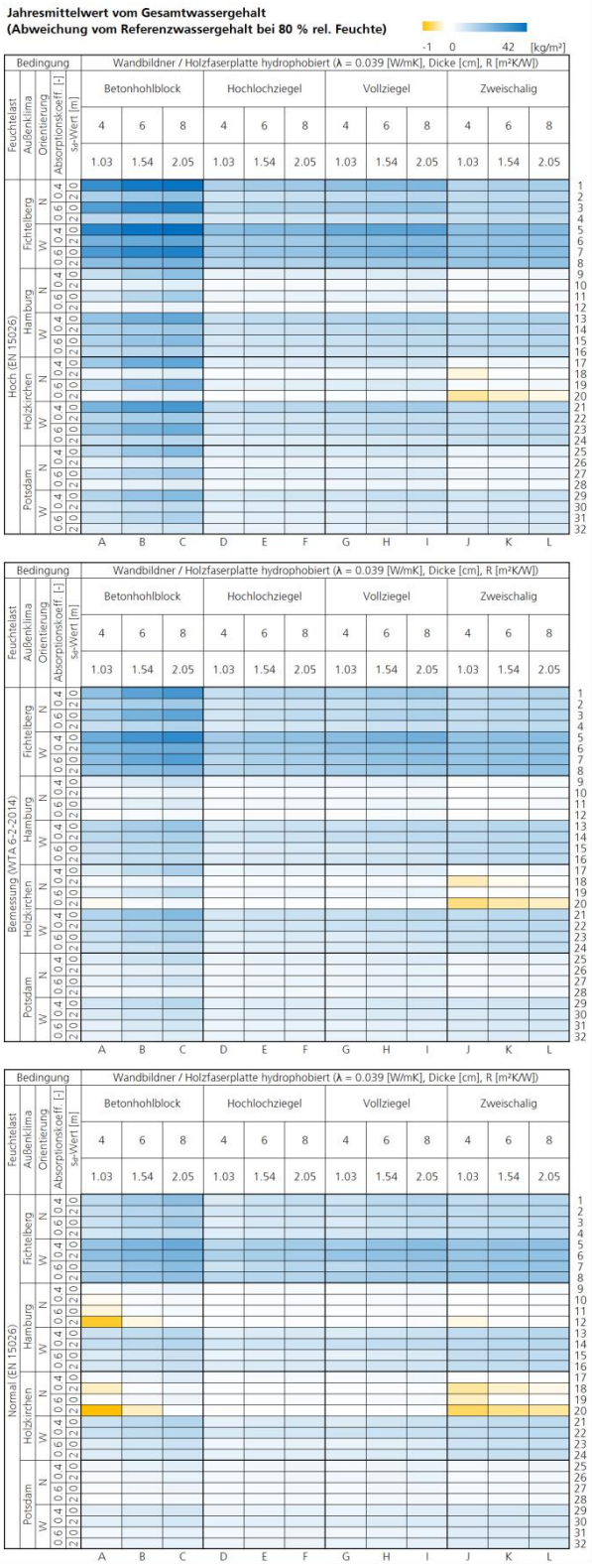


Abb. A.3. 11 : Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der

Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt. Das Beispiel entspricht dem Verhalten bei einer hohen inneren Feuchtelast.

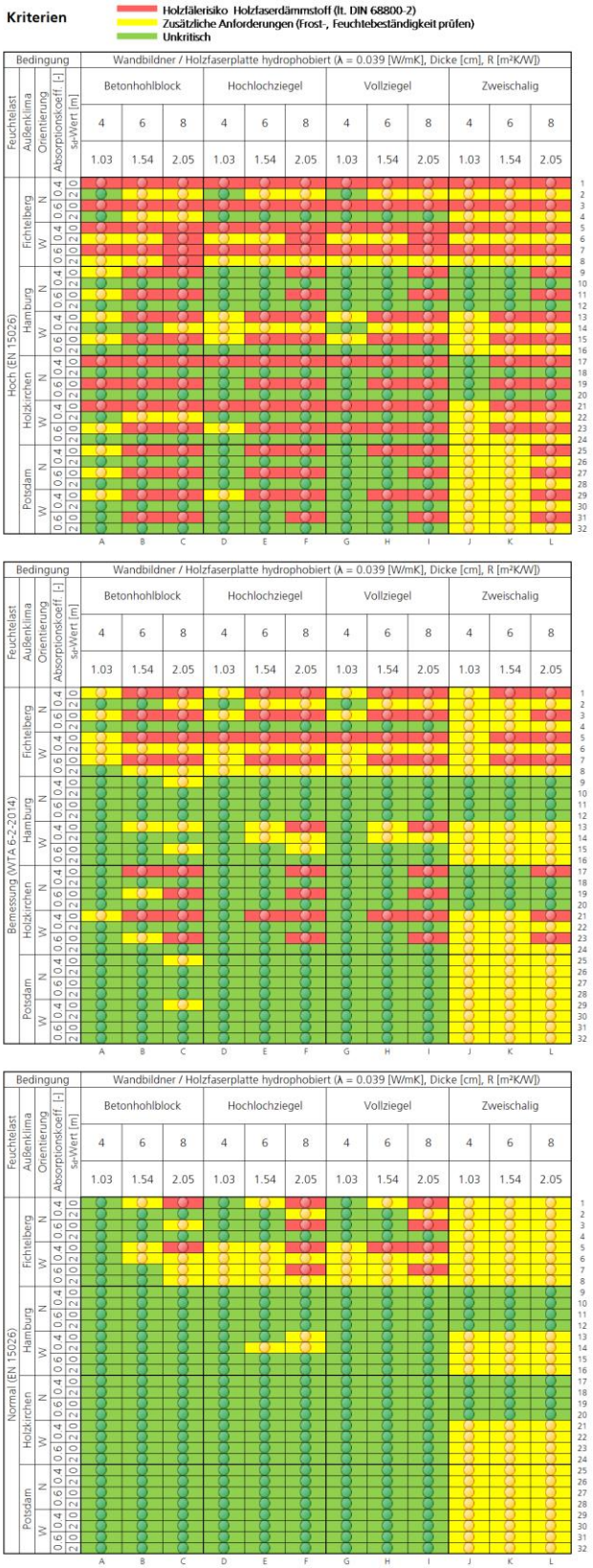


Abb. A.3. 12 : Zusammenfassende Bewertung für die hydrophobierte Holzfaserdämmung.

A.3.3 Hanffaser-Dämmplatte

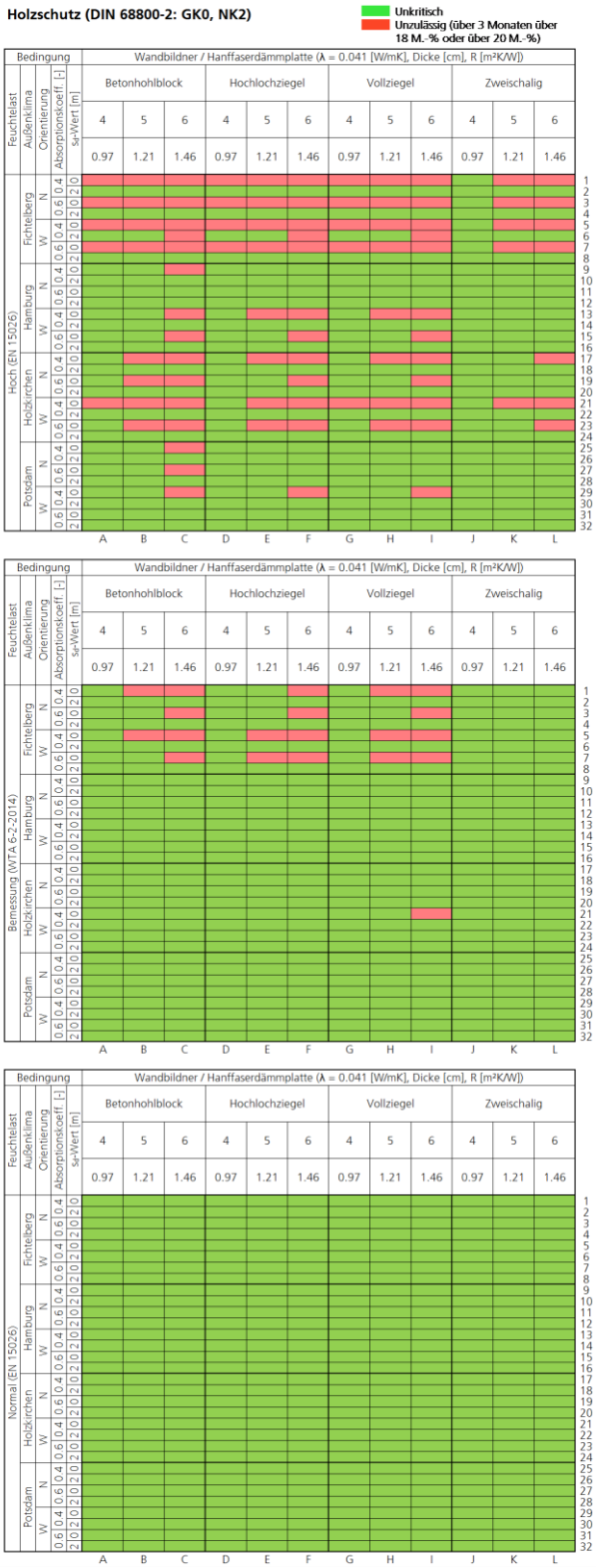


Abb. A.3. 13 : Bewertung des massebezogenen Wassergehaltes der Hanffaserdämmplatte nach den Grenzwerten der DIN 68800-2:2012-02.

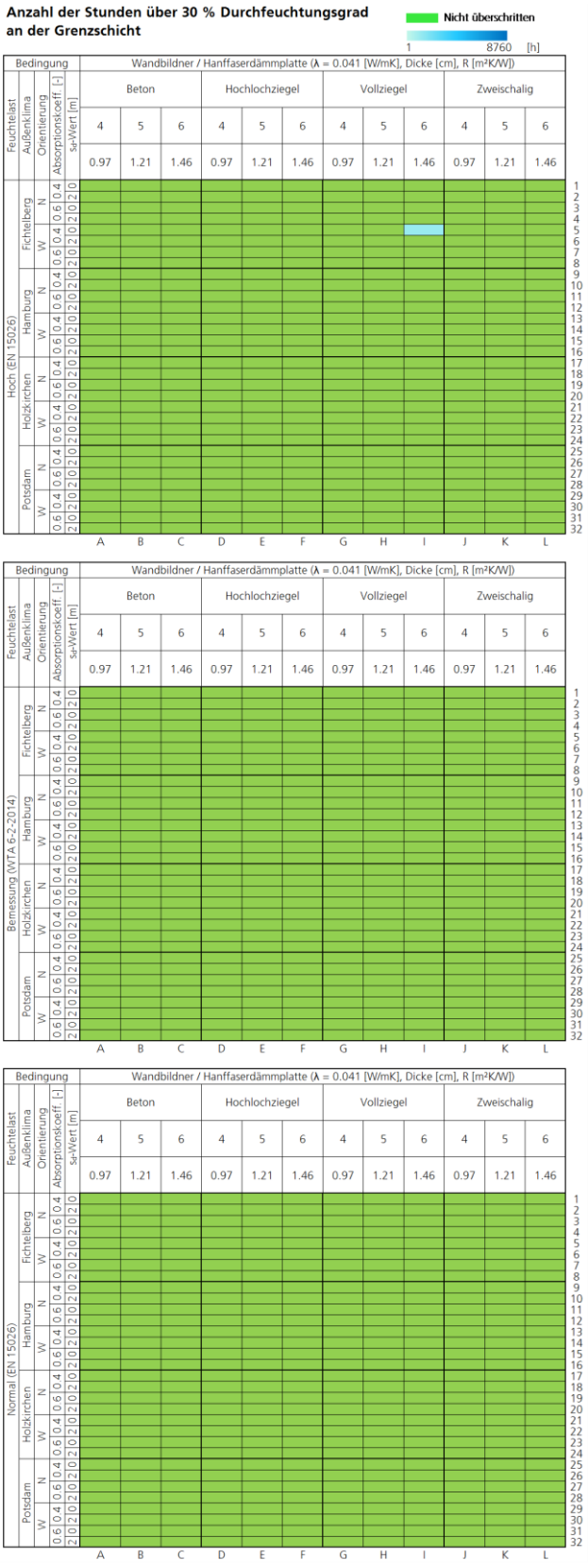


Abb. A.3. 14 : Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30%. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt.

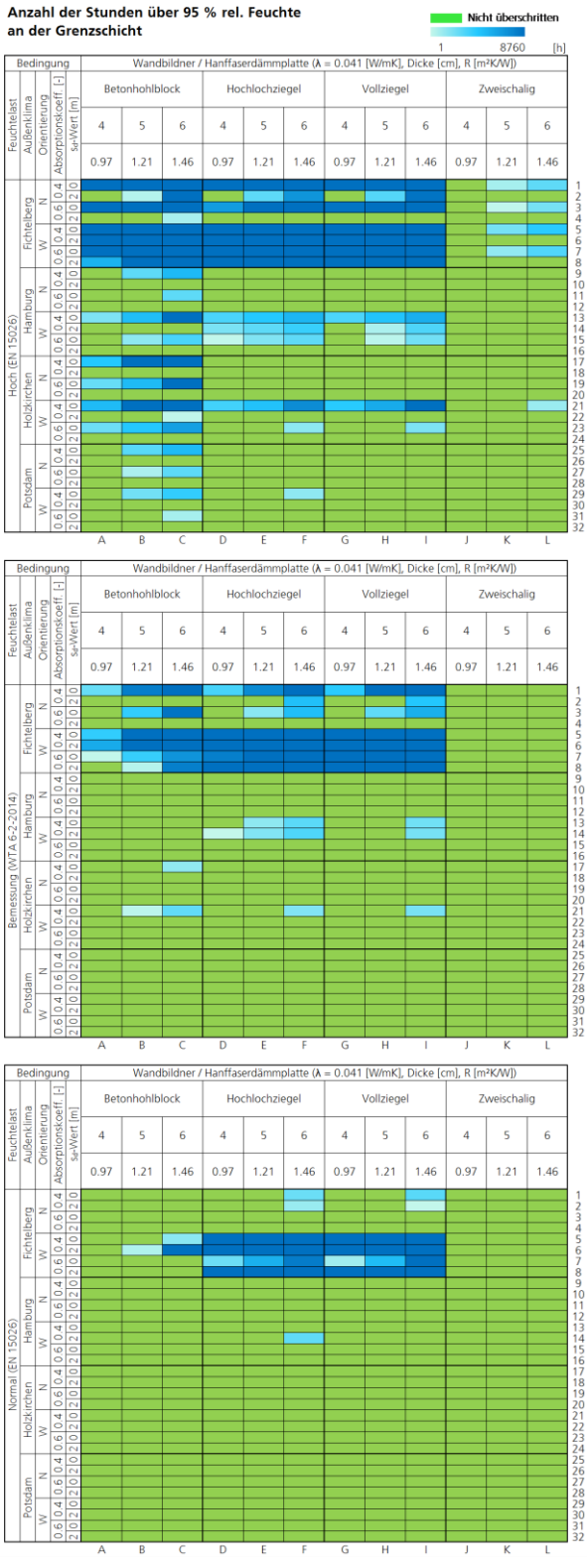


Abb. A.3. 15 : Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

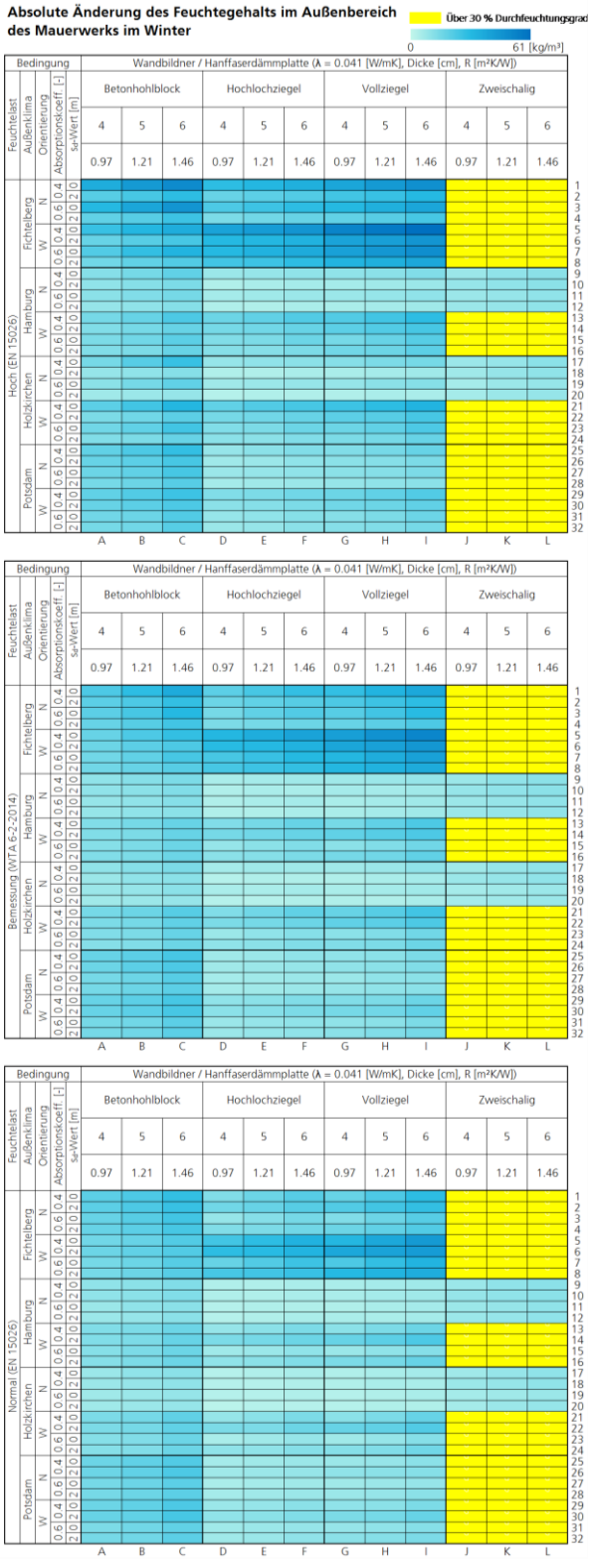


Abb. A.3. 16 : Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

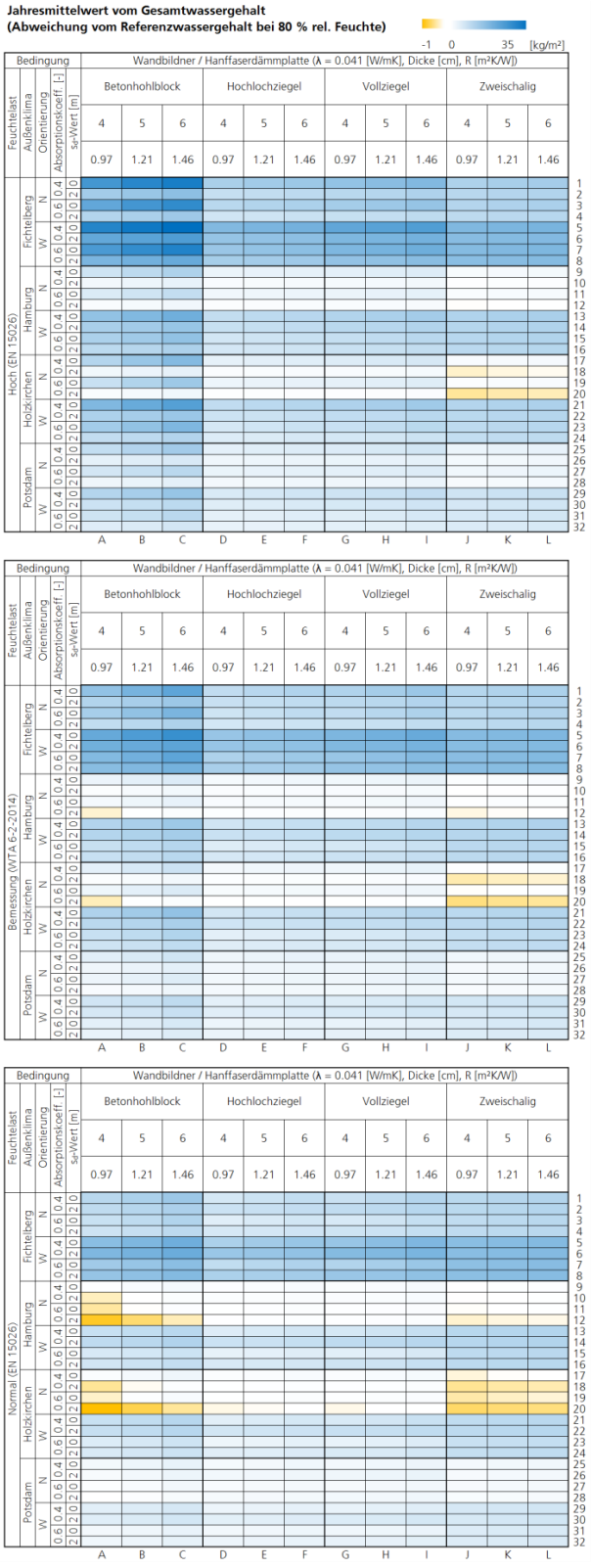


Abb. A.3. 17 : Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt. Das Beispiel entspricht dem Verhalten bei einer hohen inneren Feuchtelast.

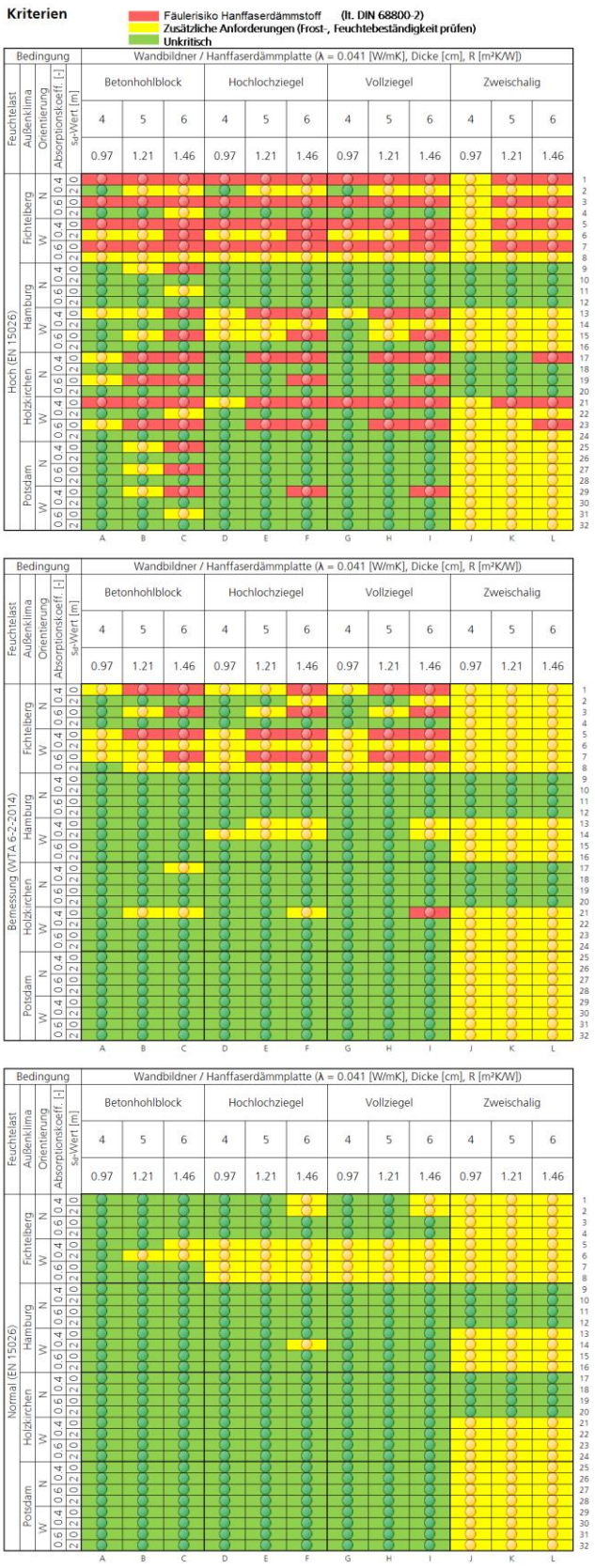


Abb. A.3. 18 : Zusammenfassende Bewertung der Hanffaserdämmplatte bei Berücksichtigung des jeweiligen Raumklimas.

A.3.4 Kork-Lehm-Dämmplatte

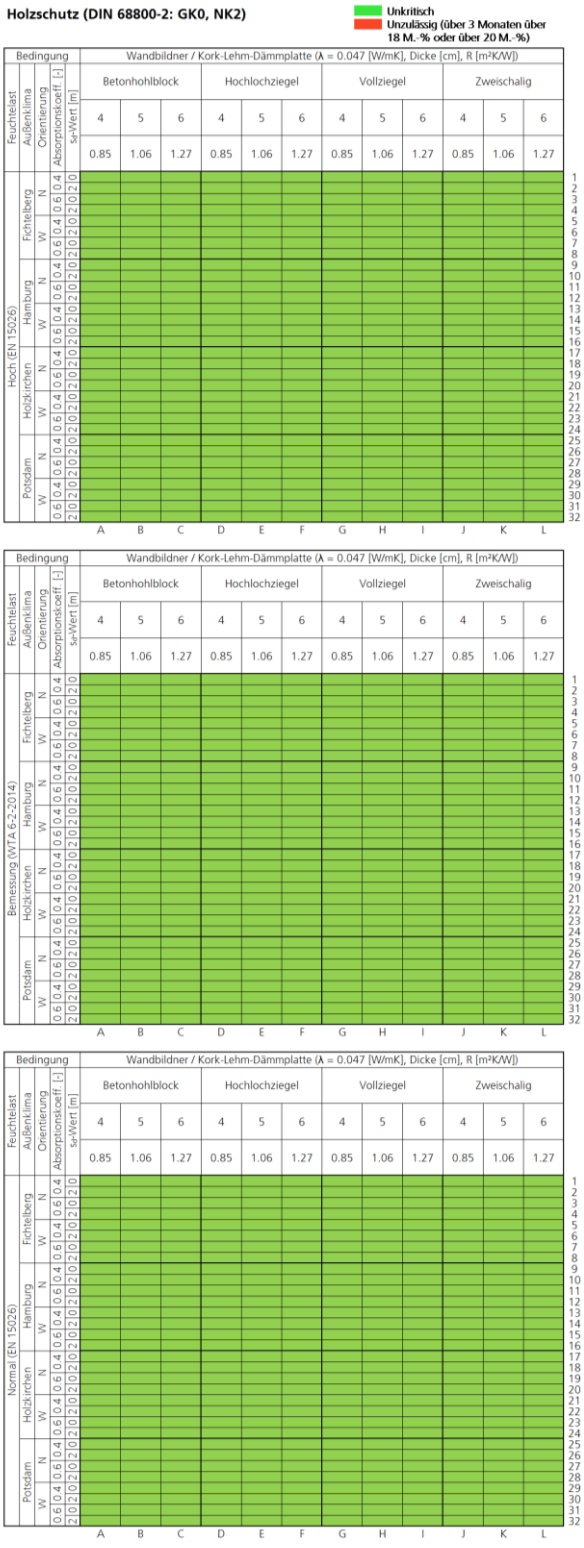


Abb. A.3. 19 : Bewertung des massebezogenen Wassergehaltes der Kork-Lehm Dämmung nach den Grenzwerten der DIN 68800-2:2012-02.

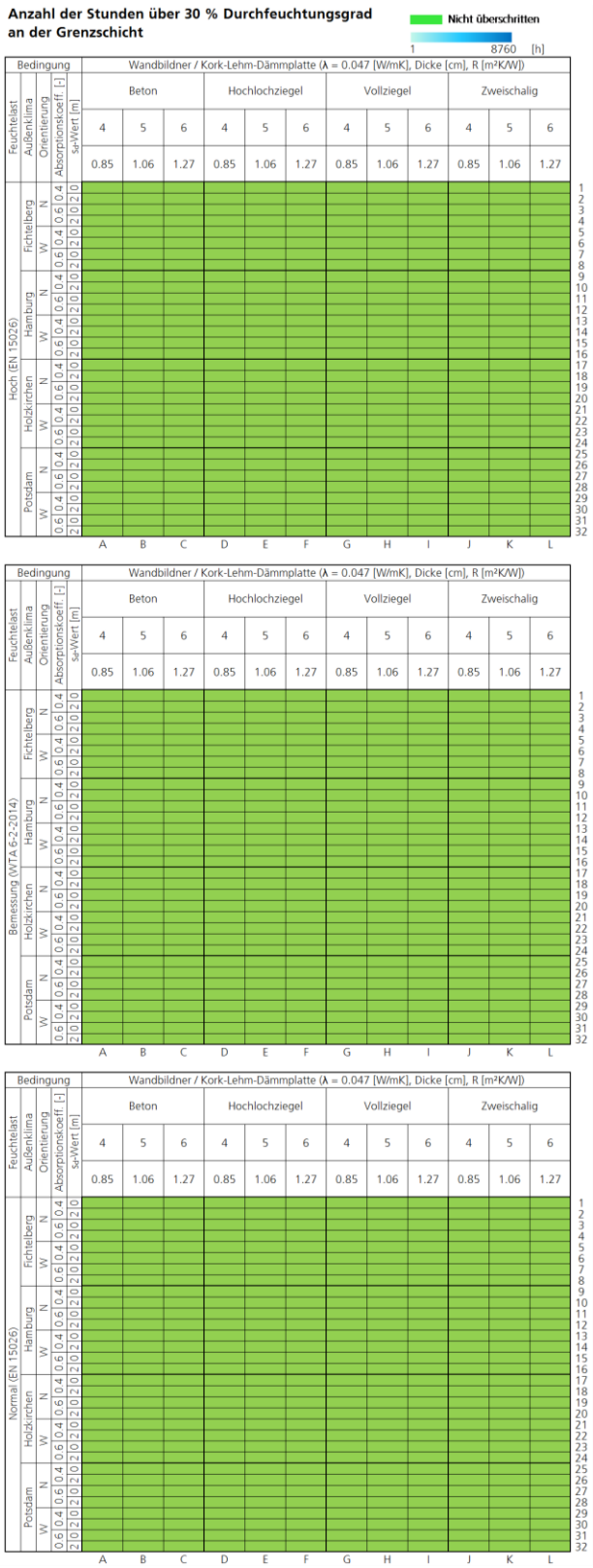


Abb. A.3. 20 : Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30%. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt.

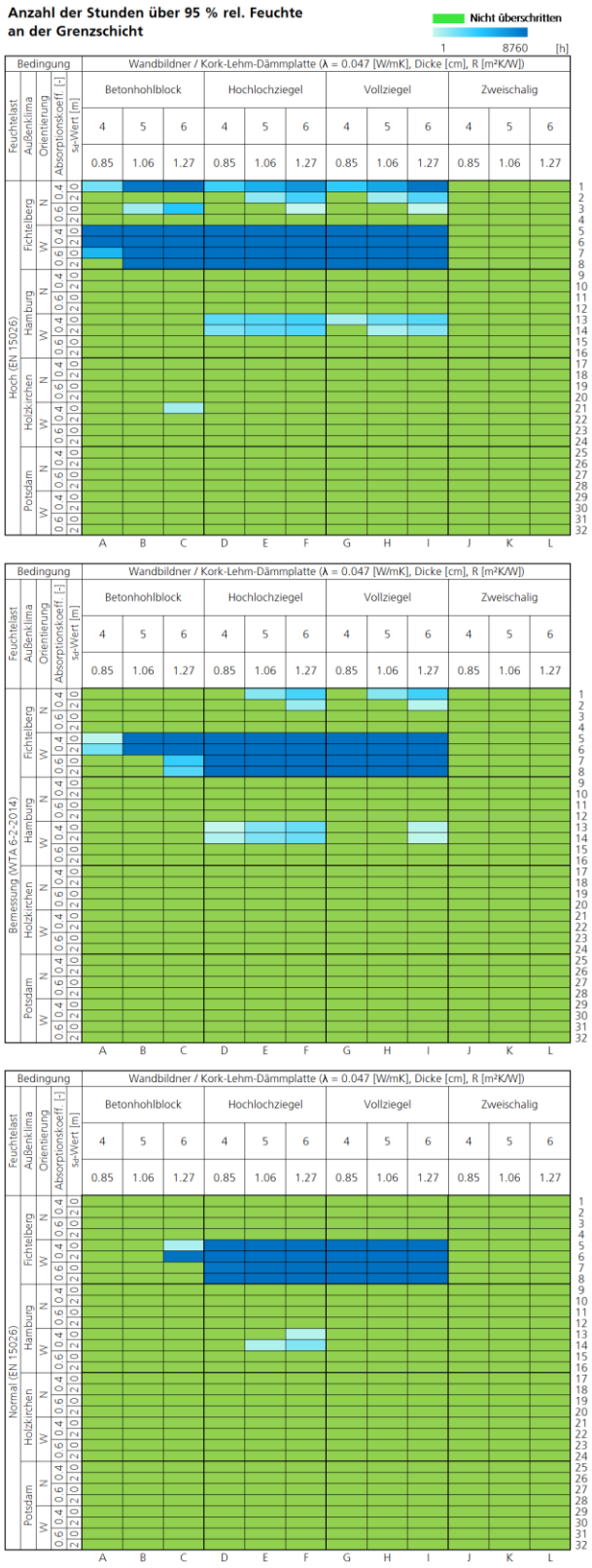


Abb. A.3. 21 : Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

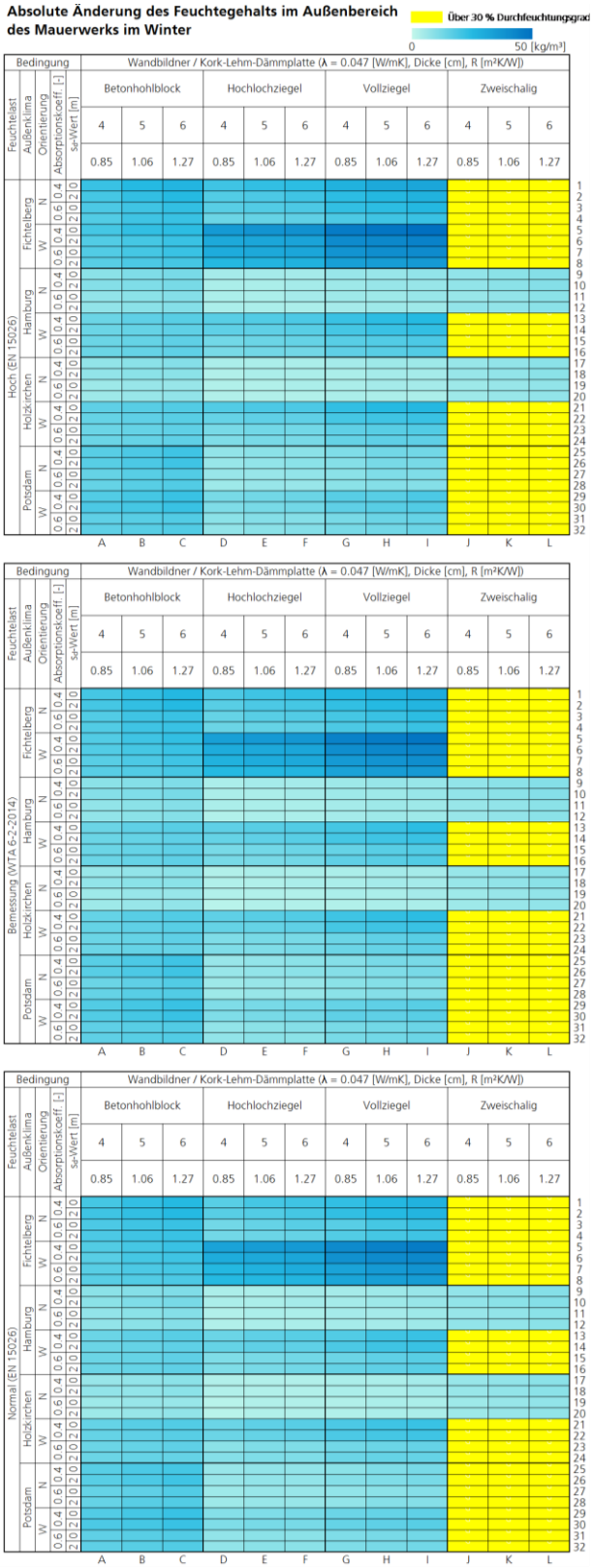


Abb. A.3. 22 : Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

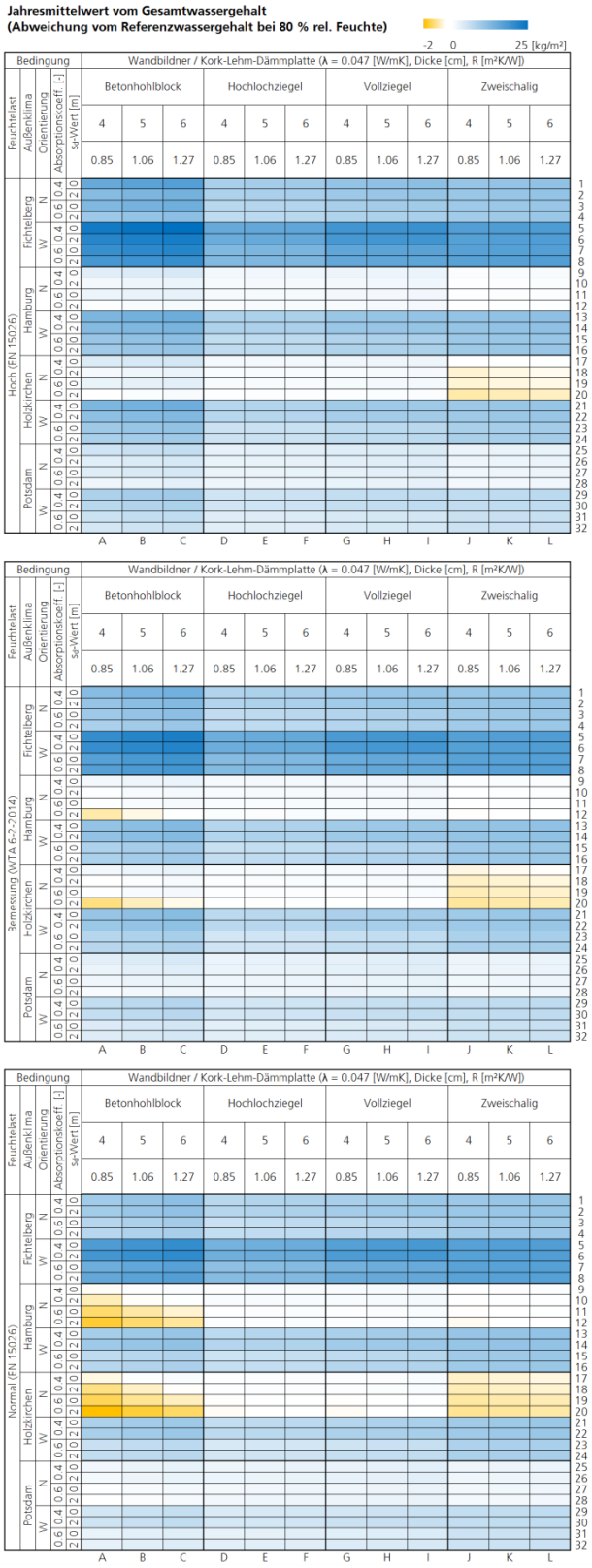


Abb. A.3. 23 : Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt. Das Beispiel entspricht dem Verhalten bei einer hohen inneren Feuchtelast.

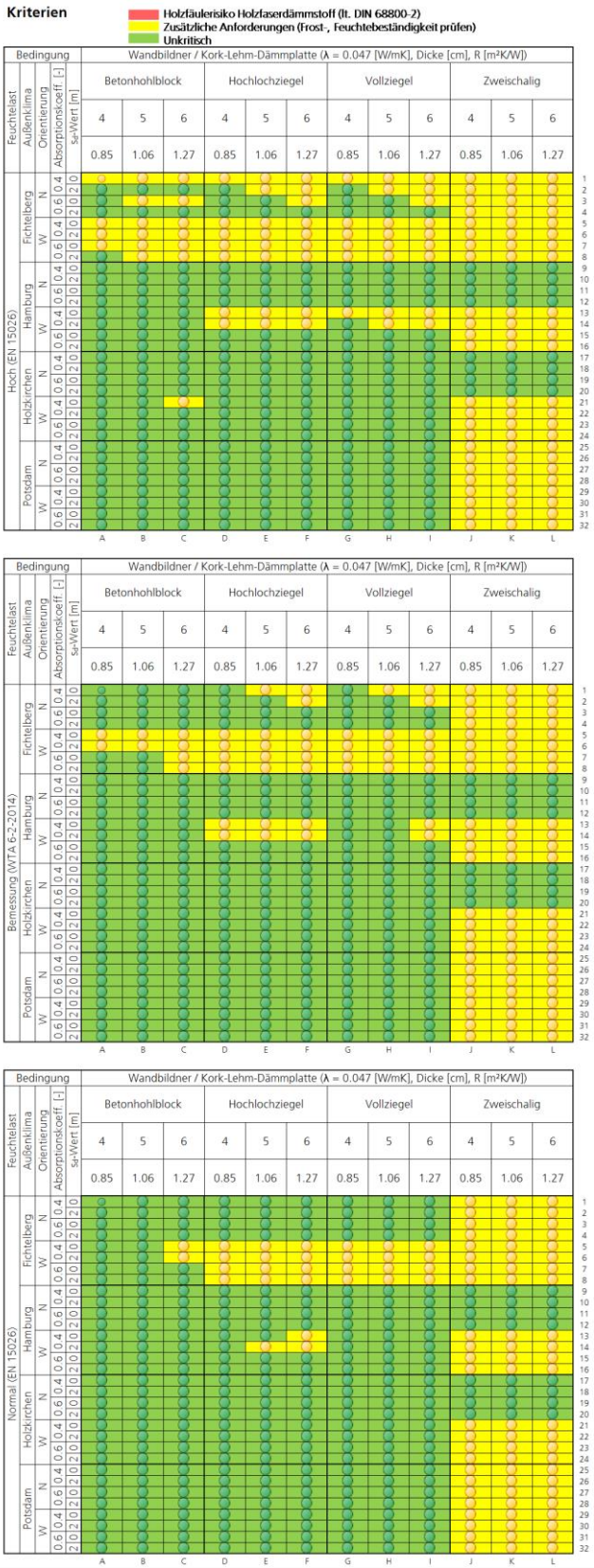


Abb. A.3. 24: Zusammenfassende Bewertung für die Kork-Lehm Dämmplatte.

A.3.5 Aerogel-Hochleistungsdämmputz

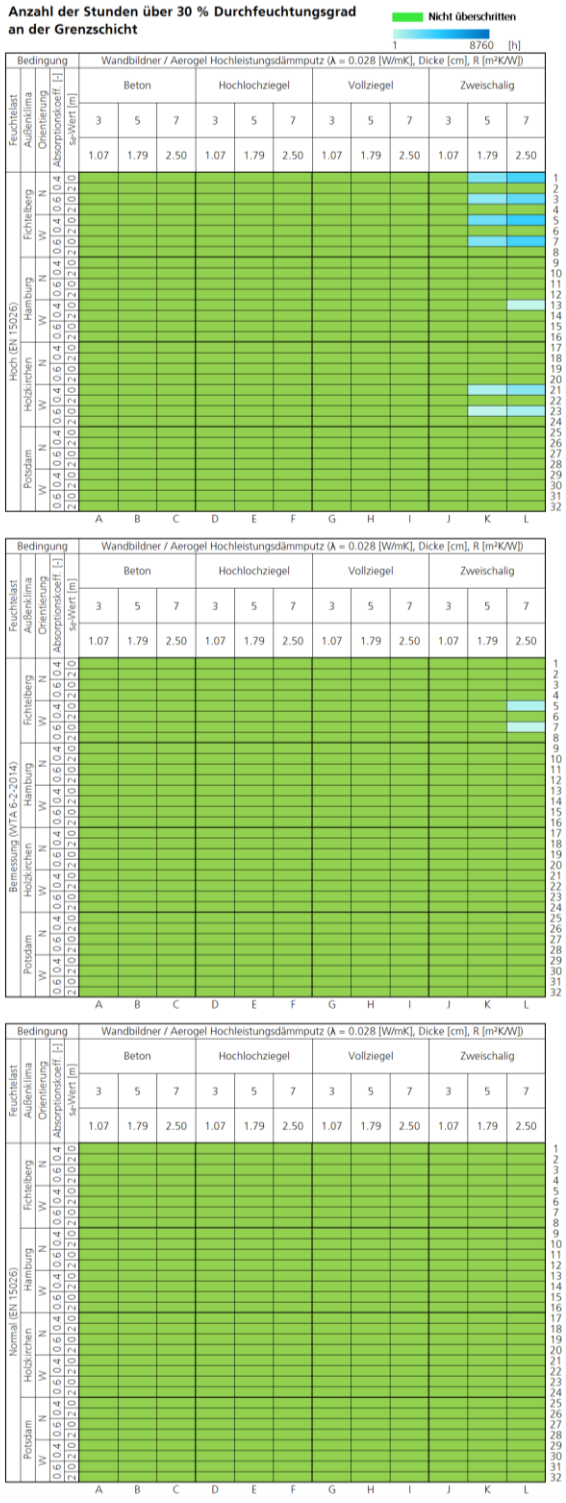


Abb. A.3. 25 : Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

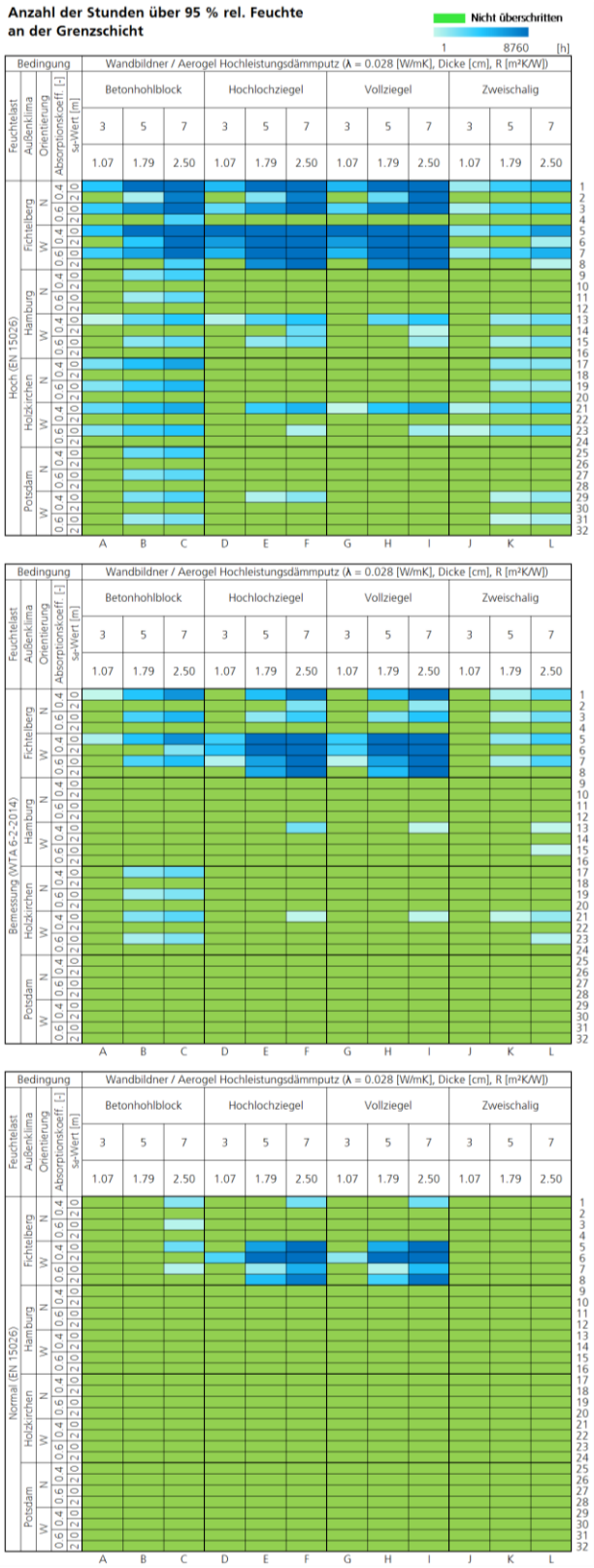


Abb. A.3. 26: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

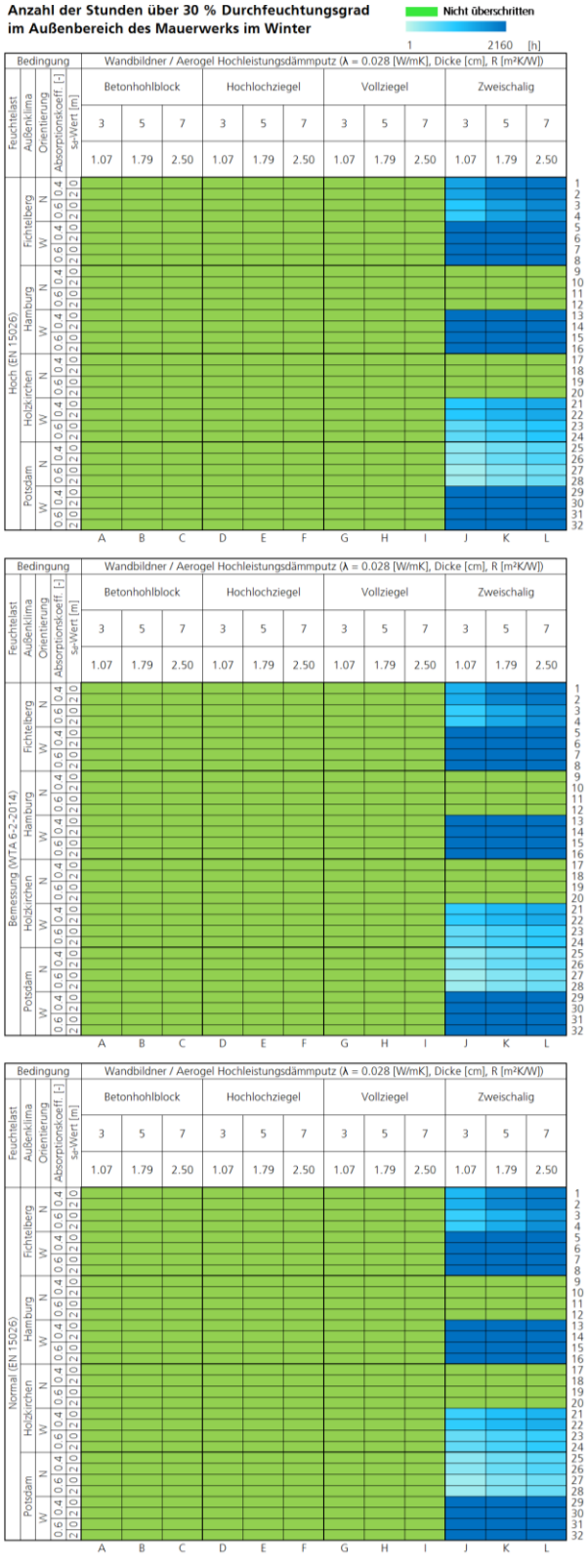


Abb. A.3. 27: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5 cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

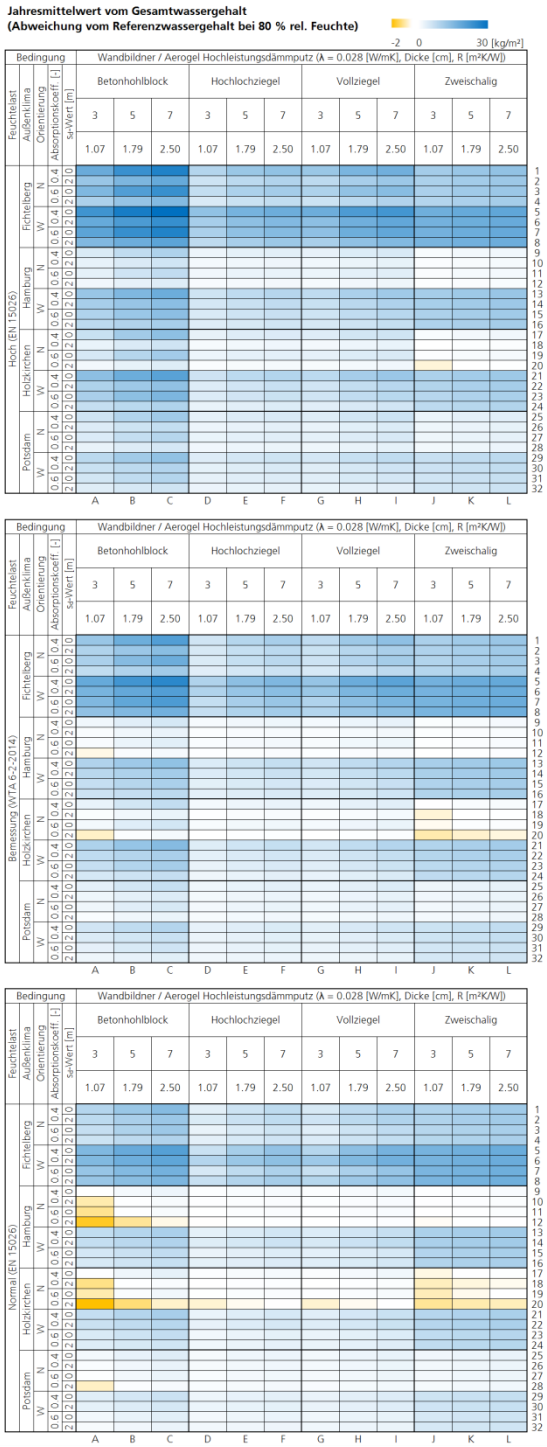


Abb. A.3. 28: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt.

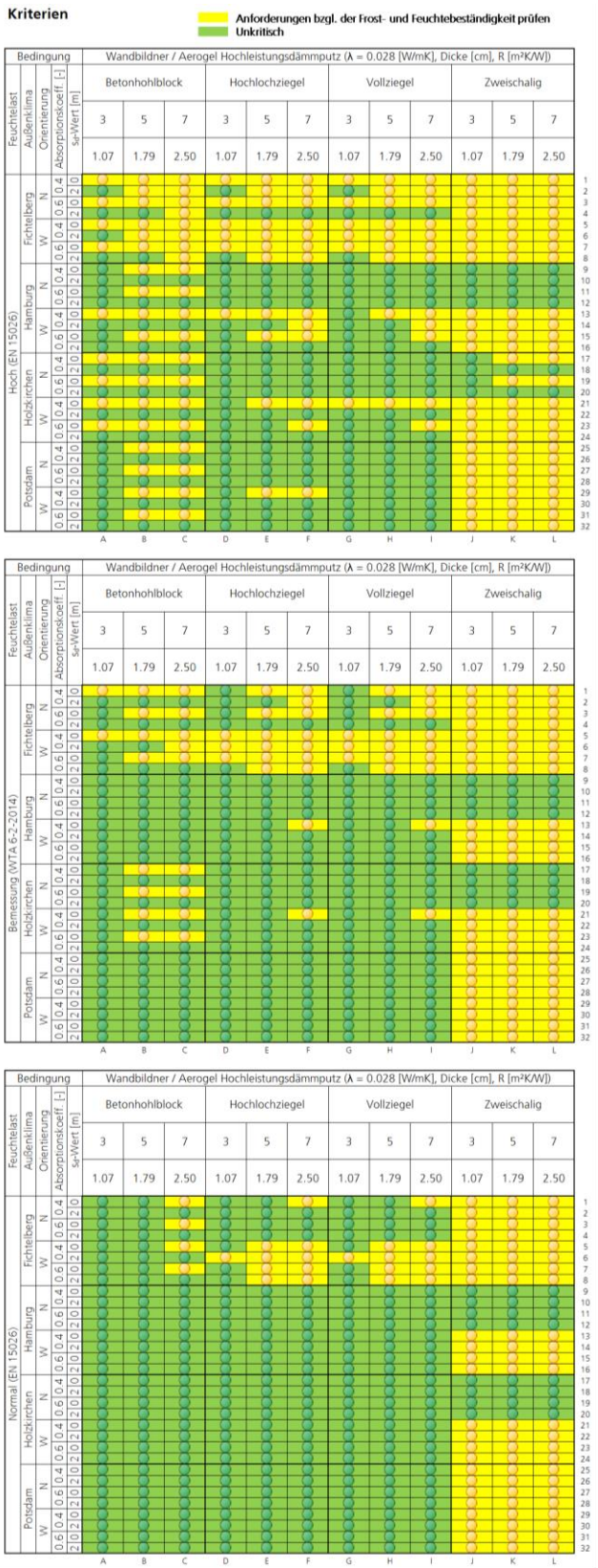


Abb. A.3. 29: Zusammenfassende Bewertung für den aerogelhaltigen Hochleistungsdämmputz im eingeschwungenen Zustand.

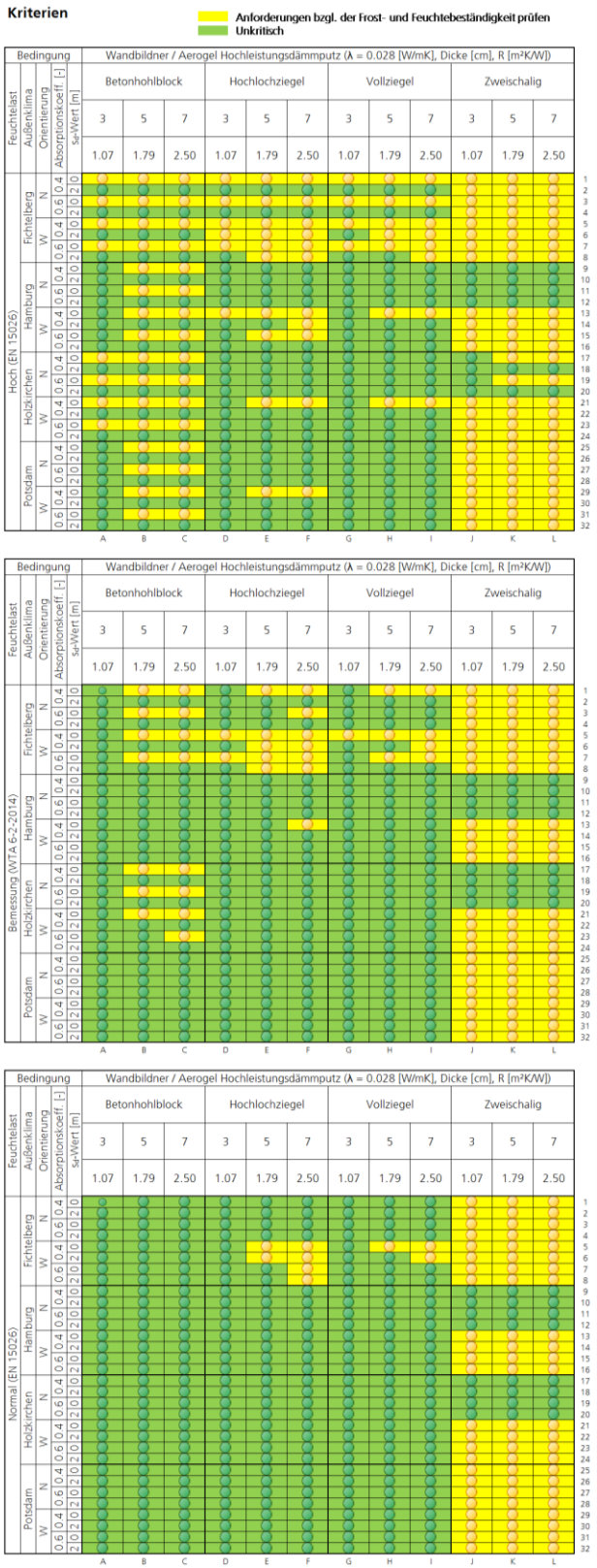


Abb. A.3. 30: Zusammenfassende Bewertung für den aerogelhaltigen Hochleistungsdämmputz im zweiten Berechnungsjahr.

A.3.6 Hochleistungsdämmputz

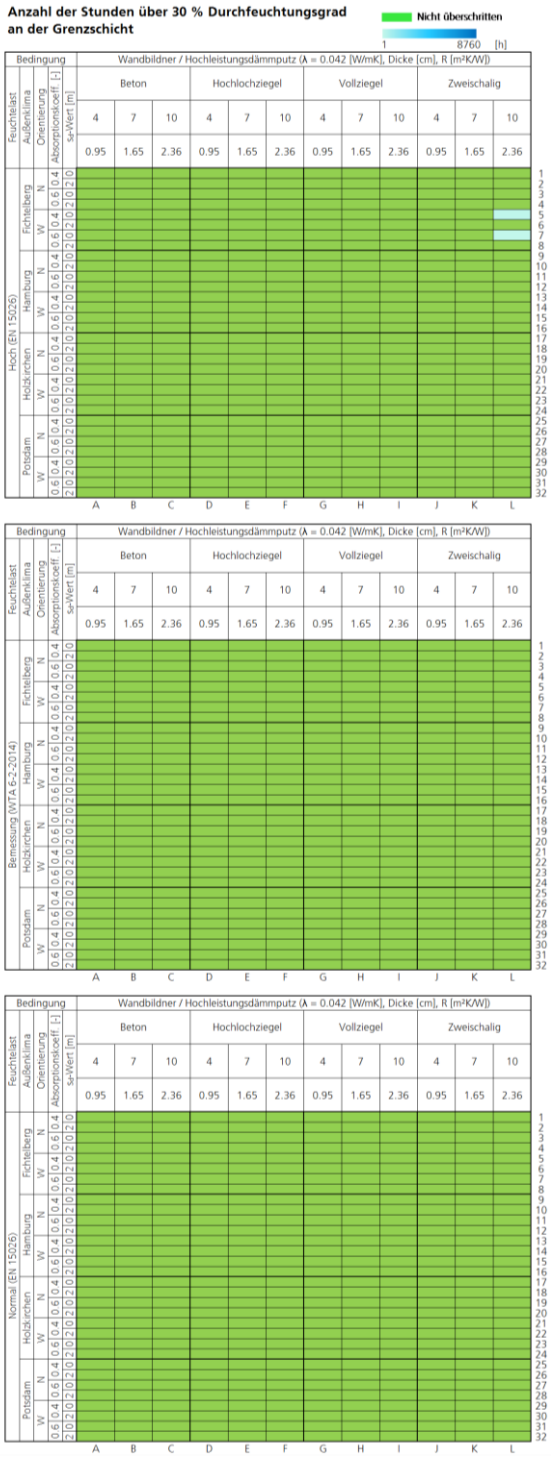


Abb. A.3. 31:Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

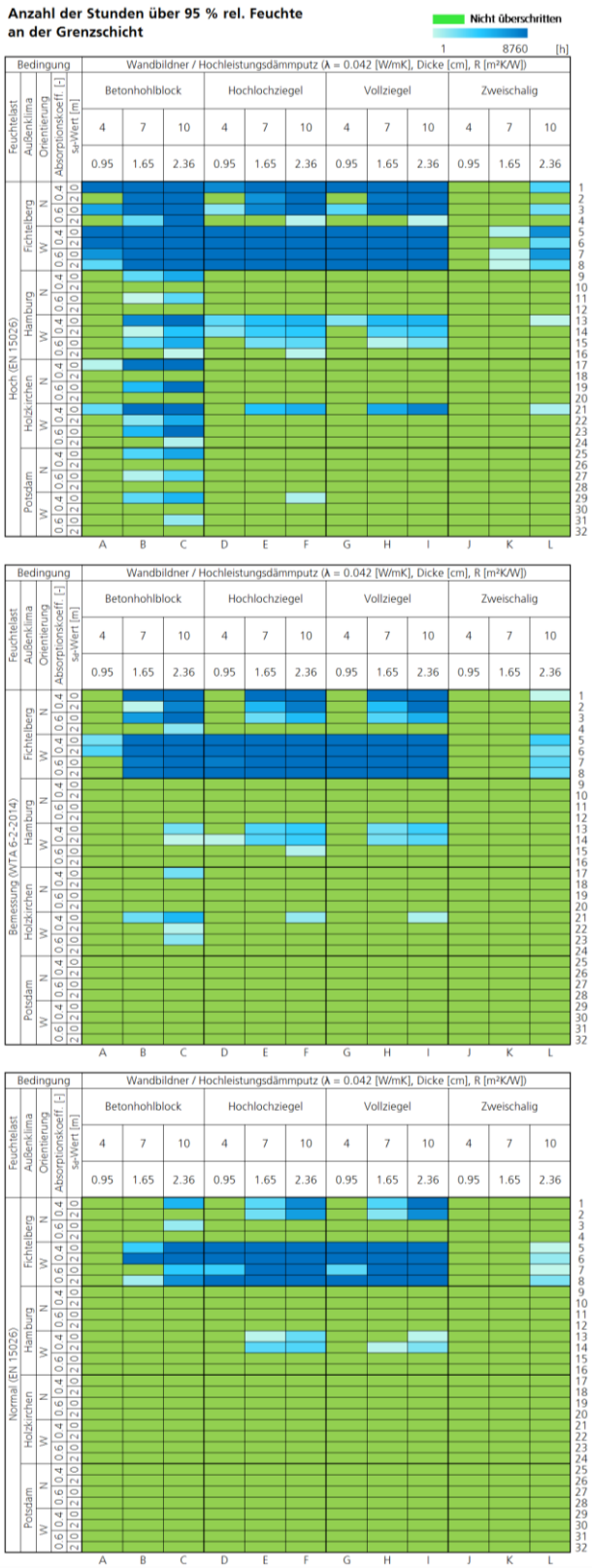


Abb. A.3. 32: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante blau und mit zunehmender Dauer dunkler eingefärbt.

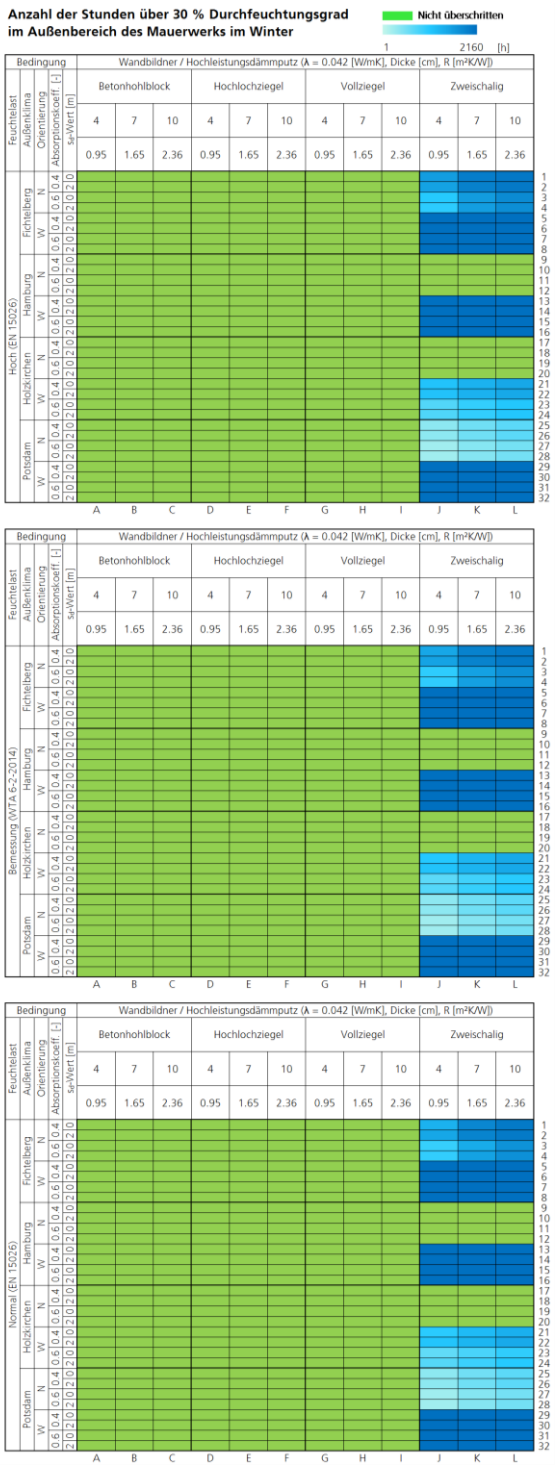


Abb. A.3. 33: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5 cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des Grenzwerts von 30 % Durchfeuchtungsgrad. Der volumenbezogene Wassergehalt ist graduell in blau dargestellt.

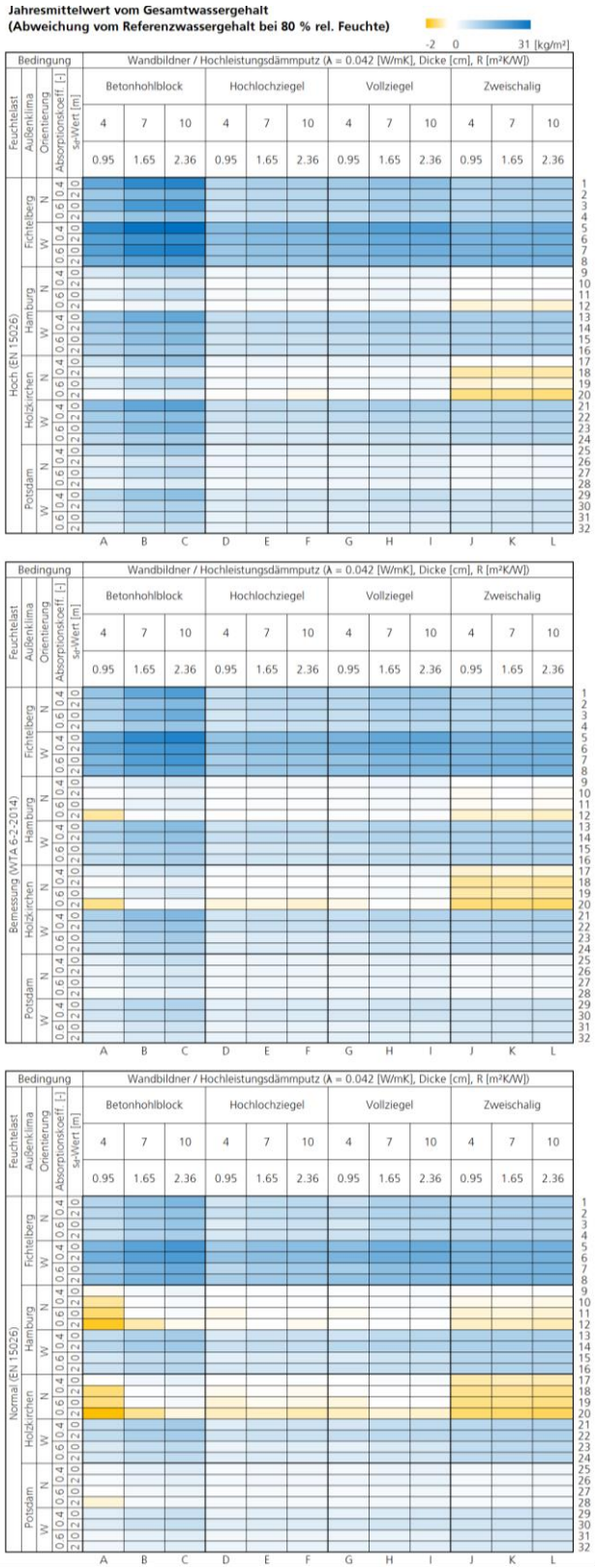


Abb. A.3. 34: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt.

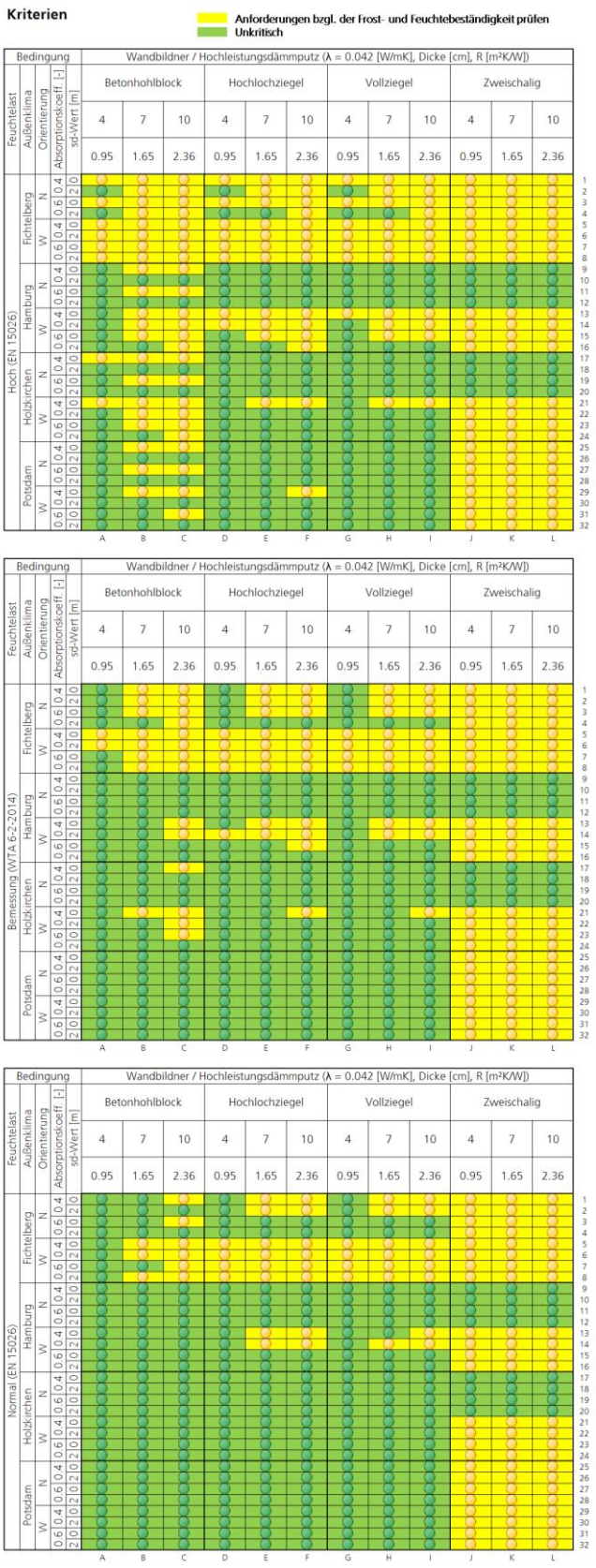


Abb. A.3. 35: Zusammenfassende Bewertung für den Hochleistungsdämmputz im eingeschwungenen Zustand.

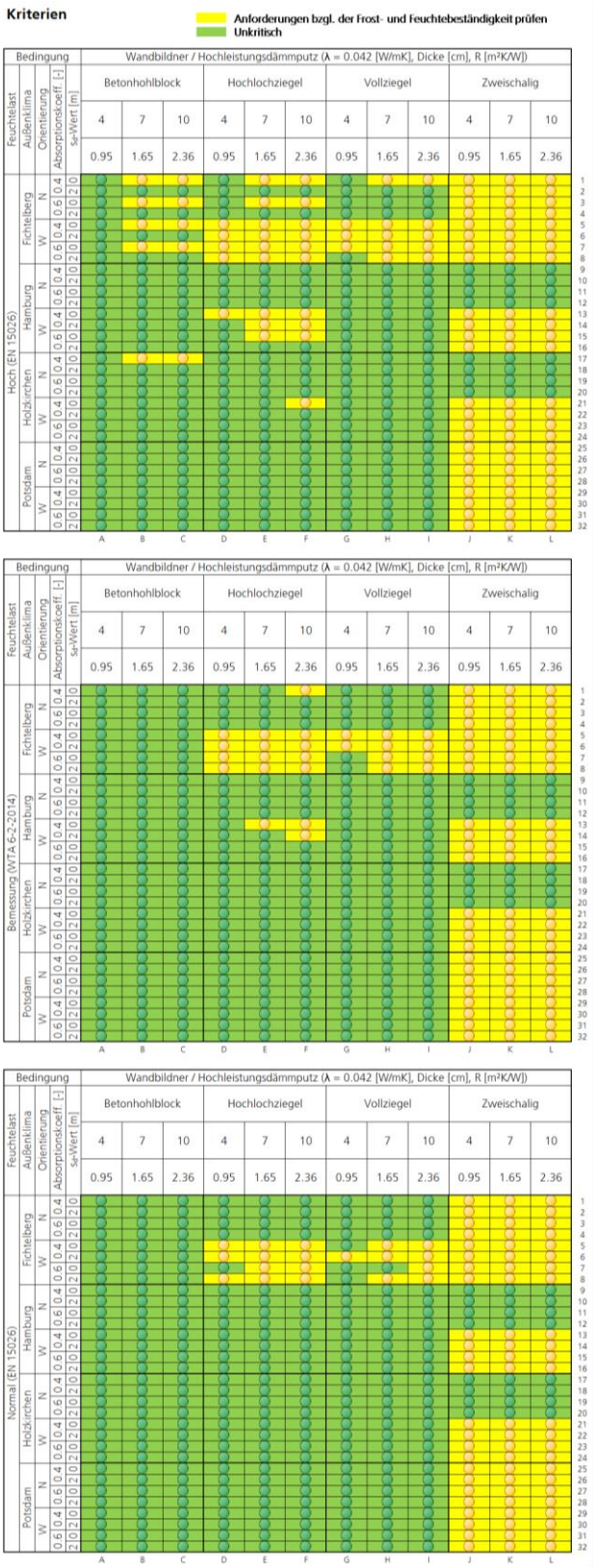


Abb. A.3. 36: Zusammenfassende Bewertung für den Hochleistungsdämmputz im zweiten Jahr zur Berücksichtigung der Einbaufeuchte bei Putzen.

A.3.7 Mineral-Dämmplatte

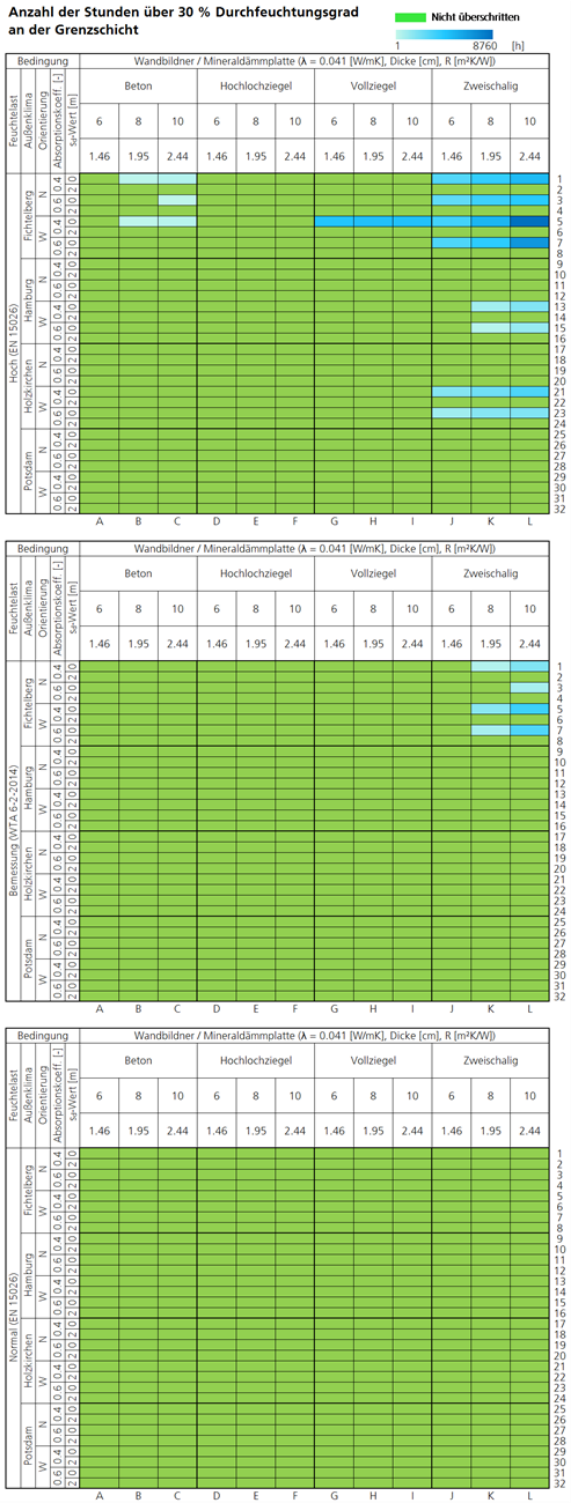


Abb. A.3. 37:Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

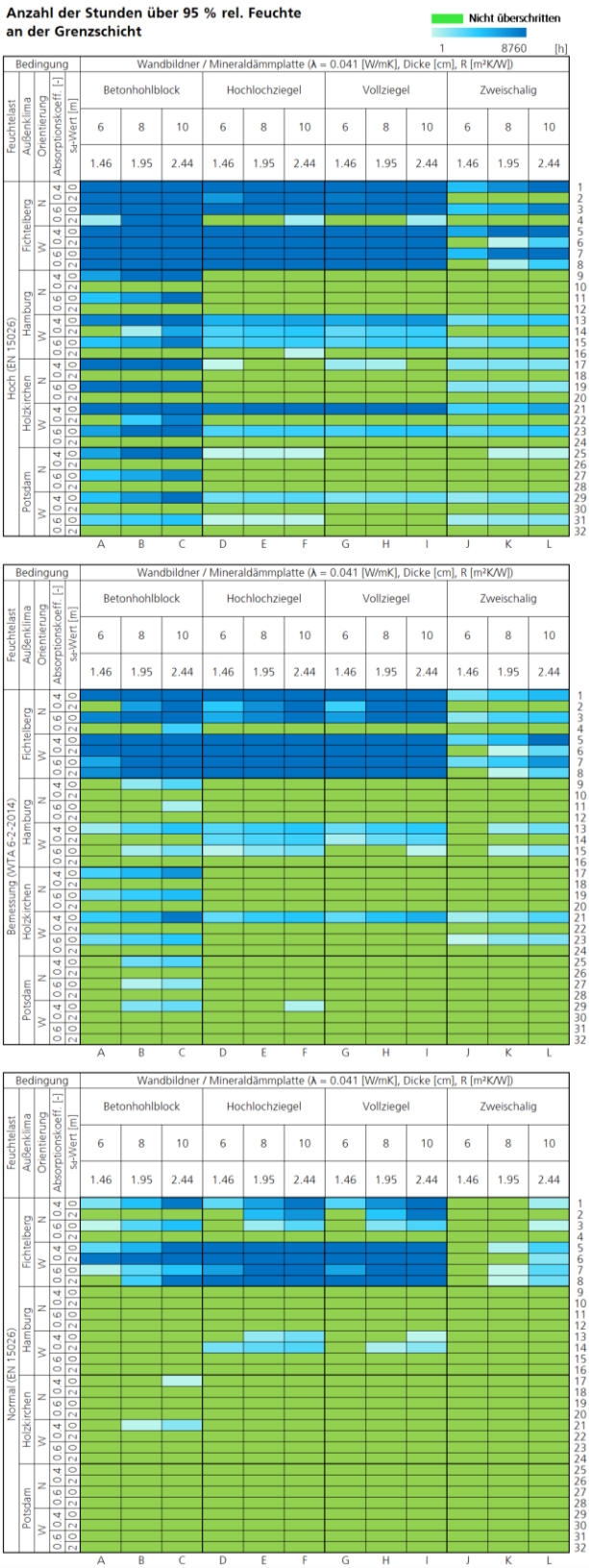


Abb. A.3. 38: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

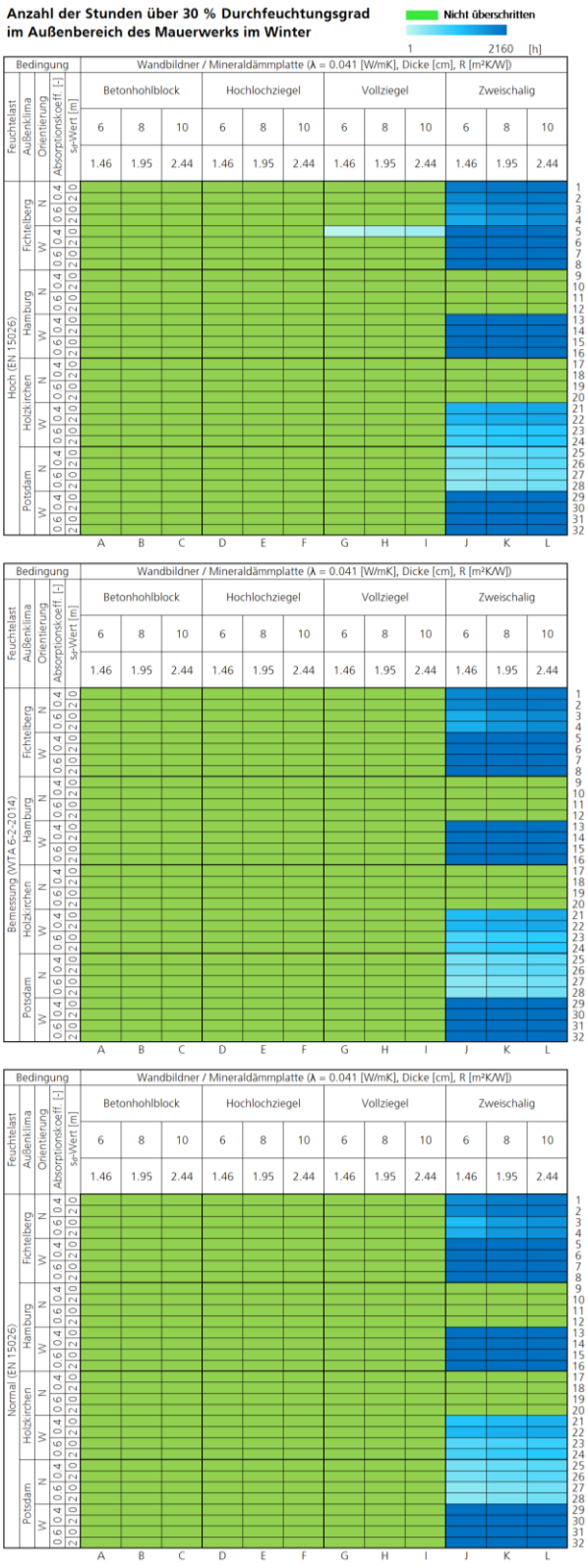


Abb. A.3. 39: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5 cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

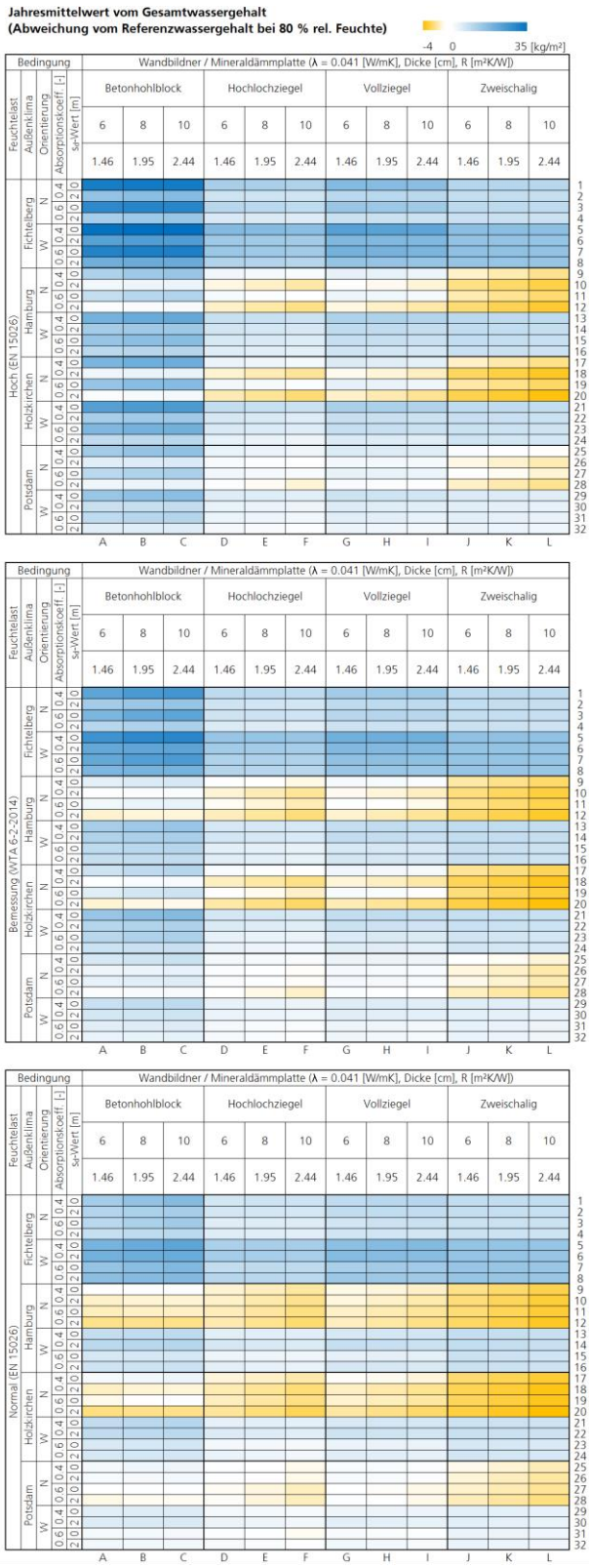


Abb. A.3. 40: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte bei Verwendung eines Leichtmörtels. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt.

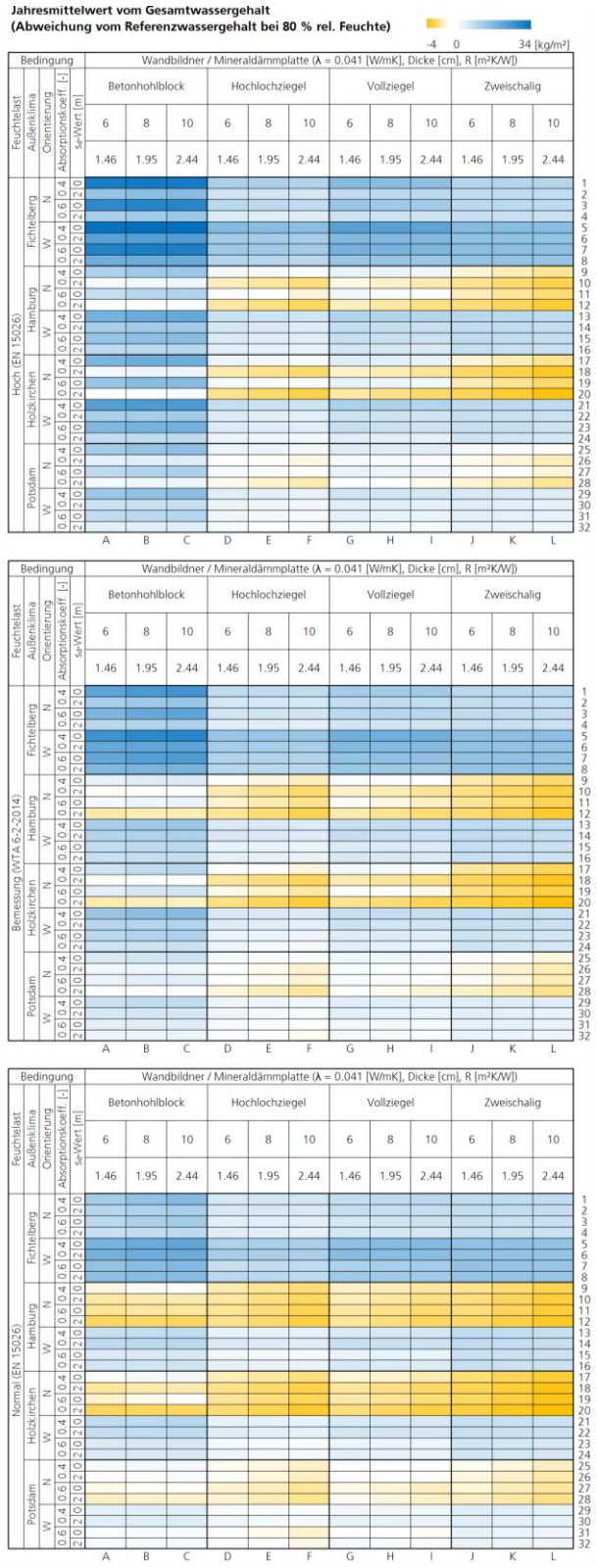


Abb. A.3. 41: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte bei Verwendung eines Dünnbettmörtels. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt.

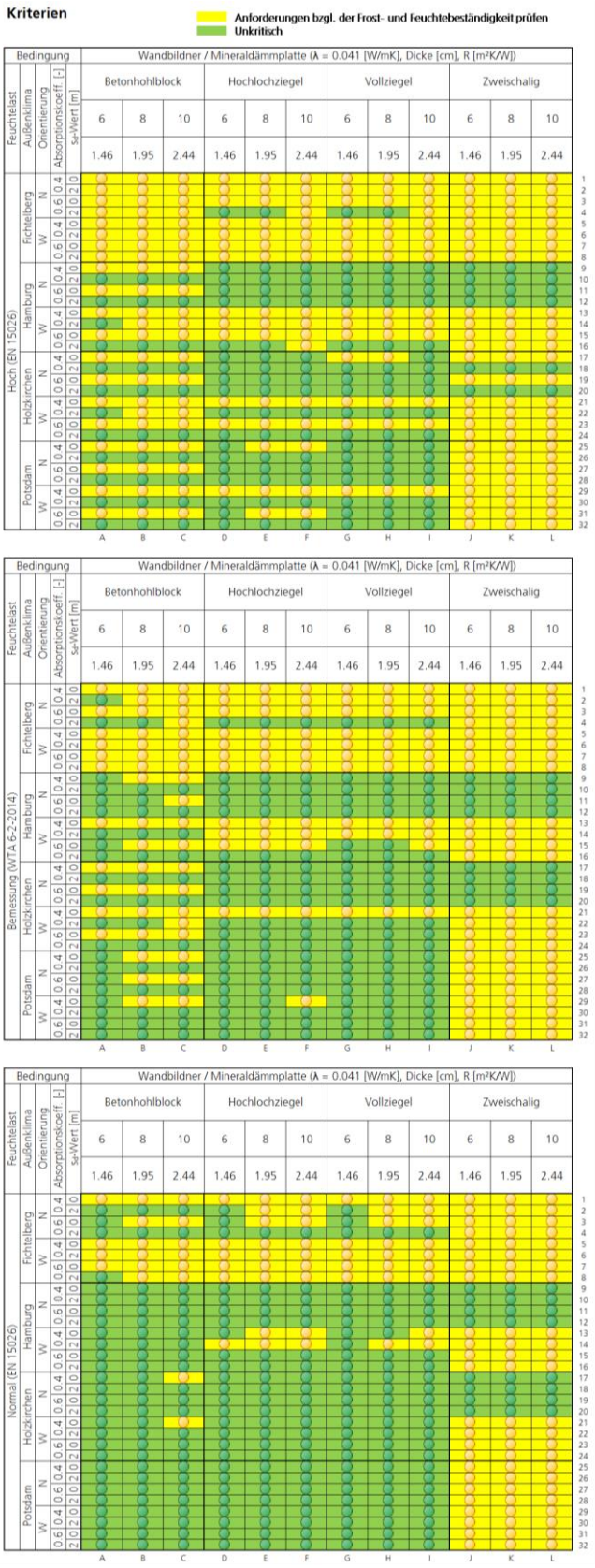


Abb. A.3. 42: Zusammenfassende Bewertung für die mineralische Dämmplatte mit dem Leichtmörtel.

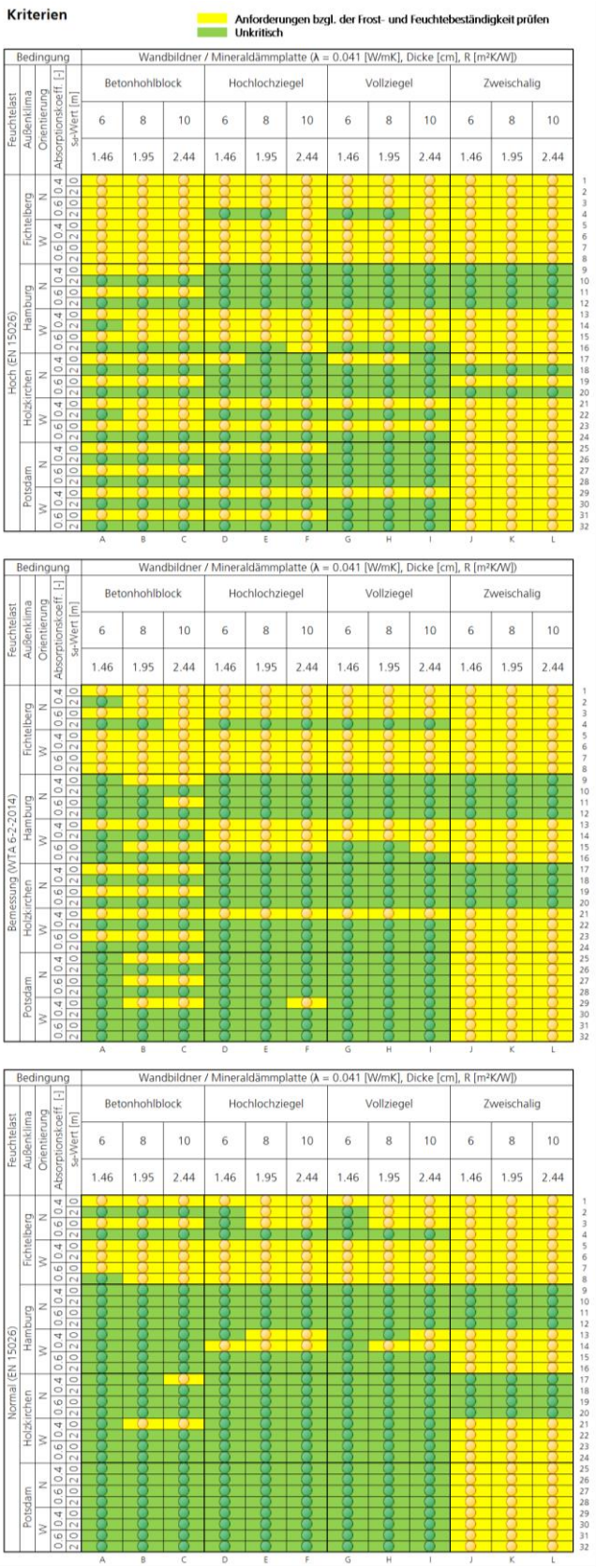


Abb. A.3. 43: Zusammenfassende Bewertung für die mineralische Dämmplatte mit dem Dünnbettmörtel.

A.3.8 Organische Aerogel-Dämmplatte

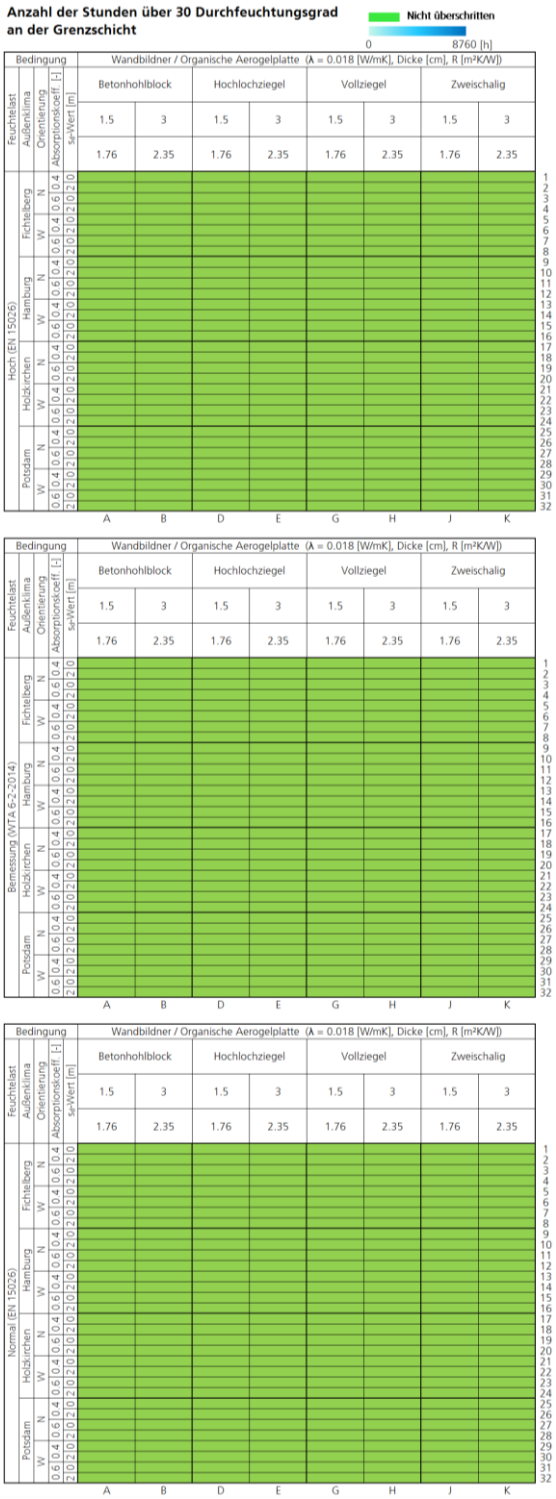


Abb. A.3. 44:Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

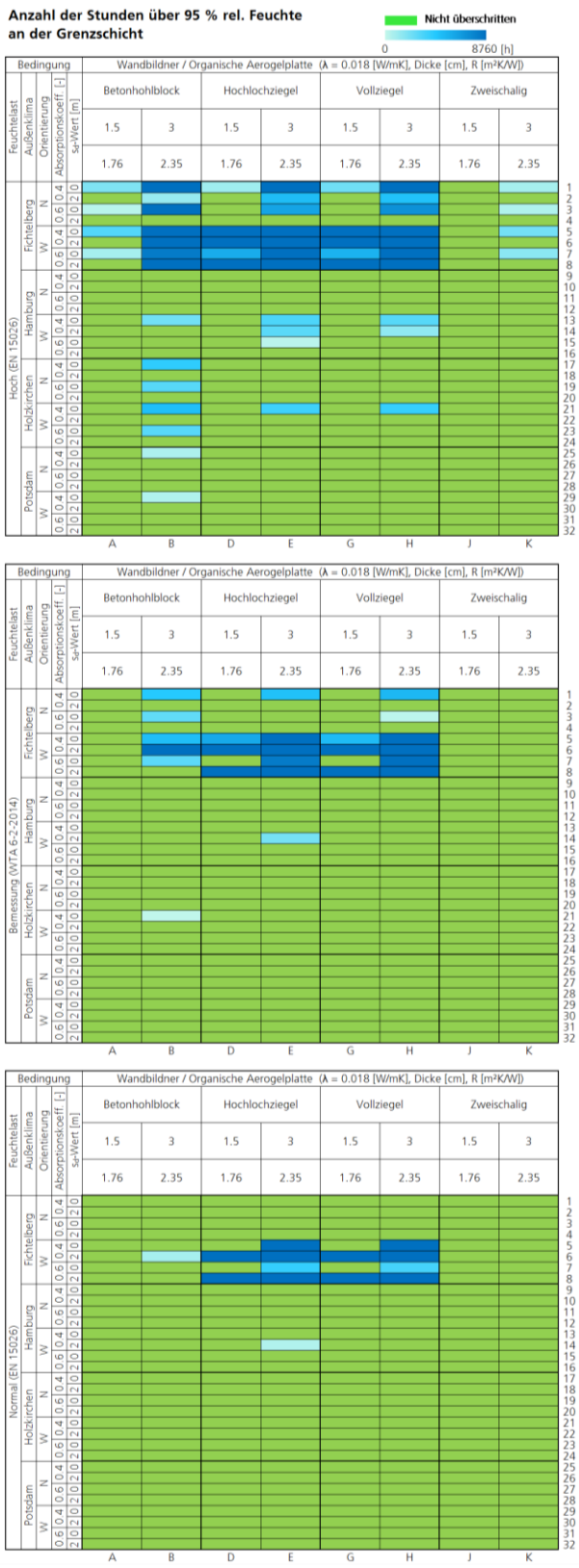


Abb. A.3. 45: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

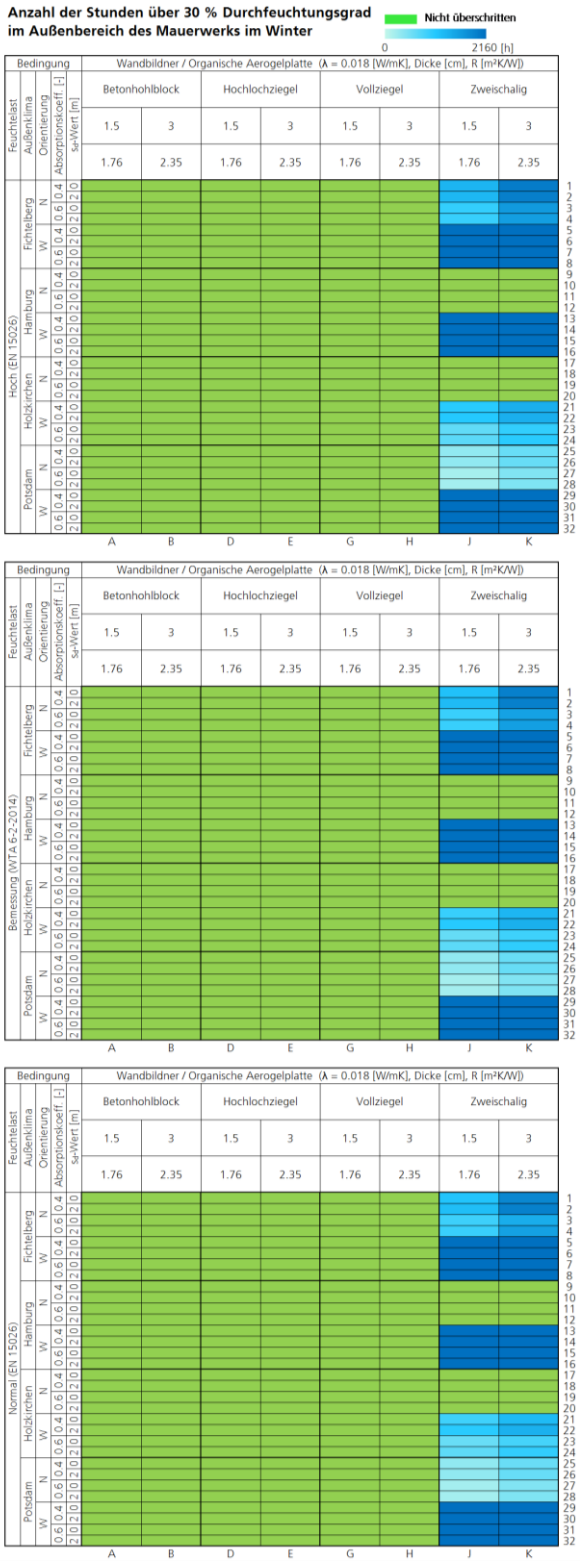


Abb. A.3. 46: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5 cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

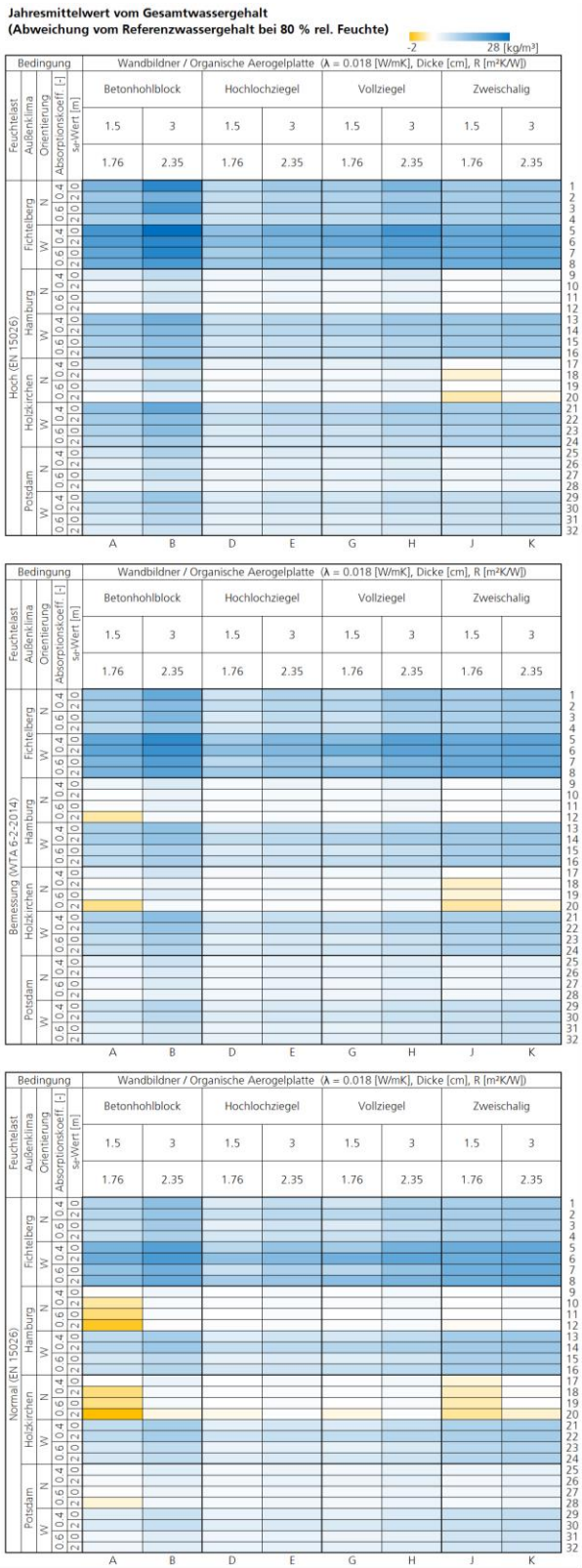


Abb. A.3. 47: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt.

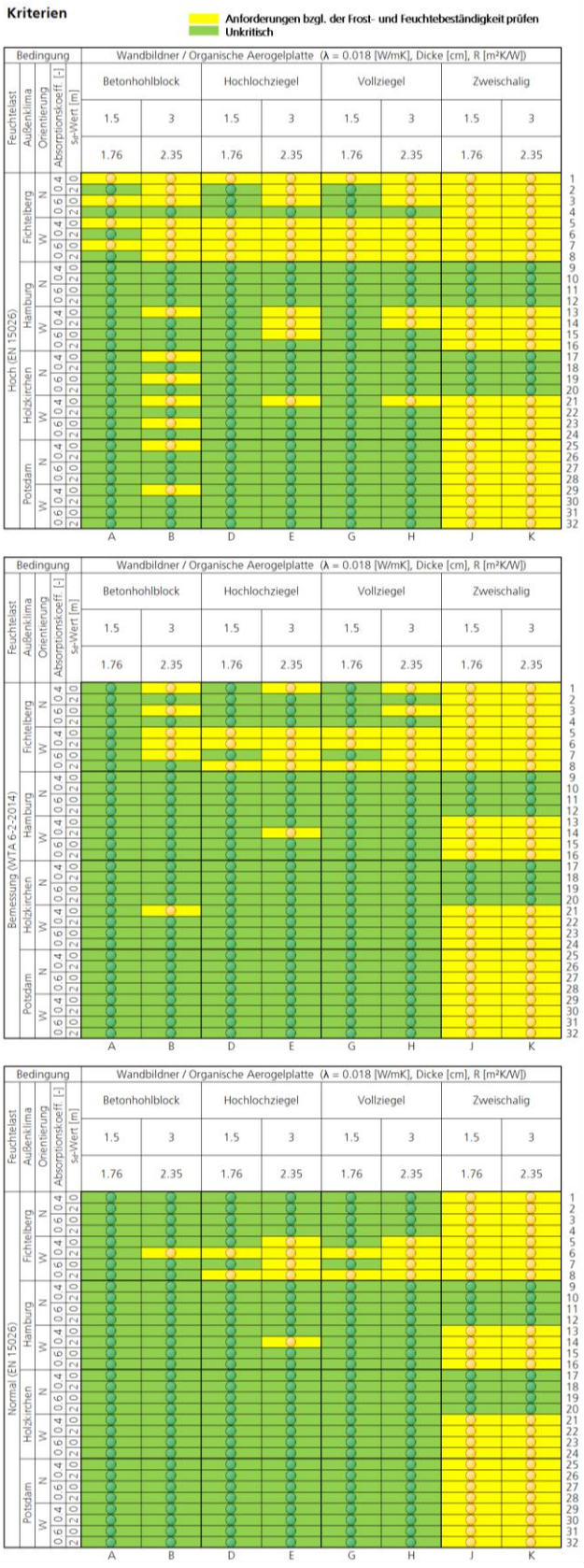


Abb. A.3. 48: Zusammenfassende Bewertung für die organische Aerogel-Dämmplatte.

A.3.9 Mineralische Aerogel-Dämmplatte

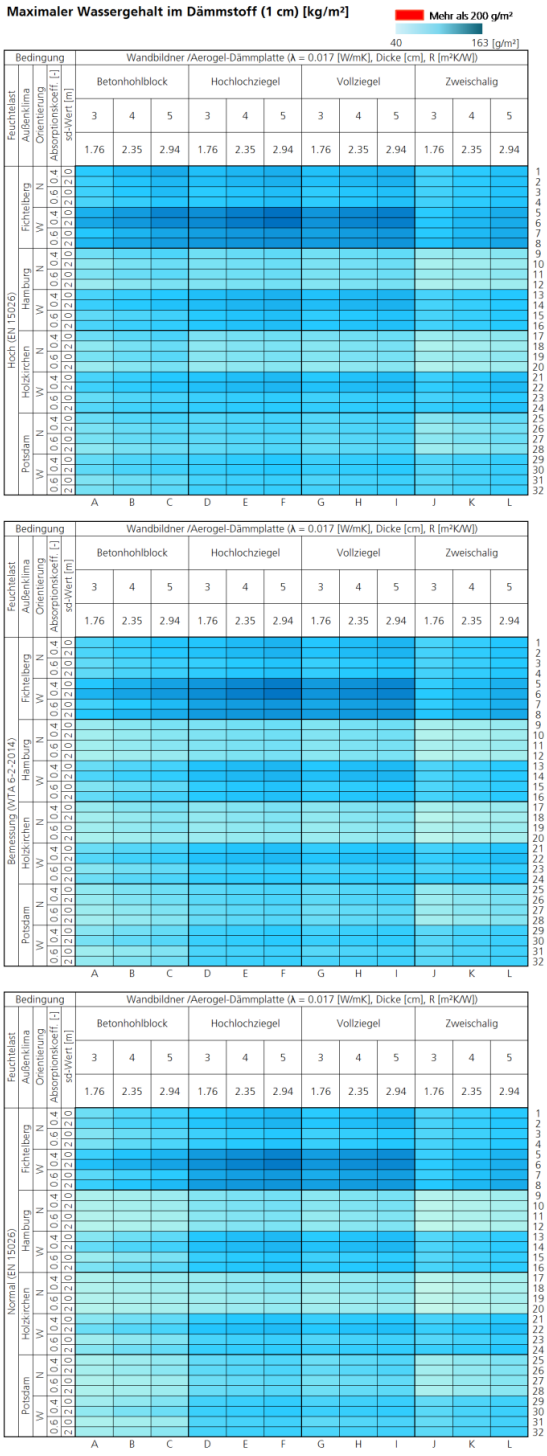


Abb. A.3. 49: Bewertung der maximalen Tauwassermenge der mineralischen Aerogel-Dämmplatte. Mit zunehmenden Wassergehalt nimmt die blaue Färbung zu, bei einem Überschreiten des Grenzwertes von 200 g/m² nach der DIN EN ISO 13788 wird die Variante in rot eingefärbt.

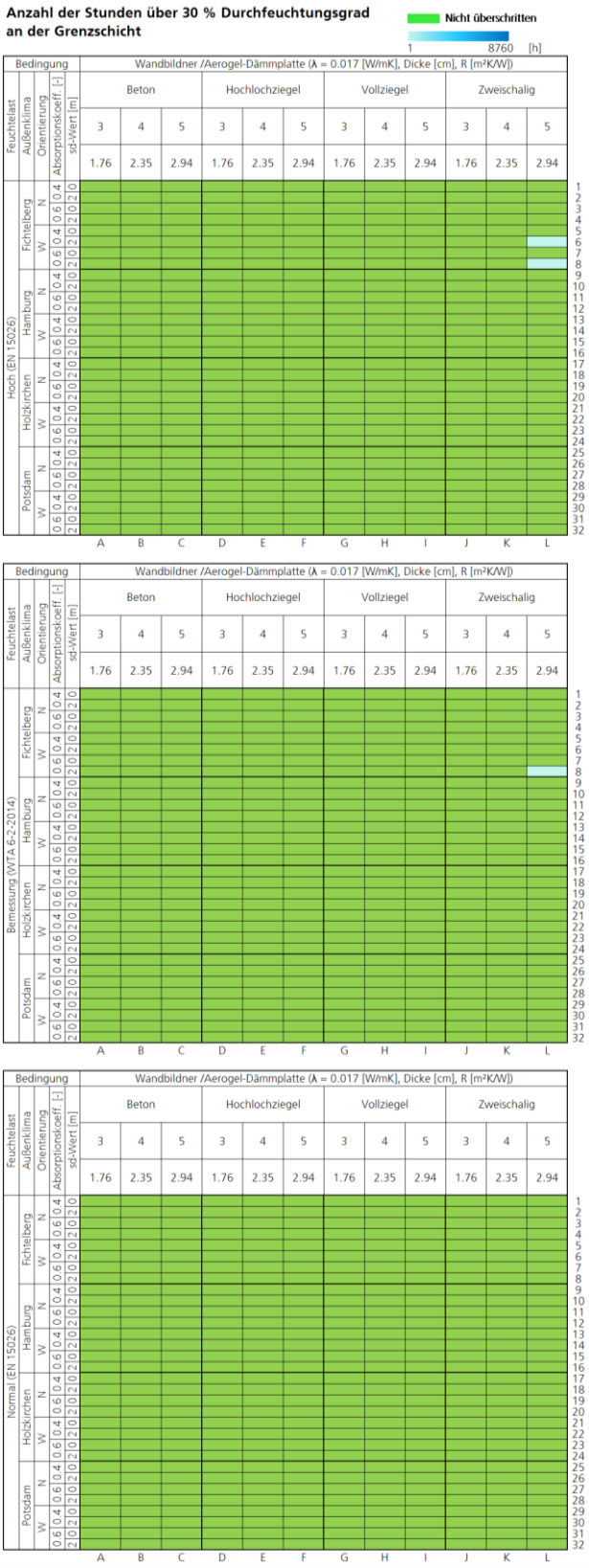


Abb. A.3. 50:Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30 %. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

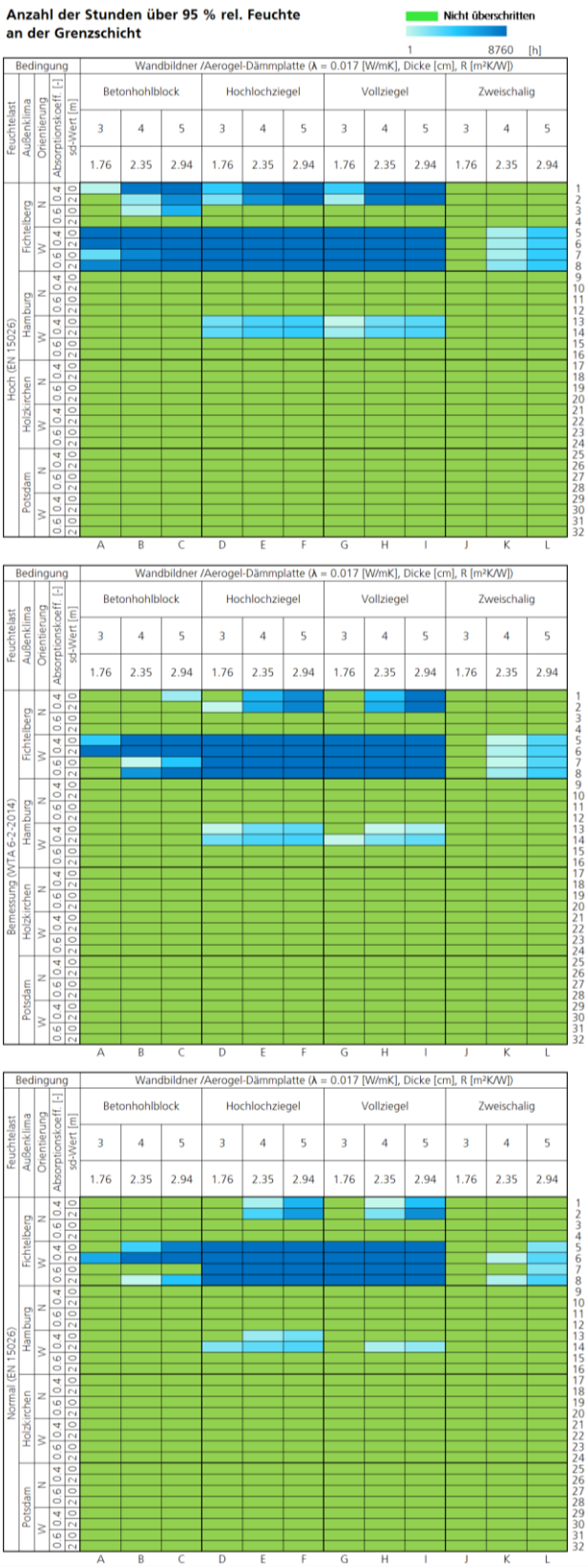


Abb. A.3. 51: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95 % im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

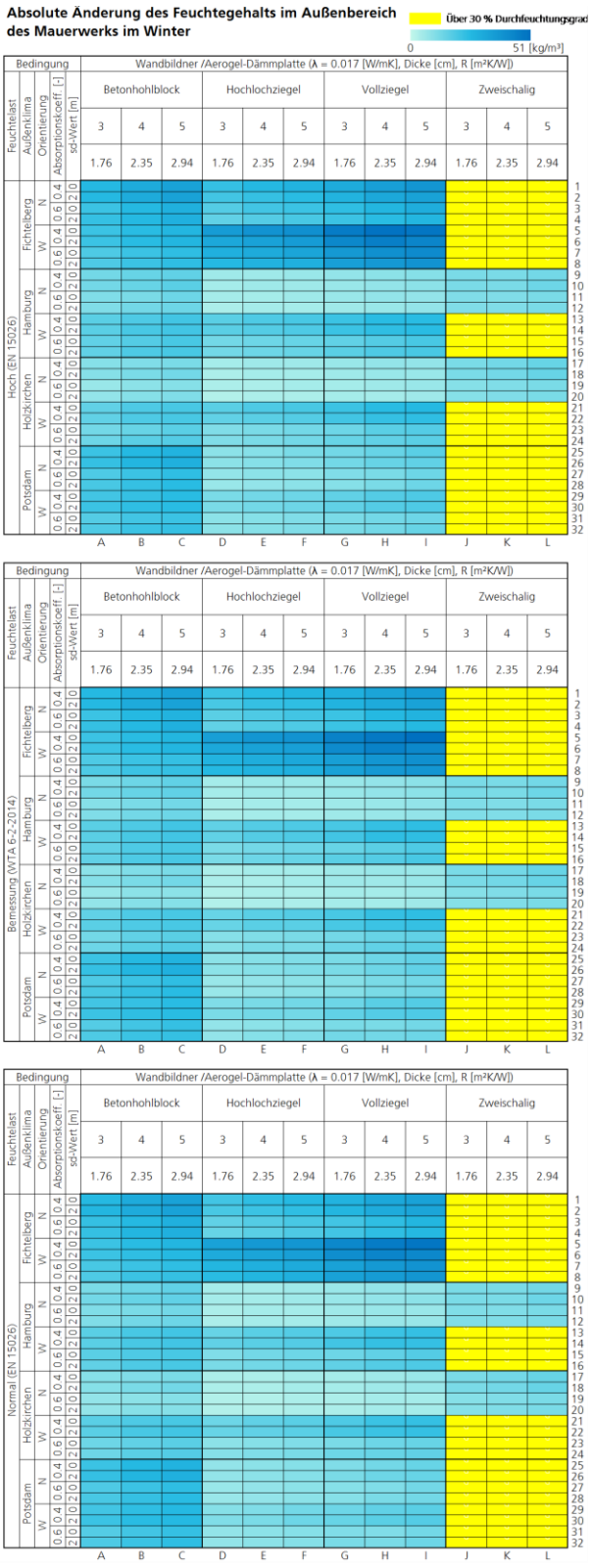


Abb. A.3. 52: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5 cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

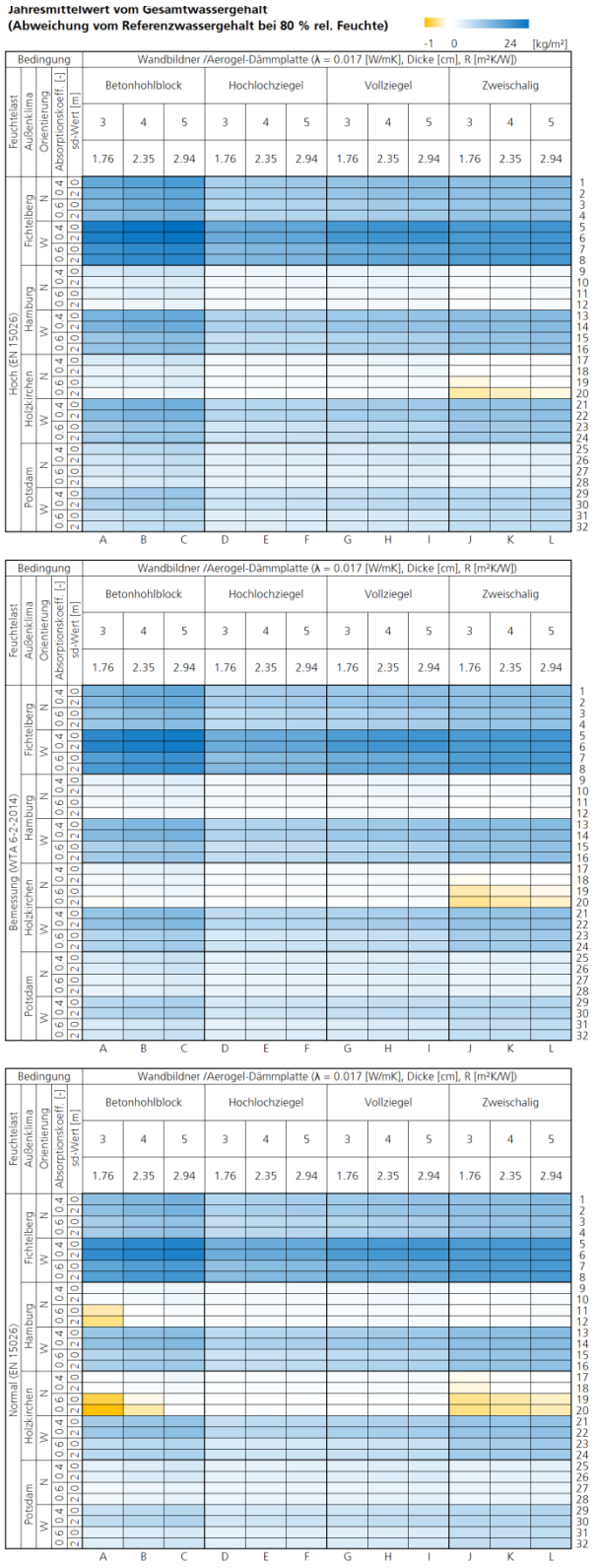


Abb. A.3. 53: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt.

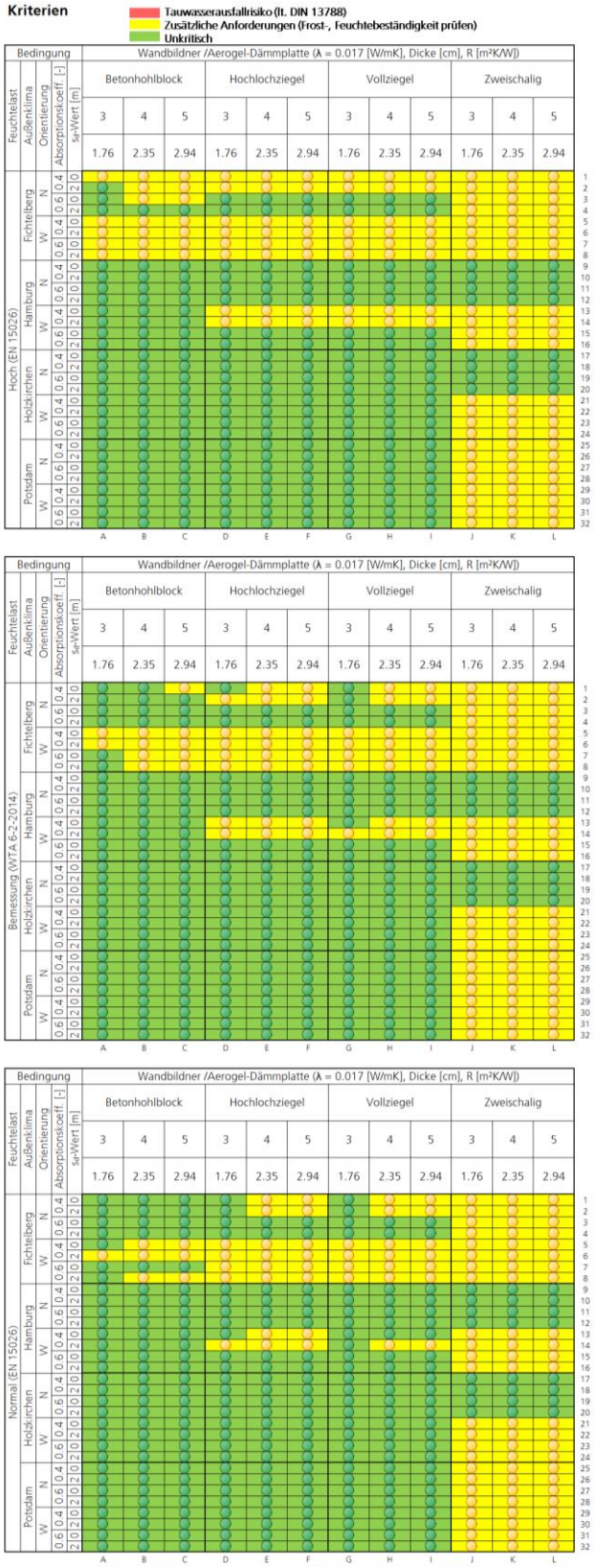


Abb. A.3. 54: Zusammenfassende Bewertung für mineralische Aerogel-Dämmplatte.

A.3.10 EPS-Innendämmung als Verbund-Dämmplatte und als verputztes System

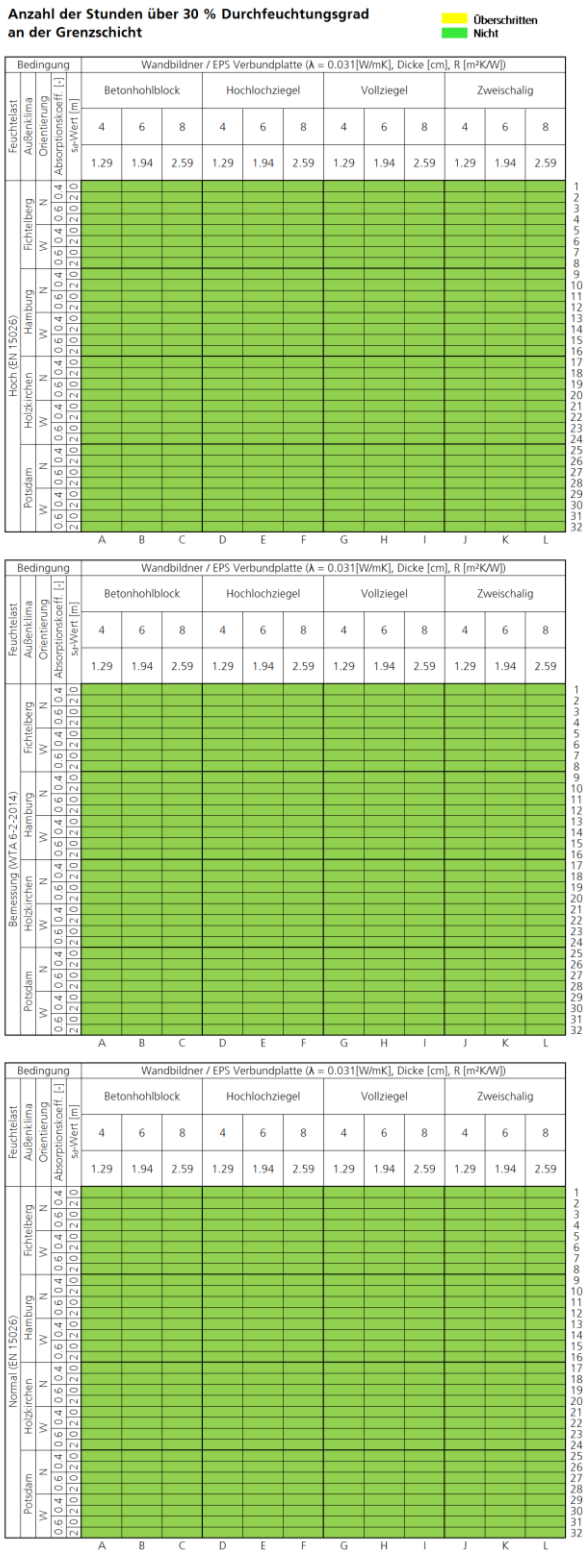


Abb. A.3. 55:Überschreitungsdauer des nach WTA 6-5 kritischen Durchfeuchtungsgrades von 30%. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung im Bereich der Grenzschicht kommt.

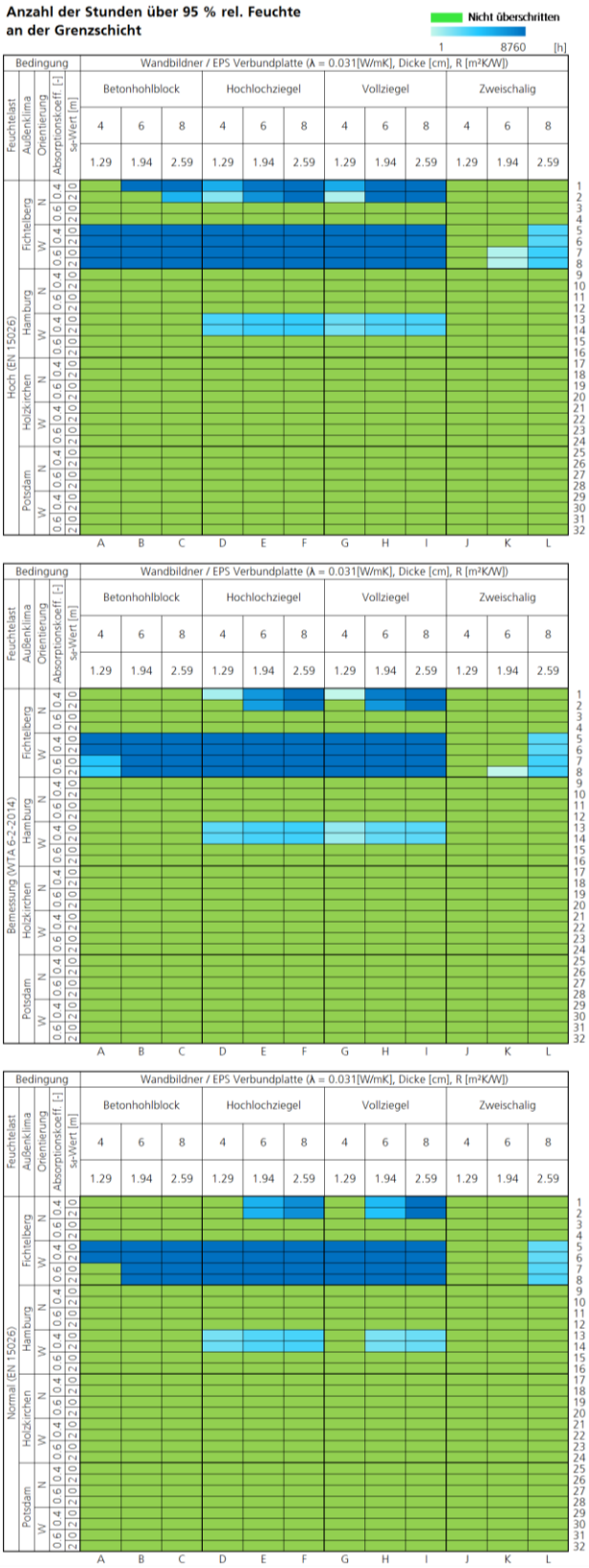


Abb. A.3. 56: Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt.

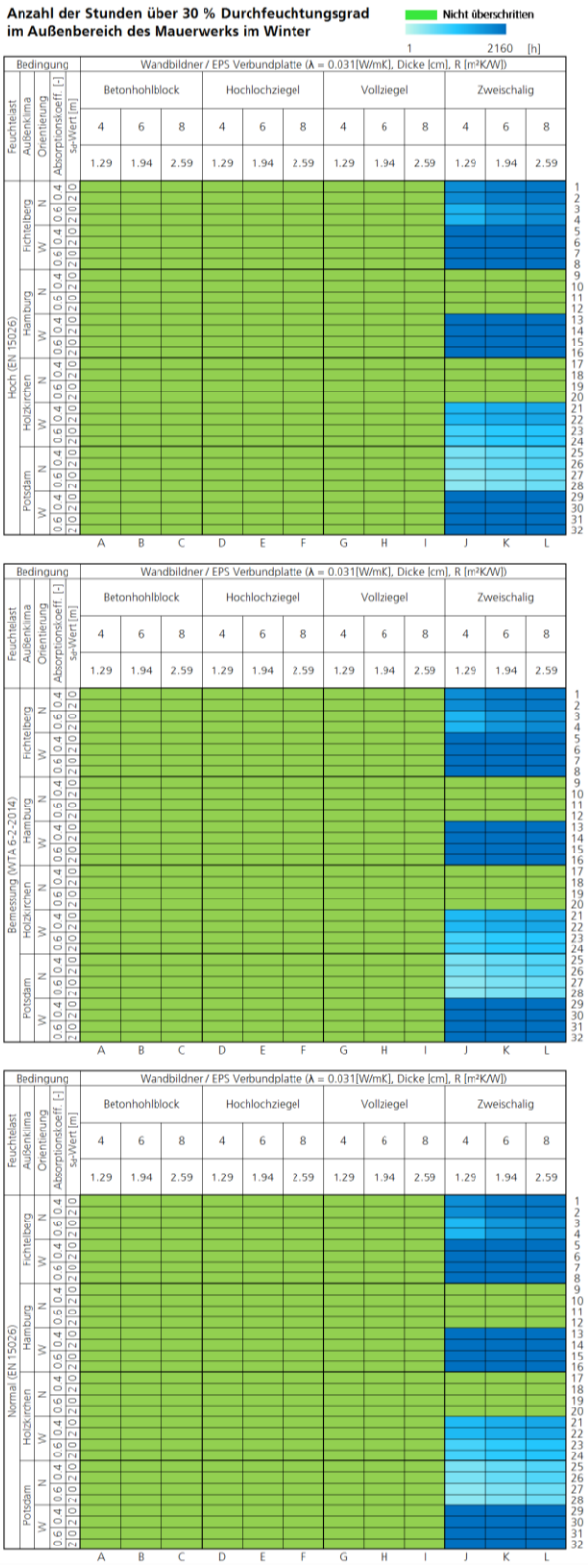


Abb. A.3. 57: Bewertung in Anlehnung an den kritischen Durchfeuchtungsgrad nach WTA 6-5 für das Mauerwerk 5cm hinter der Außenoberfläche. Dargestellt ist die Absolute Änderung gegenüber dem jeweiligen Bestandsfall. Gelb bedeutet eine Überschreitung des 30%.igen Durchfeuchtungsgrades, der volumenbezogene Wassergehalt in graduell in blau dargestellt.

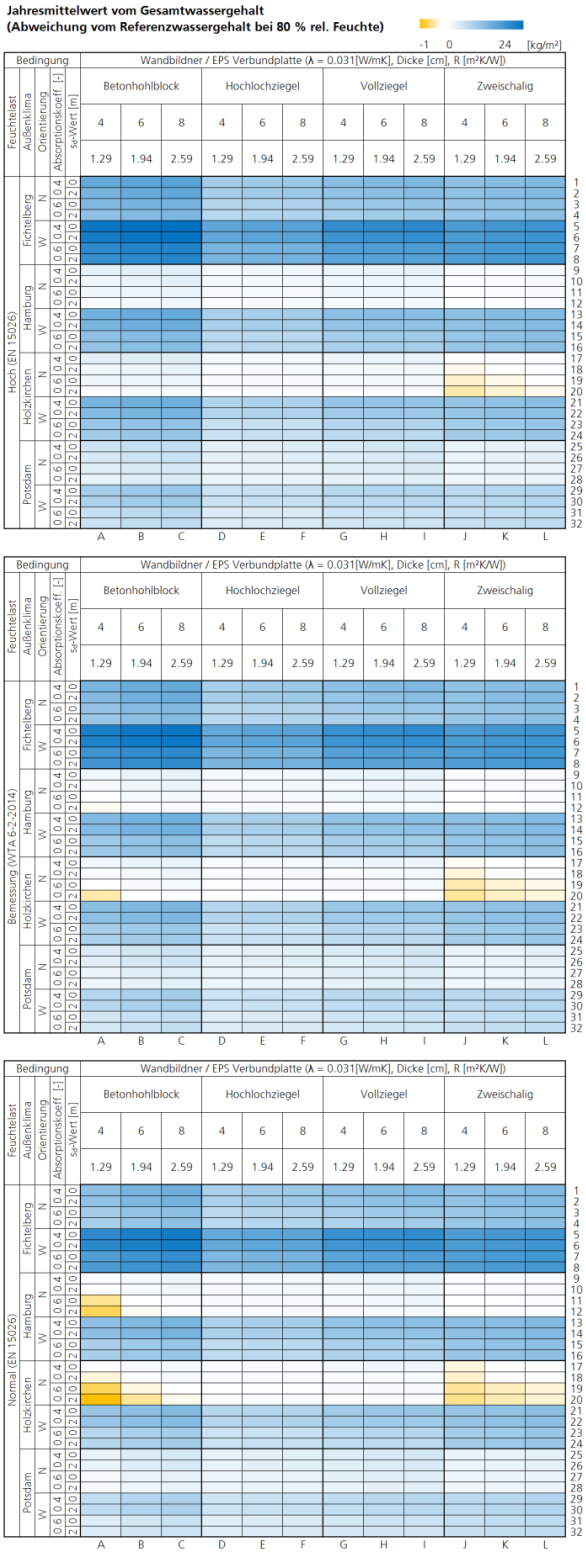


Abb. A.3. 58: Veränderung im Gesamtwassergehalt der Konstruktionen im Vergleich zum Referenzwassergehalt bei 80% rel. Luftfeuchte. Die blaue Einfärbung weist eine Auffeuchtung der Konstruktion aus, während die graduelle gelbe Färbung eine Austrocknung anzeigt. Das Beispiel entspricht dem Verhalten bei einer hohen inneren Feuchtelast.

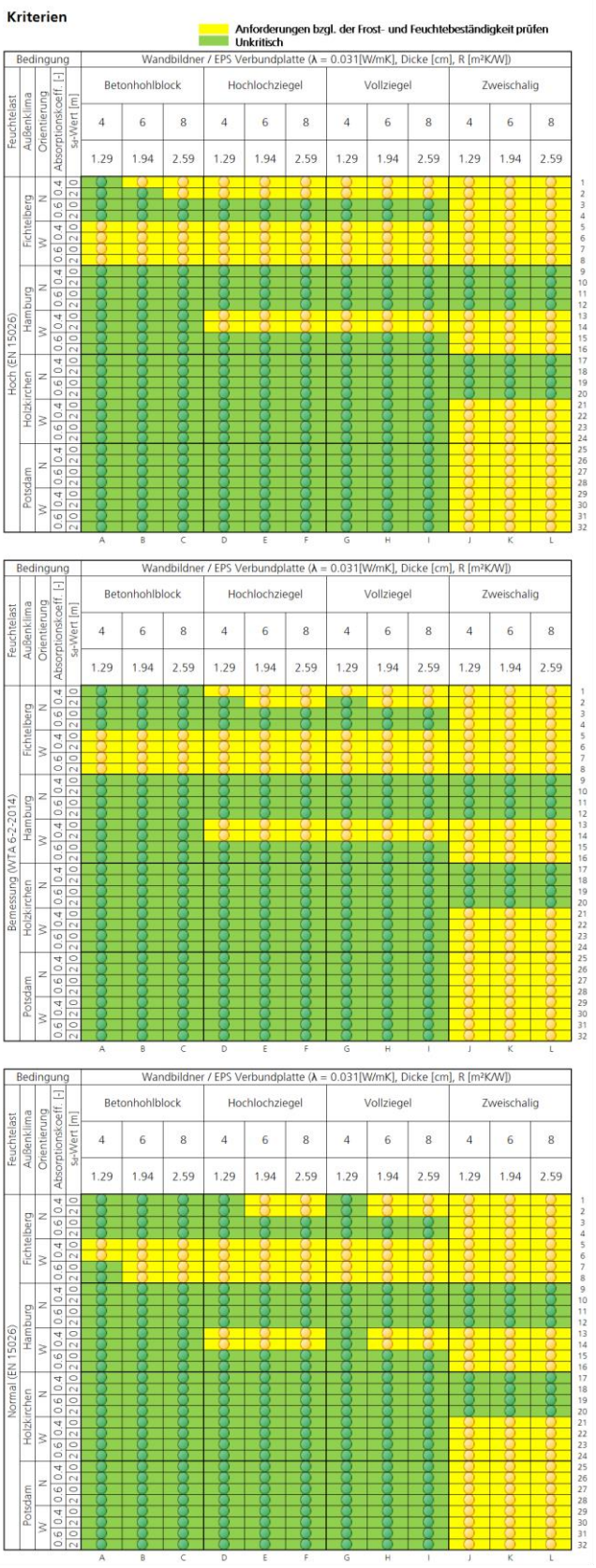


Abb. A.3. 59: Zusammenfassende Bewertung für die Verbundplatte mit grauem EPS.

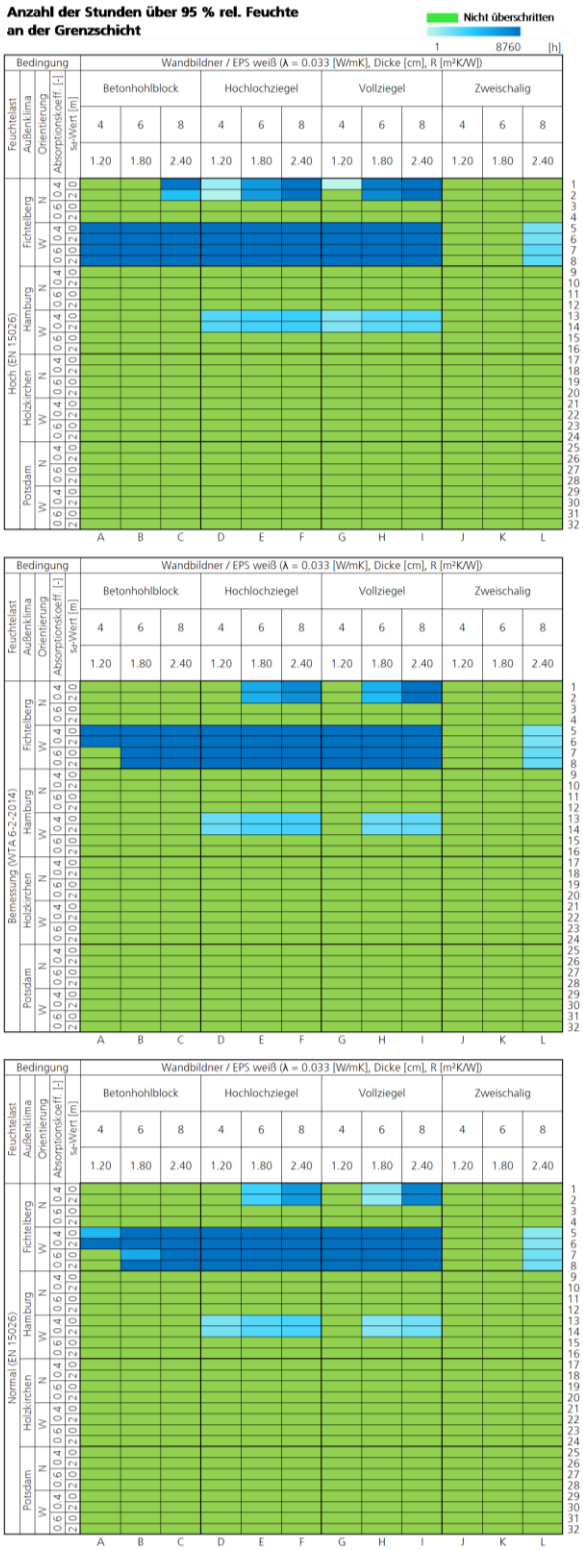


Abb. A.3. 60: Vergleichsergebnisse bei Verwendung der weißen EPS Platte. Überschreitungsdauer der nach WTA 6-5 kritischen rel. Porenluftfeuchte von 95% im Bereich der Grenzschicht. Eine grüne Färbung bedeutet, dass es zu keiner Überschreitung kommt. Für den Fall einer Überschreitung wird die jeweilige Variante graduell in blau eingefärbt

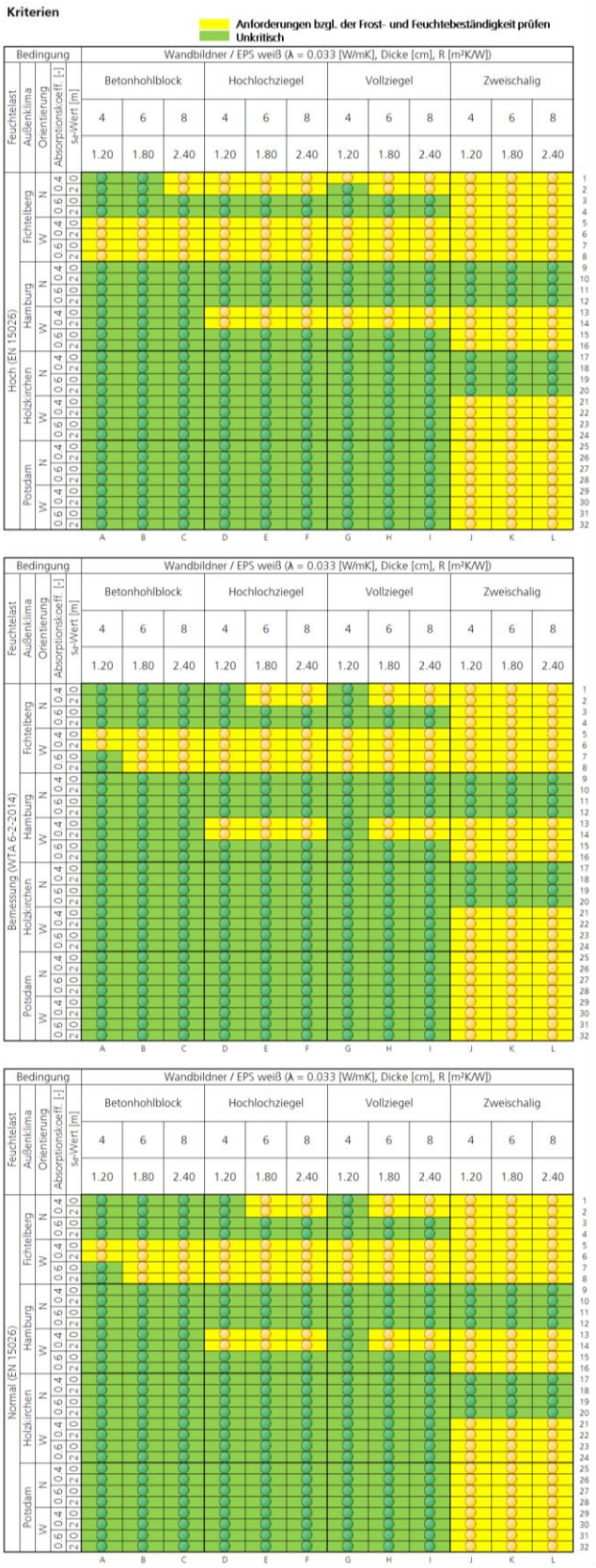


Abb. A.3. 61: Zusammenfassende Bewertung für eine weiße EPS Dämm

4 Berechnungen und deren Validierung von 2- und 3-dimensionalen Wärmebrücken bei Anschlussdetails mit Innendämmung

4.1 Einführung

4.1.1 Hintergrund und Problemstellung

Das hygrothermische Verhalten einer Konstruktion wird durch die Installation einer Innendämmung aufgrund der Veränderungen im Trocknungsverhalten und einer Verschiebung des Taupunkts erheblich beeinträchtigt. Auch kühlt die Bestandskonstruktion während der Heizperiode deutlich stärker aus und muss daher eine ausreichende Resistenz gegen Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen aufweisen. Aufgrund ungenügend genauer Kenntnisse und den oben beschriebenen Mechanismen sind Innendämmungen beim Anwender oft negativ behaftet und gehen meist auch mit dem Gedanken erhöhter Schimmelrisiken einher, da in Bereichen von Bauteilanschlüssen, die die Dämmebene durchstoßen (einbindende Decken etc.), die Wärmebrückenwirkung durch die innenseitige Dämmschicht verstärkt wird. Durch die Wärmebrückenwirkung dieser einbindenden Bauteile nach der Anbringung der Innendämmung und die dadurch resultierende niedrigere Oberflächentemperatur und somit höhere relative Luftfeuchte, wird das Schimmelpilzwachstum im Bereich der Bauteilanschlüsse begünstigt. Deshalb müssen Innendämmmaßnahmen besonders sorgfältig geplant und ausgeführt werden.

Durch die verstärkte Wärmebrückenwirkung sind bei Innendämmmaßnahmen auch die punktförmigen Wärmebrücken (in Eckpunkten von Bauteilanschlüssen) von Bedeutung, die bei außenseitig gedämmten Konstruktionen meist unerheblich sind. Nach den Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, wie sie in Deutschland in der bauaufsichtlich eingeführten Norm DIN 4108-2 (S.17) festgelegt sind, müssen punktförmige Wärmebrücken jedoch keinen gesonderten Nachweis gegenüber der Schimmelgefahr erbringen. Durch den in der Norm geforderten Mindestwert des Temperaturfaktors an der linienförmigen Wärmebrücke (im Bereich von Bauteilkanten) wird in der Norm auch die Einhaltung bei punktförmigen Wärmebrücken angenommen. An der punktförmigen Wärmebrücke (meist in Bauteilecken) prägt sich der Wärmebrückeneffekt bei innen gedämmten Bauteilen deutlich stärker aus als an der linienförmigen Wärmebrücke.

So stellt sich die Frage, ob der durch die Norm geforderte Mindestwert des Temperaturfaktors an linienförmigen Wärmebrücken auch bei Innendämmung an den punktförmigen Wärmebrücken die Sicherheit der Konstruktion gewährleistet.

4.1.2 Zielsetzung

Aus diesen Gründen soll der Zusammenhang der niedrigsten raumseitigen Oberflächentemperatur an linienförmigen Wärmebrücken (2D Wärmebrückensimulation) zu anliegenden punktförmigen Wärmebrücken (3D Wärmebrückensimulation) an verschiedenen Bestandsbauteilkonstruktionen mit Innendämmung aufgezeigt werden.

Durch Simulation mit einem Finite-Elemente Computerprogramm soll versucht werden diese Abhängigkeit herauszuarbeiten und anschließend darzustellen. Um die niedrigsten

Oberflächentemperaturen der Anschlussdetails zu ermitteln, werden umfangreiche Wärmebrückenberechnungen relevanter Anschlussdetails durchgeführt. Die Berechnungen schließen Parameterstudien zur Variation der Bestandkonstruktion und der Innendämmung ein. Es soll aus der Analyse der Berechnungsergebnisse ein Modell erstellt werden, welches die Umrechnung eines Temperaturfaktors aus einer zweidimensionalen Wärmebrückenberechnung in einen Temperaturfaktor einer entsprechenden dreidimensionalen Wärmebrücke erlaubt.

So sollen Anschlusssituationen mit verstärkter punktförmiger Wärmebrücke aufgrund nachträglich aufgebrachter Innendämmung mit weniger Rechenaufwand besser beurteilt werden. Durch zusätzliche Simulationen unter instationären Randbedingungen mit realen Klimadaten soll der Temperaturfaktor bewertet werden. Aus den Simulationsergebnissen unter instationären Bedingungen soll auf das Risiko des Schimmelwachstums geschlossen werden. Diese Ergebnisse werden mit den unter stationären Bedingungen berechneten Temperaturkorrekturfaktoren abgeglichen, um für diese sinnvolle Grenzwerte festzulegen.

Schlussendlich kann damit auf Basis einer einfachen zweidimensionalen Wärmebrückenberechnung oder vorliegenden Werten für Temperaturkorrekturfaktoren die Gebrauchstauglichkeit einer innenseitig gedämmten Konstruktion unter feuchtetechnischen Gesichtspunkten bewertet werden.

Des Weiteren soll die Genauigkeit von dreidimensionalen Wärmebrückenberechnungen anhand von Validierungsmessungen an zwei repräsentativen Anschlussdetails bestimmt werden.

4.1.3 Vorgehen

Der Zusammenhang der Oberflächentemperaturen an linienförmigen zu punkförmigen Wärmebrücken soll mithilfe zwei- und dreidimensionaler numerischer Berechnung des Wärmedurchgangs bei innengedämmten Bestandsbauten unter stationären Randbedingungen untersucht werden. Anschließend soll durch eine Regressionsanalyse eine Modellgleichung für o.g. Zusammenhang aufgestellt werden, mit der die niedrigste raumseitige Oberflächentemperatur einer punktförmigen Wärmebrücke aus einem Berechnungsergebnis einer zweidimensionalen Wärmebrückenberechnung einer linienförmigen Wärmebrücke direkt berechnet werden kann. Außerdem sollen dynamische thermische Simulationen derselben Konstruktionen mit realen Klimarandbedingungen durchgeführt werden, um anschließend das Schimmelpilzrisiko mithilfe eines biohygrothermischen Simulationsprogramms abzuschätzen.

4.2 Grundlagen

4.2.1 Wärmebrücken

Wärmebrücken sind thermische Schwachstellen in der Konstruktion eines Gebäudes, die zu einer höheren Wärmestromdichte im Bereich der Wärmebrücke führen. Diese Änderung führt zu lokal niedrigeren inneren Oberflächentemperaturen an der Bauteiloberfläche, welche je nach Ausprägung problematisch in Bezug auf Wohlbefinden und hygienischen Feuchteschutz sein können. Dabei gibt es verschiedene Arten von Wärmebrücken. Man unterscheidet zwischen

materialbedingten, konstruktionsbedingten und geometrisch bedingten Wärmebrücken. Meistens liegen aber Kombinationen aus mehreren Arten vor.

4.2.2 Arten von Wärmebrücken

Materialbedingte Wärmebrücken
Materialbedingte Wärmebrücken entstehen bei zusammengesetzten Bauteilen, wie z.B. einer Fachwerkwand oder einem Sparrendach. Diese Konstruktionen zeichnet sich durch Materialwechsel entlang der Bauteilfläche aus, beispielsweise Holzsparren, die an gedämmte Gefache grenzen. Wenn diese Baustoffe unterschiedliche thermische Eigenschaften besitzen wird der resultierende Wärmestrom durch den Materialwechsel beeinflusst. Voneinander abweichende Wärmeströme und Oberflächentemperaturen sind die Folge. Charakteristisch ist das raumseitige Abfallen der Oberflächentemperatur im Bereich der Bauteilbereiche mit dem geringeren Wärmedurchlasswiderstand.

Konstruktionsbedingte Wärmebrücken
Konstruktionsbedingte Wärmebrücken entstehen durch Querschnittsveränderungen in Bauteilen. Dies können u.a. Bauteile wie Heizkörpernischen, Installationsschlitze, Fensterlaibungen, Fensterstürze und Rollladenkästen sein.

Geometriebedingte Wärmebrücken
Geometrische Wärmebrücken entstehen beispielsweise im Gebäudeaußeneck aufgrund von unterschiedlichen Flächenverhältnissen der wärmeaufnehmenden Innenoberfläche und der wärmabgebenden Außenoberfläche. Im Gebäudeeck tritt ein erhöhter Wärmestrom auf.

Eindimensionale Wärmebrücken
Eindimensionale Wärmebrücken werden durch unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten λ verursacht, die bei Stoffunterschieden innerhalb eines Bauteils auftreten, z.B. bei Stahlbetonstützen im Mauerwerk, Fachwerkkonstruktionen, Ringankern oder Deckenauflagern.

Zweidimensionale Wärmebrücken
Zweidimensionale Wärmebrücken entstehen an den Raumkanten, also dort, wo die innere und die äußere Bauteilfläche unterschiedlich groß sind. Zweidimensionale Wärmebrücken treten z.B. an Gebäudeecken, Auskragungen wie Balkonplatten, Rück- und Vorsprüngen in der Gebäudehülle oder bei Deckenauflagern auf.

Dreidimensionale Wärmebrücken
Dreidimensionale Wärmebrücken entstehen an Gebäudeecken. Sie entstehen überall dort, wo drei oder mehr Bauteile aufeinandertreffen oder ein Bauteil punktuell ein anderes berührt oder durchstößt. Dreidimensionale Wärmebrücken entstehen beispielsweise an Ecken von auskragenden Bauteilen, an den obersten Außenecken mit Anschluss zum Dach oder an den untersten Außenecken mit Anschluss zur Bodenplatte. Außerdem gehören auch punktförmige Wärmebrücken wie einbindende Stützen und Verankerungen von Wärmedämm-Verbundsystemen zu den dreidimensionalen Wärmebrücken.

In Abb. 4-1 sind die unterschiedlichen Arten der ein-, zwei- und dreidimensionalen Wärmebrücken nochmals schematisch an der Gebäudehülle dargestellt. Die gelben Teilflächen [a] stellen die eindimensionalen Wärmeströme dar, die hellblauen Teilflächen die zweidimensionalen Wärmeströme und [c] symbolisiert die dreidimensionalen Wärmebrücken, die durch das Zusammentreffen von drei zweidimensionalen Wärmebrücken entstehen. Die beschriebenen Wärmebrücken können über Berechnungsmethoden, die in der DIN EN ISO 10211:2015-06 erfasst sind, berechnet werden.

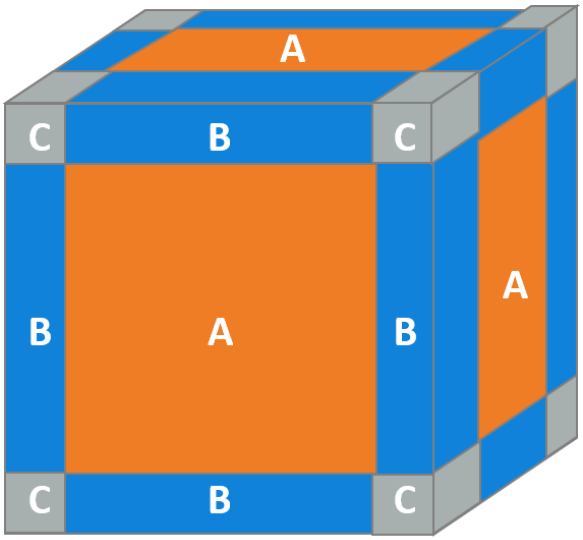


Abb. 4-1: Wärmebrücken an der Gebäudehülle nach DIN EN ISO 10211, eigene Darstellung des FIW München in Anlehnung an Volland et al. 2012.

4.2.3 Kennwerte von Wärmebrücken

Die relevanten Wärmebrückenwirkungen stellen zum einen die im Gegensatz zum ungestörten Bereich der Bauteile niedrigeren Oberflächentemperaturen und zum anderen die im Bereich der Wärmebrücke erhöhten Wärmeverluste dar. Zur Bewertung der Auswirkung sind zwei voneinander unabhängige Kenngrößen definiert: Der dimensionslose Temperaturfaktor f_{Rsi} zum Einschätzen der Oberflächentemperaturen und der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient Ψ in [W/(m·K)] als Maß für den Wärmeverlust.

4.2.3.1 Oberflächentemperaturen

Im Bereich von Wärmebrücken herrschen niedrigere Innenoberflächentemperaturen als im ungestörten Bereich. Dies hängt mit der im Wärmebrückenbereich erhöhten Wärmestromdichte q zusammen. An thermisch homogenen Bauteilen lassen sich Oberflächentemperaturen unter stationären Verhältnissen händisch wie folgt berechnen:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \cdot U \cdot (\Delta\theta) \text{ [°C]}$$

Mit
- θ_{si} Temperatur an der inneren Wandoberfläche in °C
- θ_i Temperatur der Raumluft (Innentemperatur) in °C
- θ_e Temperatur der Außenluft in °C
- R_{si} innerer Wärmeübergangswiderstand in m²K/W

U Wärmedurchgangskoeffizient in W/(m²·K)
$\Delta\theta$ Temperaturunterschied in K; $\Delta\theta = \theta_i - \theta_e$

In homogen aufgebauten Bauteilen (Anordnung an Materialschichten ausschließlich entlang der Bauteilfläche) fließen die Wärmeströme geradlinig in Richtung des Temperaturgefälles. Bei inhomogenen Bauteilen mit unterschiedlichen Wärmedurchlasswiderständen fließt der Wärmestrom nicht nur senkrecht zur Oberfläche, sondern auch parallel dazu. Dies rührt daher, dass aufgrund von unterschiedlichen Flächenverhältnissen von Innen- und Außenseite, die Wärmeverluste verstärkt über Störungen im Bauteil stattfinden oder vermehrt in Gebäudeecken auftreten. Die Isothermen verlaufen im homogenen Bauteil geradlinig. In inhomogenen Bauteilen spreizen sich die Isothermen im Übergangsbereich zum besser leitenden Material auf. Der Zusammenhang zwischen Wärmeströmen und Isothermen besteht darin, dass sie immer senkrecht aufeinander stehen. Mit obenstehender Formel lassen sich Oberflächentemperaturen in homogenen Bauteilen mit senkrecht zur Oberfläche fließenden Wärmeströmen berechnen. Für die Berechnung von Oberflächentemperaturen in inhomogenen Bauteilen sind zweidimensionale Berechnungen mithilfe von numerischen Programmen nötig.

4.2.3.2 Temperaturfaktor f_{Rsi}

Der dimensionslose Temperaturfaktor f_{Rsi} errechnet sich über die innere Oberflächentemperatur θ_{si} und stellt ein Verhältnis der Differenz von innerer Oberflächentemperatur und Außenlufttemperatur sowie der Differenz von innerer Oberflächentemperatur und Außenlufttemperatur dar. Der Oberflächentemperaturfaktor wird wie folgt berechnet:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

In Wärmebrückenkatalogen werden auf das jeweilige Detail bezogene f_{Rsi} Werte je nach Mauerstärke und Wärmeleitfähigkeit der Konstruktion zur Verfügung gestellt. Mit bekannten Größen wie der Raumlufttemperatur und Außentemperatur ergibt sich daraus nach Umstellen der oben genannten Formel die innere Oberflächentemperatur wie folgt:

$$\theta_{si} = f_{Rsi} \times (\theta_i - \theta_e) + \theta_e$$

4.2.3.3 Linearer Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ

Bei zweidimensionalen Wärmebrücken kann der Wärmeverlust auf die Länge des verursachenden Bauteils bezogen werden. Ausgedrückt wird der verursachte Wärmeverlust durch den längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten, den Ψ-Wert. Diese zusätzlichen Wärmeverluste treten beispielsweise an Wandkanten oder Fensterleibungen auf. Punktförmige Wärmebrücken (auch dreidimensionale Wärmebrücken genannt) entstehen z.B. an Gebäudeecken und werden durch den punktförmigen Wärmebrückenkoeffizienten χ erfasst. Zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste nach DIN 4108-6:2003-06 werden jedoch nur die linienförmigen Wärmebrücken berücksichtigt, da die punktförmigen in der Regel einen geringen Einfluss auf die Gesamtbilanz haben und somit vernachlässigt werden können. Ausnahme stellen dabei wiederkehrende punktuelle Wärmebrücken wie beispielsweise Stahlbetonstützen in einer Tiefgarage dar, falls diese Einfluss auf die Energiebilanz haben. Diese müssen einmal berechnet werden und können dann entsprechend der Häufigkeit ihres Vorkommens auf das gesamte Gebäude hochgerechnet werden. Die Wärmebrückenverluste werden über Rechenprogramme bestimmt, die meist die Finite-Element-Methode verwenden.

Für die Erfassung in der Gesamtbilanzierung ist nicht der gesamte Wärmestrom im Wärmebrückenbereich nötig, sondern der zusätzliche Wärmestrom, der im Bereich der Wärmebrücke auftritt. Das Ergebnis der numerischen Berechnungen ist der Gesamtwärmestrom durch das Bauteil bezogen auf eine Wärmebrückenlänge von einem Meter. Den Leitwert L_{2D} erhält man, indem man diesen durch die Differenz der angesetzten Temperaturen für die Randbedingungen innen und außen dividiert. Der Leitwert beschreibt also den fließenden Wärmestrom im gestörten Bereich bezogen auf die Länge der Wärmebrücke und den Temperaturunterschied der angrenzenden Umgebungsluft. Durch folgende Zusammenhänge lässt sich der Ψ-Wert bestimmen:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^{n} U_j \cdot l_j \quad \text{[W/(m·K)]}$$

mit

L_{2D}	thermischer Leitwert der zweidimensionalen Wärmebrücke in W/(mK)
U_j	Wärmedurchgangskoeffizient der ungestörten Bereiche in W/(mK)
l_j	Länge des Bauteils, mit der dessen Fläche berechnet wird in m

4.2.4 Besonderheiten bei Innendämmung

Ein von innen gedämmtes Bauteil verhält sich anders als ein außen gedämmtes. Allgemein erhöht sich die Wärmebrückenwirkung bei Innendämmung durch Bauteilanschlüsse, die die Dämmebene durchstoßen. Im Gegensatz zur Außendämmung, bei der die Gebäudehülle weitgehend vollflächig umschlossen werden kann, entstehen bei Innendämmmaßnahmen Störstellen in der Dämmebene durch an die Außenwand anschließende Bauteile. In Abb. 4-2 ist der Temperaturverlauf bei -5°C Außen- und 20°C Innentemperatur desselben Details als ungedämmte Variante (links), als außengedämmte Variante (Mitte) und als innengedämmte Variante (rechts) einer Außenwand mit einbindender Geschossdecke zu sehen. Am Farbverlauf

kann man die Unterschiede sehr deutlich erkennen. Kühlt bei der ungedämmten Variante die Außenwand aus, wird diese im Vergleich dazu bei der außengedämmten Variante komplett mit geheizt. Die Oberflächentemperatur im Eckbereich steigt daher auch von knapp 14°C auf 18,8°C. Bei der Variante mit Innendämmung kann man den Einfluss der durchbrochenen Dämmschicht im Bereich des Deckenanschlusses gut erkennen. Die Oberflächentemperatur im Eckbereich ist im unteren Beispiel mit 13,6°C sogar etwas niedriger als in der ungedämmten Variante.

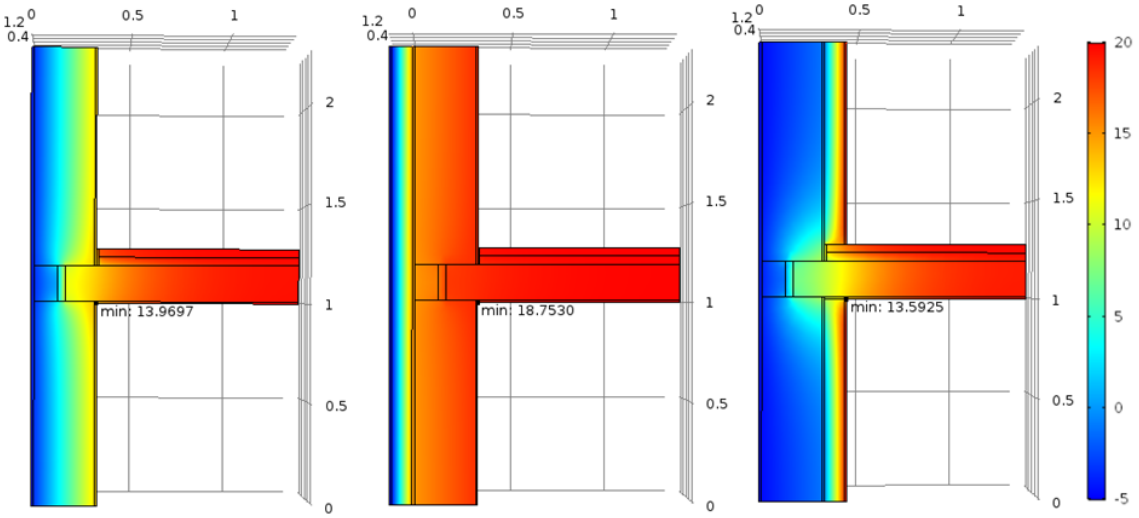


Abb. 4-2: Temperaturverlauf desselben Bauteils; von links nach rechts: ungedämmt, mit Außendämmung, mit Innendämmung.

In Abb. 4-3 ist die Wärmestromdichte des Bauteils aus Abb. 4-2 zu sehen. Der unterschiedliche Einfluss von Innen- und Außendämmung auf dasselbe Bestandsbauteil lässt sich gut erkennen. An der Durchdringung der Dämmebene in der von innen gedämmten Variante wird der Wärmestrom deutlich erhöht.

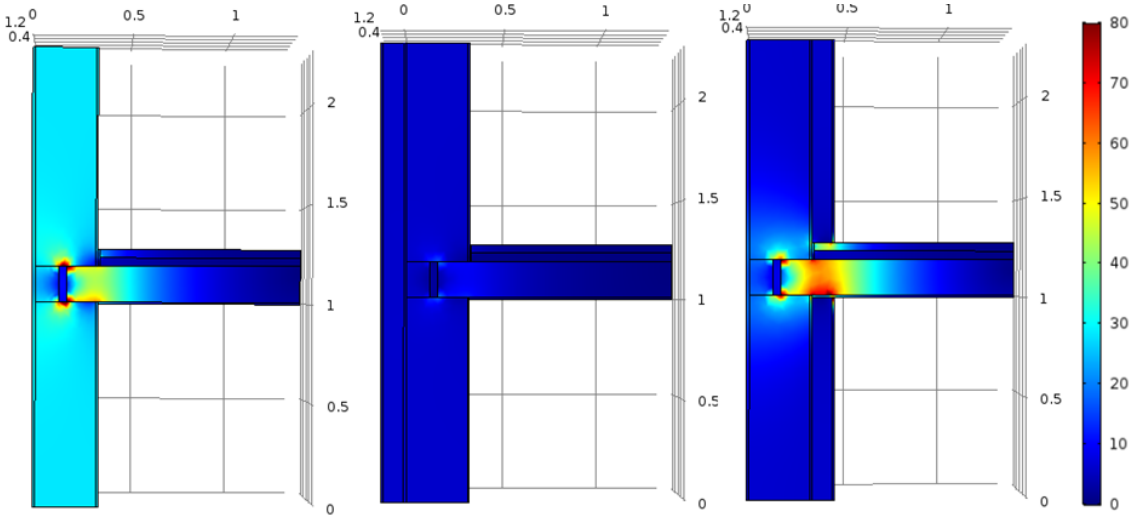


Abb. 4-3: Wärmestromdichte desselben Bauteils, von links nach rechts: ungedämmt, mit Außendämmung, mit Innendämmung.

4.2.5 Regelungen

4.2.5.1 Anforderungen und Berücksichtigung nach EnEV

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) regelt unter anderem den zulässigen spezifischen Energiebedarf von beheizten Gebäuden. In der EnEV werden Vorgaben an den Dämmstandard der Gebäudehülle sowie die Anlagentechnik definiert. Die EnEV fordert die Berücksichtigung der zusätzlichen Wärmeverluste durch lineare Wärmebrücken bei:

- Gebäudekanten
- Leibungen von Fenster und Türen
- Einbindende Decken und Wände
- Balkonplatten

In der zum Zeitpunkt der Berichterstellung gültigen Fassung der EnEV 2014 sind die Anforderungen an Wärmebrücken in Neubauten wie folgt definiert:

„Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass der Einfluss konstruktiver Wärmebrücken auf den Jahresheizwärmebedarf nach den anerkannten Regeln der Technik und den im jeweiligen Einzelfall wirtschaftlich vertretbaren Maßnahmen so gering wie möglich gehalten wird“ (EnEV 2014 §7 Abs. 2).

Zur rechnerischen Berücksichtigung der Wärmebrücken bei der Energiebedarfsberechnung stehen nach Verordnung verschiedene Varianten zur Wahl:

Pauschale Berücksichtigung
Die Wärmebrücken werden pauschal mit einem Zuschlag des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von ΔU_{WB}= 0,10 W/(m²·K) für die komplette wärmeübertragende Umfassungsfläche in Ansatz gebracht. Sind über 50 % der Außenwand mit einer innen liegenden Dämmschicht und einbindender Massivdecke versehen, wird der Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} auf 0,15 W/(m²·K) erhöht. Zudem sind Voraussetzungen definiert, unter denen ein verminderter pauschaler Wärmebrückenzuschlag von 0,05 W/(m²·K) angesetzt werden kann (Entsprechung oder Gleichwertigkeit der Bauteilanschlüsse mit den Ausführungsbeispielen des DIN 4108 Beiblatt 2). Gebäude mit innenseitig gedämmten Außenwänden erfüllen diese Voraussetzungen jedoch nicht.

Detaillierter Wärmebrückennachweis
Durch die Berechnung der individuellen längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizienten Ψ (numerische Berechnung nach DIN EN ISO 10211) aller relevanten Wärmebrücken des Gebäudes kann zusammen mit den Bauteilanschlusslängen ein gebäudeindividueller Wärmebrückenzuschlag ΔU_{WB} angegeben werden.

Der Mehraufwand für einen detaillierten Wärmebrückennachweis kann sich finanziell auszahlen. Die Tilgungszuschüsse der KfW-Bank fallen in Abhängigkeit der Einstufung in

Effizienzhausstufen höher aus. Gerade bei Sanierungsmaßnahmen mit Innendämmung ist dieses Vorgehen aufgrund der andernfalls hohen Pauschalzuschläge in der Regel vorteilhaft.

4.2.5.2 Anforderungen nach DIN 4108-2

Die DIN 4108-2:2013-02 legt Mindestanforderungen an den Wärmeschutz in Deutschland fest. Diese betreffen auch die Wärmebrücken der Gebäudehülle.

Linienförmige Wärmebrücken sollen unter stationären Randbedingungen in beheizten Bereichen unter Annahme von Raumluftbedingungen von 20°C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit an jeder Stelle eine relative Luftfeuchtigkeit an der Bauteiloberfläche von unter 80 % durch eine Mindestoberflächentemperatur von 12,6 °C aufweisen, um Schimmelbefall zu verhindern. Bei einer Außentemperatur von -5°C ergibt sich so ein nach unterer Gleichung (vgl. DIN EN ISO 10211:2015-06) einzuhaltender Temperaturfaktor f_{Rsi} von mindestens 0,70 (DIN 4108-2: 6.2.1):

$$f_{\mathrm{Rsi}}(x,y) = \frac{\theta_{si}(x,y)-\theta_e}{\theta_i-\theta_e}\ [\text{-}]$$

mit

$\theta_{si}(x,y)$	raumseitige Oberflächentemperatur am betrachteten Punkt in °C
θ_e	Außenlufttemperatur in °C
θ_i	Innenlufttemperatur in °C

Nach DIN 4108 Beiblatt 2:2017-11 gelten Anschlüsse dann als ausreichend gedämmt, wenn sie den Mindestanforderungen gemäß DIN 4108-2 entsprechen oder die Gleichwertigkeit zu den im Beiblatt aufgeführten Ausführungen nachgewiesen werden kann. Entsprechende Konstruktionen müssen keinen Nachweis einer ausreichend hohen Oberflächentemperatur erbringen.

Innenseitig gedämmte Anschlüsse benötigen jedoch grundsätzlich einen Nachweis des Temperaturfaktors nach DIN 4108-2, da die Dämmebene naturgemäß nicht durchgehend ist (vgl. DIN 4108-2: 6.2.1).

Die derzeitige Regelung geht davon aus, dass auch die Eckpunkte aus aufeinandertreffenden linienförmigen Wärmebrücken (meist Außenecken des Gebäudes), ausreichend hohe Oberflächentemperaturen aufweisen, wenn die einzelnen linienförmigen Anschlüsse den oberen Anforderungen entsprechen. Diese Regel gilt jedoch nur für Punkte aus drei aufeinandertreffenden Bauteilen. Steht z.B. unter einem auskragenden Erker noch eine Stütze in der Ecke, dann ist diese als viertes Bauteil zu betrachten und der Eckbereich muss durch eine Wärmebrückenberechnung überprüft werden.

Diese Annahme trifft jedoch für innenseitig gedämmte Bauteilanschlüsse aufgrund der lokalen Durchdringung der Dämmebene durch einbindende Bauteile oft nicht zu, sodass zusätzliche

Maßnahmen notwendig werden können, um auch in Raumecken die Außenwände hinreichend vor Schimmelpilzbefall zu schützen.

4.2.6 Feuchteschutz

4.2.6.1 Tauwasserschutz

Bauschäden sind in vielen Fällen auf unzulässig hohe Feuchtigkeit in der Konstruktion zurückzuführen. Der Schutz vor Feuchteschäden ist deshalb eine der wichtigsten bauphysikalischen Aufgaben. Wenn der Wasserdampf in der Luft gesättigt ist, was einer relativen Luftfeuchte von 100% entspricht, fällt Tauwasser aus, sobald die Luft weiter abkühlt. Für eine Konstruktion kann der kritische Wert der relativen Luftfeuchte jedoch auch unter 100% relativer Luftfeuchte liegen. Wie im nachfolgenden Kapitel 4.2.6.2 beschrieben bilden sich Schimmelpilze bereits ab einer kritischen relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche $\varphi_{si,cr}$ von 80%. Für die Bauschadensfreiheit und Dauerhaftigkeit einer Konstruktion muss auch die Baustoffkorrosion ausgeschlossen werden. Hier gibt es je nach Werkstoff unterschiedliche Toleranzen. Für manche metallischen Werkstoffe stellt sich bereits ein kritischer Bereich bei 60% relativer Luftfeuchte ein. Der Zusammenhang zwischen relativer und absoluter Luftfeuchte sowie der Lufttemperatur wird in Abb. 4-4 grafisch dargestellt. Die Grafik verdeutlicht, dass bei sinkender Lufttemperatur die relative Luftfeuchte steigt, wobei die absolute Feuchte gleichbleibt.

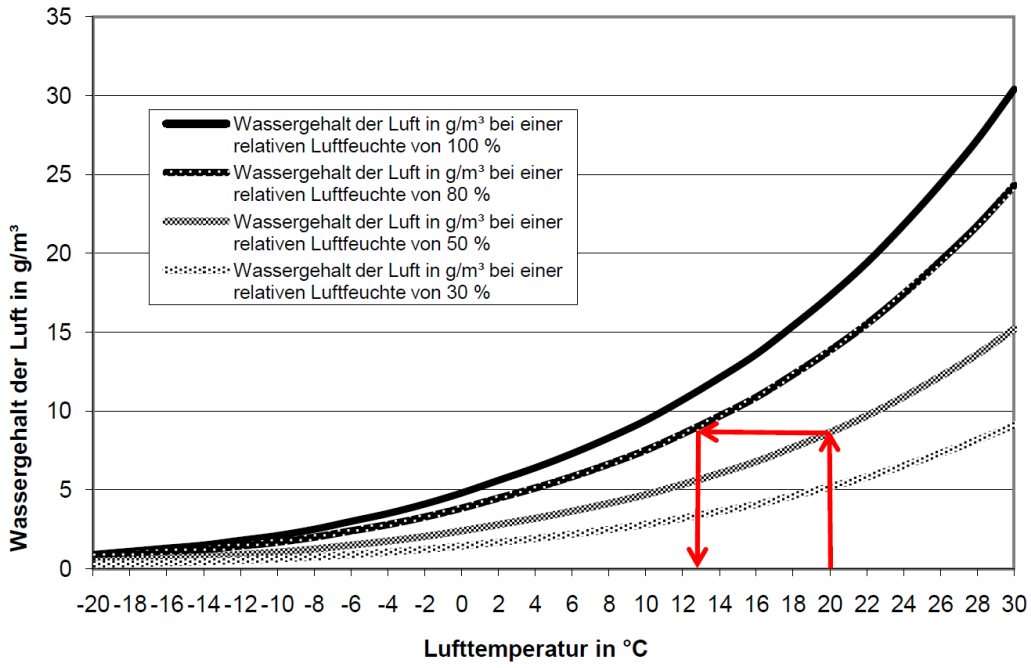


Abb. 4-4: Zusammenhang von Lufttemperatur, Wassergehalt der Luft und der relativen Luftfeuchte (Quelle: Sprengard und Spitzner 2010).

Die Entstehung von Tauwasser an der Raumoberfläche ist von den drei Parametern Raumlufttemperatur, relative Raumluftfeuchte und Bauteiloberflächentemperatur abhängig. Wenn zwei der Werte bekannt sind, kann die dritte Größe über den temperaturabhängigen Wasserdampfsättigungsdruck ρ_s bestimmt werden. Demnach kann Tauwasser vermieden werden, wenn die Oberflächentemperatur größer ist als die Taupunkttemperatur. Zur

Vermeidung von Tauwasser im Bereich von Wärmebrücken betrachtet man den Bereich mit der niedrigsten Oberflächentemperatur.

Die Vermeidung kritischer Luftfeuchten an Bauteiloberflächen und von Tauwasserbildung im Inneren von Bauteilen regelt die DIN 4108-3:2014-11 unter dem Punkt 5. Hier werden allgemeine Anforderungen sowie Berechnungs- und Ausführungshinweise gegeben. Die Tauwasserberechnung ist nach dem Berechnungsverfahren im Anhang A der DIN 4108-3 durchzuführen. Das Tauwasser, welches während der Tauperiode anfällt, muss während der Verdunstungsperiode wieder an die Umgebung abgegeben werden. Bei Bauteilen gegen Außenluft darf im Bauteilquerschnitt eine maximale Tauwassermenge von 1,0 kg/m² anfallen. Das Maß ist flächenbezogen und wird im Fall einer nicht kapillar wasseraufnahmefähigen Schicht auf 0,5 kg/m² reduziert. Holzbauteile werden in der DIN 68800-2:2012-02 geregelt.

4.2.6.2 Schimmelkriterium

Schimmelpilze sind zum einen gesundheitsgefährdend, zum anderen schädigen sie die Gebäudesubstanz. Deshalb ist es die Pflicht des Planers, die Gebäudehülle so zu konzipieren, dass die Konstruktion bei normalem Nutzungsverhalten tauwasserfrei und gleichzeitig schimmelfrei bleibt. Um dies gewährleisten zu können, müssen die Wachstumsvoraussetzungen von Schimmelpilzen bekannt sein. Voraussetzung zum Wachstum von Schimmelpilzen ist eine relative Luftfeuchtigkeit von mindestens 80%, wobei das Optimum zwischen 90% und 98% liegt. Bei 80% rel. Feuchte sind gleichbleibende Feuchtebedingungen über einen Zeitraum von mindestens 5 Tagen nötig. Bei höheren Luftfeuchten genügt eine kürzere Zeitspanne. Schimmelpilze stellen keine großen Anforderungen an den Nährboden, bevorzugen aber ein leicht saures Milieu und wachsen theoretisch in einem Temperaturbereich zwischen 0°C und 35°C. Verdeutlicht wird der Zusammenhang zwischen relativer Feuchte und Temperatur durch Abb. 4-5. Die hier dargestellten minimalen Keim- und Wachstumsbedingungen gelten für alle am Bau auftretenden Pilzarten. Die Grafik wird zum einen in drei verschiedene Substratgruppen nach ihrer biologischen Verwertbarkeit unterteilt.

In der DIN 4108-2 wird zur Berechnung der Schimmelgefahr ein Wärmeübergangswiderstand von 0,25 m²K/W für Außenwände definiert. Ein Aufschlag für geometrische Gegebenheiten wie Ecken und ein Erhöhungsfaktor für leichte Gardinen ist bereits enthalten. Für Schränke lässt sich ein in der DIN 4108-8:2018-09 definierter äquivalenter Wärmeübergangswiderstand ansetzten, wobei für Einbauschränke mit einem $R_{si,äq}$ = 1,00 m²·K/W gerechnet wird und für freistehende Schränke ein $R_{si,äq}$ = 0,50 m²·K/W angesetzt werden darf.

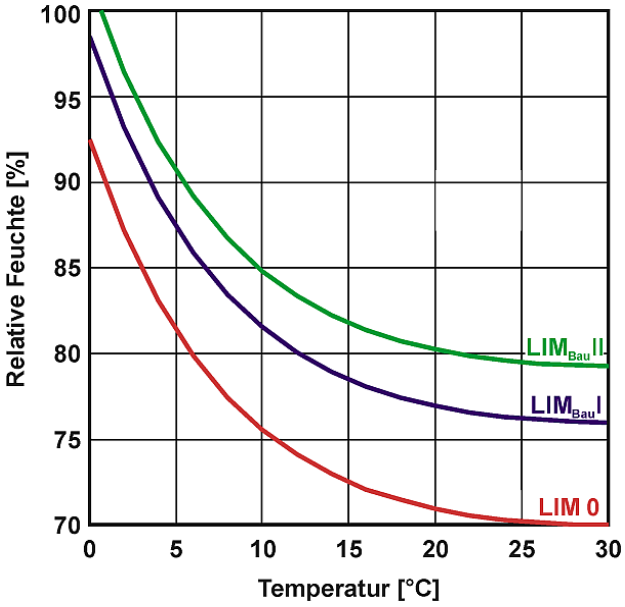


Abb. 4-5: Minimale Keim- und Wachstumsbedingungen für Schimmelsporen auf biologisch verwertbaren ($LIM_{Bau}I$) und nicht verwertbaren Substraten ($LIM_{Bau}II$) wie sie im Baubereich vorkommen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Temperatur und relativen Feuchte nach Sedlbauer 2001. Zum Vergleich ist die LIM-Kurve für ein biologisch optimales Substrat (LIM 0) dargestellt.

Zur Beurteilung der Schimmelgefahr ist die in Kapitel 4.2.3.1 definierte Innenoberflächentemperatur θ_{si} ein wichtiger Indikator. Für homogene Bauteile wird θ_{si} wie folgt bestimmt:

$$\theta_{si} = \theta_i - R_{si} \cdot$$

Für die Bestimmung des U-Werts werden die in DIN EN ISO 6946:2018-03 definierten Wärmeübergangswiderstände verwendet. Mithilfe der Innenoberflächentemperatur θ_{si} lässt sich nun der in Kapitel 4.2.3.2 definierte Temperaturfaktor f_{RSi} über folgende Formel bestimmten:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Um eine schimmelfreie Konstruktion gewährleisten zu können, muss der Temperaturfaktor auch am ungünstigsten Punkt der Gebäudehülle eine Mindestanforderung von $f_{RSi} \geq 0{,}70$ erfüllen. In der DIN 4108-2 sind hierfür folgende Randbedingungen definiert:

- Innenlufttemperatur θ_i = 20°C
- Relative Luftfeuchte innen φ_i = 50 %
- Außenlufttemperatur θ_e= -5°C

Um eine schimmelfreie Konstruktion sicherstellen zu können, muss zu den oben genannten Randbedingungen die relative Luftfeuchte auf der inneren Bauteiloberfläche unter 80% liegen. Unter oberen Klimarandbedingungen ergibt sich damit eine Oberflächentemperatur von 12,6°C,

die nicht unterschritten werden darf. Je größer der f_{Rsi} -Wert ist, desto geringer ist das Schimmelrisiko.

Nutzereinfluss
Nicht nur konstruktive Gegebenheiten haben Einfluss auf die Raumhygiene. Auch das Nutzerverhalten muss berücksichtigt werden. Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

- **Lüftungsverhalten**
  Generell sollten Räume abhängig von ihrer Funktion gelüftet werden. Als kritisch einzuschätzen ist der Luftwechsel über gekippte Fenster gerade im Winter, da die Oberflächentemperatur der Fensterleibung absinkt. Wird die Taupunkttemperatur unterschritten, fällt Tauwasser an und die nötige Oberflächenfeuchte für Schimmelwachstum ist gegeben.

  Gerade nach Modernisierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle durch Dämmung oder dem Einbau von neuen Fenstern, die für eine dichtere Gebäudehülle sorgen, muss das Lüftungsverhalten oftmals angepasst werden. Ein modernisiertes Gebäude benötigt prinzipiell keine höheren Luftwechsel Intervalle als zuvor, jedoch muss das vor der Sanierung unkontrollierte Lüften über die undichteren Fenster und schlechteren Fensteranschlüsse durch häufigeres Lüften kompensiert werden.

- **Heizverhalten**
  Ein auf die Situation angepasstes Heizverhalten ist wichtig, da die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft von der Lufttemperatur abhängt. Warme Luft kann mehr Feuchtigkeit aufnehmen bis Tauwasser ausfällt, als kalte Luft. Warme Luft ist damit erst später gesättigt als kalte Luft. Die absolute Feuchte bleibt jedoch unverändert und trotz anderer Temperatur konstant. Die relative Luftfeuchte ändert sich jedoch mit der Lufttemperatur. Dieser Zusammenhang wird grafisch bereits in Abb. 4-4 dargestellt.

- **Positionierung von Möbeln**
  Ein Grund für erhöhtes Schimmelrisiko ist auch die unvorteilhafte Positionierung von Möbeln. Durch an der Außenwand aufgestellte Möbel wird eine raumseitige Luftkonvektion verhindert. Dadurch kann die Oberflächentemperatur in einen kritischen Bereich absinken und für ein erhöhtes Schimmelpilzrisiko sorgen. Wenn es aufgrund des Grundrisses nicht anders möglich ist die Möbel zu positionieren, sollte darauf geachtet werden einen Abstand zur Außenwand von mindestens 5 cm einzuhalten um eine ausreichende Hinterlüftung zu gewährleisten.

4.3 Untersuchungsumfang und Randbedingungen

4.3.1 Berechnungsgrundlagen

Die Berechnungen, auf denen die Angaben im vorliegenden Katalog beruhen, wurden auf Basis geltender Regeln der Technik nach untenstehenden internationalen Standards durchgeführt:

- **DIN EN ISO 10211**:2008-04 "Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen."
- **DIN EN ISO 13370**:2008-04 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren."
- **DIN EN ISO 6946**:2008-04 „Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren
- **DIN EN ISO 10456**:2010-05 „Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte."

4.3.2 Parametervariation

4.3.2.1 Wärmeleitfähigkeit Bestandskonstruktionen

Die zugrunde gelegten Bestandskonstruktionen und zugehörige Materialdaten orientieren sich an typischen Bestandskonstruktionen der „Deutschlandkarte für Altbaumaterialien und -konstruktionen" (ZUB - Zentrum für Umweltbewusstes Bauen). Dieses wurde vom Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) entwickelt und basiert auf der Deutschen Gebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt GmbH (Loga et al. 2015) in Darmstadt. Materialwerte für Bestandskonstruktionen können dort anhand von Gebiet und Bauteilalter entnommen werden. Um ein möglichst großes Spektrum an Bestandskonstruktionen abzubilden, wurde die Wärmeleitfähigkeit der Außenwand variiert, während die Stärke mit 30 cm durch alle Untersuchungen konstant geblieben ist.

Tab. 4-1: Untersuchte Varianten der Wärmeleitfähigkeit der Bestandskonstruktion.

Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	U-Wert Bestandswand* [W/m²K]
0,1	0,32
0,3	0,85
0,42	1,13
0,53	1,36
0,64	1,57
0,8	1,83
1,0	2,13

*Dicke 30 cm, R_{si} = 0,13 m²K/W, R_{se}=0,04 m²K/W

4.3.2.2 Dämmstärke und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung

Da die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung parametrisch variiert werden, ist nachfolgend in Tab. 4-2 eine Tabelle der Kombinationen der Werte dargestellt, für die Berechnungen durchgeführt wurden. Mögliche Kombinationswerte für die Dämmstoffdicke sind

von 1 – 10 cm gewählt, da üblicherweise innen eher dünne Dämmschichtdicken angebracht werden. Die Wärmeleitfähigkeit orientiert sich an dem üblichen Spektrum von Innendämmstoffen. Die Auswahl der Kombinationswerte basiert auf einem unteren Grenzwert von $R \geq 1{,}2$ m2K/W (Mindestwärmeschutzanforderung für die Außenwand der DIN 4108-2) und einem oberen Grenzwert von $\Delta R \leq 2{,}5$ m2K/W (entsprechend Empfehlung des WTA Merkblatts 4-6). Für die Wärmeleitfähigkeit von 5 – 30 mW/(mK) ist die Schrittweite je 1 cm Dämmstoffdicke. Ab der Wärmeleitfähigkeit von 35 mW/(mK) ist die Schrittweite auf 2 cm erhöht, um den Berechnungsaufwand den zeitlichen Rahmenbedingungen der vorliegenden Arbeit anzupassen. Insgesamt handelt es sich bei den stationären Berechnungen für zwei der betrachteten Details um 26 (blau hinterlegt) verschiedene Varianten mit Innendämmung in 2D und 3D pro Detailkonstruktion, die den bereits genannten Grenzwerten entsprechen. Die anderen Details sind mit einer reduzierten Auswahl berechnet (rote Schriftfarbe). Bei den instationären Berechnungen wurde die Anzahl auf 3 verschiedene Varianten (rot unterstrichen) reduziert, da der Rechenaufwand für instationäre Berechnungen sehr hoch ist.

Tab. 4-2: Parametervariation von Dicke und Wärmeleitfähigkeit für die Innendämmung.

R-Wert der Dämmschicht (inklusive Putz) [m²K/W]									
Dicke [mm]	**Wärmeleitfähigkeit Innendämmung [mW/mK]**								
	5	**10**	**15**	**20**	**30**	**35**	**40**	**50**	**65**
10	**2,01**	**1,01**	0,68	0,51	0,35	0,30	0,26	0,21	0,17
20	4,01	**2,01**	**1,35**	**1,01**	0,68	0,59	0,51	0,41	0,32
30	6,01	3,01	**2,01**	**1,51**	**1,01**				0,48
40	8,01	4,01	2,68	**2,01**	**1,35**	**1,16**	**1,01**	**0,81**	0,63
50	10,01	5,01	3,35	2,51	**1,68**				
60	12,01	6,01	4,01	3,01	**2,01**	**1,73**	**1,51**	**1,21**	**0,94**
70	14,01	7,01	4,68	3,51	**2,35**				
80	16,01	8,01	5,35	4,01	2,68	**2,30**	**2,01**	**1,61**	**1,25**
90	18,01	9,01	6,01	4,51	3,01	2,59			
100	20,01	10,01	6,68	5,01	3,35	2,87	2,51	**2,01**	**1,55**

4.3.3 Materialkennwerte

In Tab. 4-3 sind die Materialkennwerte der verwendeten Baustoffe verzeichnet, wobei die Nummerierung sich auf die Detailzeichnungen (siehe Kapitel 4.3.5) bezieht und deshalb nicht lückenlos fortlaufend ist. Die Materialkennwerte entstammen Erfahrungswerten des FIW München oder sind der DIN EN ISO 10456:2010-05 entnommen.

Tab. 4-3: Materialkennwerte.

No.	Baustoff	Rohdichte ρ [kg/m³]	Spez. Wärme-speicherkapazität c_p [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
1	Gipsputz	1.400	1.000	0,70
2	Kalkzementputz	1.900	1.000	1,00
3	Mauerwerk	1.700	1.000	0,1 – 1,0[c]
5	Beton	2.300	1.000	2,30
8	Dämmung	60	1.000	0,040
9	Trittschalldämmung	120	1.000	0,050
10	Randdämmstreifen/PE	70	2.300	0,050
11	Zementestrich	2.000	1.000	1,40
12	Kellermauerwerk	1.700	1.000	0,1 – 1,0[c]
14	HWL-Platte	450	1.500	0,08
15	Holz	450	1.600	0,13
16	Aluminium	2.800	880	160,00
17	Kies	1.400	1.200	0,70
20	Kleberschicht	1.800	1.000	1,00
21	Innendämmung	30b	1.500[b]	Siehe Tab. 4-2
22	Erdreich (Sand, Kies)	1.950[b]	1.045[b]	2,00[a]
23	Marmor	2.800	1.000	3,50
24	MDF	800	1.700	0,18
25	Fensterpaneel	600b	1.700b	0,13

[a] aus DIN EN 13370:2018-03

[b] aus DIN EN ISO 10456:2010-05

[c] Stationäre Berechnungen: 0,1; 0,3; 0,42; 0,53; 0,64; 0,8 und 1,0 W/(mK)
Instationäre Berechnungen: 0,1, 0,42, 0,64 und 1,0 W(mK)

4.3.4 Klimatische Randbedingungen

Ein (quasi-)stationärer Zustand ist zeitlich unabhängig. Das heißt bei Wärmedurchgangsberechnungen in einem Bauteil gibt es konstante Außen- und Innentemperaturen, die auf das Bauteil einwirken. Instationär hingegen ist die Temperatur, wenn sie sich über die Zeit ändert, wenn also z.B. zur Berechnung der stündliche Temperaturverlauf aus einem festgelegten Jahr herangezogen wird. So lehnt man sich näher an die natürlichen Verhältnisse an, als bei konstanten Temperaturverhältnissen. Dabei sind allerdings bei Ermittlung der Auswirkungen der natürlichen Bewitterung nach Künzel und Sedlbauer 2015 folgende Daten erforderlich: Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchte, solare Einstrahlung, langwellige Abstrahlung, Niederschlag sowie Windgeschwindigkeit und -richtung.

Um eine Simulation möglichst zu vereinfachen und Rechenzeit zu sparen ist es wünschenswert, eine stationäre Berechnung durchzuführen. Es können auch nur einzelne Einwirkungen konstant angesetzt werden. Wichtig ist allerdings, dass die Wahl des Verfahrens begründet und die benötigte Genauigkeit der Ergebnisse bekannt ist, da das von Fall zu Fall veränderlich ist.

4.3.4.1 Stationäre Randbedingungen

Die Randbedingungen für die stationäre Berechnung des Temperaturkorrekturfaktors f_{Rsi} sind aus der DIN 4108-2 entnommen und in Tab. 4-4 abgebildet. Für die stationäre Berechnung nach DIN 4108-2 wird als Materialparameter nur die Wärmeleitfähigkeit benötigt. Da Zeitvorgänge keine Rolle spielen fallen Wärmespeicherungsvorgänge weg.

Der innenseitig anzusetzende Wärmeübergangswiderstand berücksichtigt bereits leichte Gardinen, wodurch der Wärmeübergang gestört wird. Dies ist gemäß DIN 4108-2:2013-02 wie folgt definiert: „*der raumseitige Wärmeübergangswiderstand von 0,25 (m^2K)/W für Außenwände berücksichtigt bereits die Behinderung des Wärmeübergangs durch leichte Gardinen und in der Raumkante.*“ Zusätzlich heißt es: „*Der für Fenster, Fenstertüren und Türen nach DIN EN ISO 13788 verwendete raumseitige Wärmeübergangswiderstand von 0,13 (m^2K)/W geht von ungehinderter Luftzirkulation aus.“*

Tab. 4-4: Randbedingungen für die stationäre Berechnung von $f_{Rsi.}$

Randbedingung	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeübergangswiderstand Innenoberfläche	R_{si}	0,25	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand Außenoberfläche	R_{se}	0,04	m²K/W
Lufttemperatur raumseitig	Θ_i	20	°C
Lufttemperatur außen	Θ_e	-5	°C

4.3.4.2 Instationäre Randbedingungen

Bei instationären Randbedingungen (z.B. Außenlufttemperaturschwankungen) müssen neben der Wärmeleitfähigkeit auch die spez. Wärmekapazität und die Rohdichte der Materialien im Modell berücksichtigt werden, da Wärmespeicherungsvorgänge eine wichtige Rolle spielen.

Für die Berechnung unter instationären Randbedingungen werden für die Außenlufttemperatur Klimadaten angesetzt. Geeignete Klimadaten sind im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) entstanden (Bundesamt für Raumwesen und Raumordnung (BBR) 2017). Die Testreferenzjahre (TRJ oder TRY) sind vom Deutschen Wetterdienst in Zusammenarbeit mit der Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH entstanden und stellen möglichst typische Jahre für das Klima eines bestimmten Zeitraums dar.

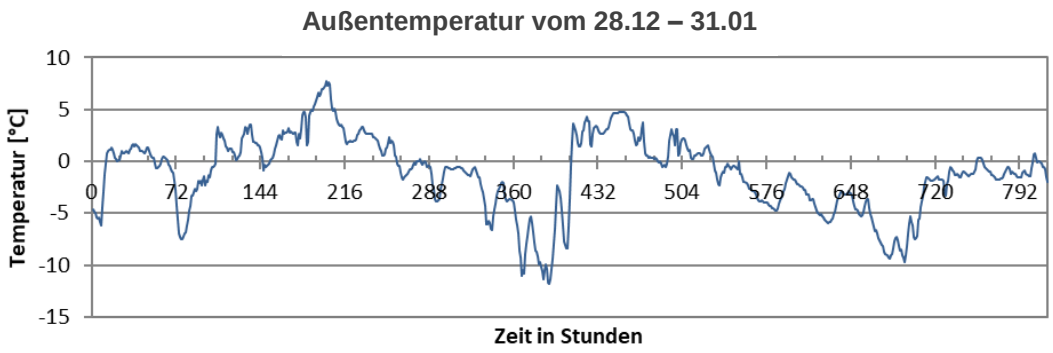
Bei dem gewählten Datensatz handelt es sich um ein mittleres Jahr, d.h. es repräsentiert den charakteristischen Witterungsverlauf für ein gesamtes Jahr. Die Daten stammen aus dem

Testreferenzjahr (TRJ) für die Region Hof (Repräsentanzstation 10 für das südöstliche Mittelgebirge) des Jahres 2010. Die gewählte Region zeichnet sich durch eher niedrigere Temperaturen im Vergleich zum restlichen Deutschland aus.

Um die Berechnungszeit möglichst gering zu halten, wird ein winterlicher Monat aus dem TRJ gewählt, um dessen Ergebnisse für die biohygrothermische Simulation zu verwenden. Nach Auswertung die monatlichen Temperaturverläufe wurde festgestellt, dass der Monat Januar der winterlichste Monat ist. Deshalb wurde der Monat Januar für die Berechnungen ausgewählt. Damit gewährleistet werden kann, dass auch der ganze Monat in die Ermittlung miteinfließt, werden 3 Tage als sogenannte Anlaufzeit aus dem Vormonat Dezember mit angesetzt. So ergeben sich insgesamt 31 + 3 Tage mit insgesamt 816 Stunden als Berechnungszeitraum. In Tab. 4-5 sind die Randbedingungen sowie der Temperaturverlauf des gewählten Berechnungszeitraums aus dem TRJ zusammengefasst.

Tab. 4-5: Randbedingungen für die instationäre Berechnung von Θ_{si}.

Randbedingung	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeübergangswiderstand Innenoberfläche	R_{si}	0,25	m²K/W
Wärmeübergangswiderstand Außenoberfläche	R_{se}	0,04	m²K/W
Lufttemperatur raumseitig	Θ_i	20	°C
Lufttemperatur außen	Θ_e	siehe Grafik unten	°C



Temperaturkurve aus TRJ-Datensatz für ein normales Jahr (2010) in der Region 10 (Hof) für den Monat Januar mit einer Anlaufzeit von den letzten drei Tagen aus Dezember (siehe Abschnitt 4.6.2.1)

4.3.4.3 Erdberührte Bauteile

Bei den Details im Erdreich wurde der Abstand zum zentralen Element bei Schnittebenen im Erdreich nach DIN EN ISO 10211:2015-06 unter der Annahme einer Deckenbreite von 8 m errechnet. Dabei ergeben sich 20 m an zu modellierendem Erdreich. Dadurch wird die Dauer der Berechnungen deutlich verlängert und der notwendigen Rechenkapazität sehr erhöht. Da

der Speicherplatz nicht ausreicht, um die erdberührten Bauteile für ein ganzes Jahr zu berechnen, ist die Datenanzahl des Temperaturverlaufs reduziert auf das gleitende Mittel von jeweils 2 Stunden bei Detail Nr. 3 (Anschluss Kellerdecke an Außenecke) und jeweils 3 Stunden bei Detail Nr. 4 (Außenecke an Bodenplatte im Erdreich).

Bei der Bodenplatte (Detail 4) sorgt die große Masse an Erde dafür, dass die Anfangstemperatur einen sehr großen Einfluss auf die Ergebnisse bei Berechnungen von nur einem Jahr hat. Da längere Berechnungen nicht möglich sind, wird auf Grundlage einer Simulation, die einen ebenso großen Erdblock umfasst, der Temperaturverlauf in 2 m Tiefe im dritten Jahr ermittelt. Das Modell mit Bauteil wird verkleinert auf 1 m Abstand von der punktförmigen Wärmebrücke und die Erde wird ganz entfernt. Die instationäre Berechnung wird für ein ganzes Jahr mit reduzierten Daten (gleitendes Mittel über 3 Stunden) durchgeführt, da sich in einem Monat fast keine Temperaturschwankungen einstellen. Der ermittelte Temperaturverlauf in 2 m Bodentiefe wird direkt auf die Kelleraußenoberfläche, die an das Erdreich grenzen würde, aufgebracht. Dabei beträgt der Wärmeübergangswiederstand zwischen Erdreichtemperatur und Bauteil 0 $(m^2K)/W$.

Die durch diese Weise ermittelten Temperaturverläufe an der punktförmigen Wärmebrücke sind etwas geringer als bei zusätzlicher Modellierung des Erdreichs. Damit liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite.

4.3.5 Untersuchte Anschlussdetails

Im nachfolgenden Kapitel sind die Anschlussdetails zusammengefasst und erläutert, an welchen die Untersuchungen stattfanden. In Abb. 4-6 ist eine Übersicht aller Situationen im Schnitt dargestellt. Die Details werden im Folgenden zum einen als 2D-Schnitt in ungedämmter Ausführung dargestellt. Die Nummerierung der Details und Betrachtungspunkte wird für die weiterführende Beschreibung der Ergebnisse ebenfalls verwendet. Zum anderen sind Bildauszüge aus der Wärmedurchgangsberechnung dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Ausführung mit 3 cm starken Innendämmung (λ = 0,03 W/(mK)) und einer Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks von 0,64 W/(mK). In den 3D-Auschnitten ist zusätzlich die Nummerierung der punkt- und linienförmigen Wärmebrücken eingetragen, da für einige Details mehrere Punkte betrachtet werden.

Die Konstruktionsdetails basieren alle auf einer 30 cm starken gemauerten Außenwand. Die Materialkennwerte sind jeweils im 2D-Schnitt anhand der Nummerierung aus Tab. 4-3 zu entnehmen. Eine genaue Beschreibung der Innendämmungsvarianten sowie die Variation der Wärmeleitfähigkeit der Bestandswand ist in Kapitel 4.3.2 zu finden.

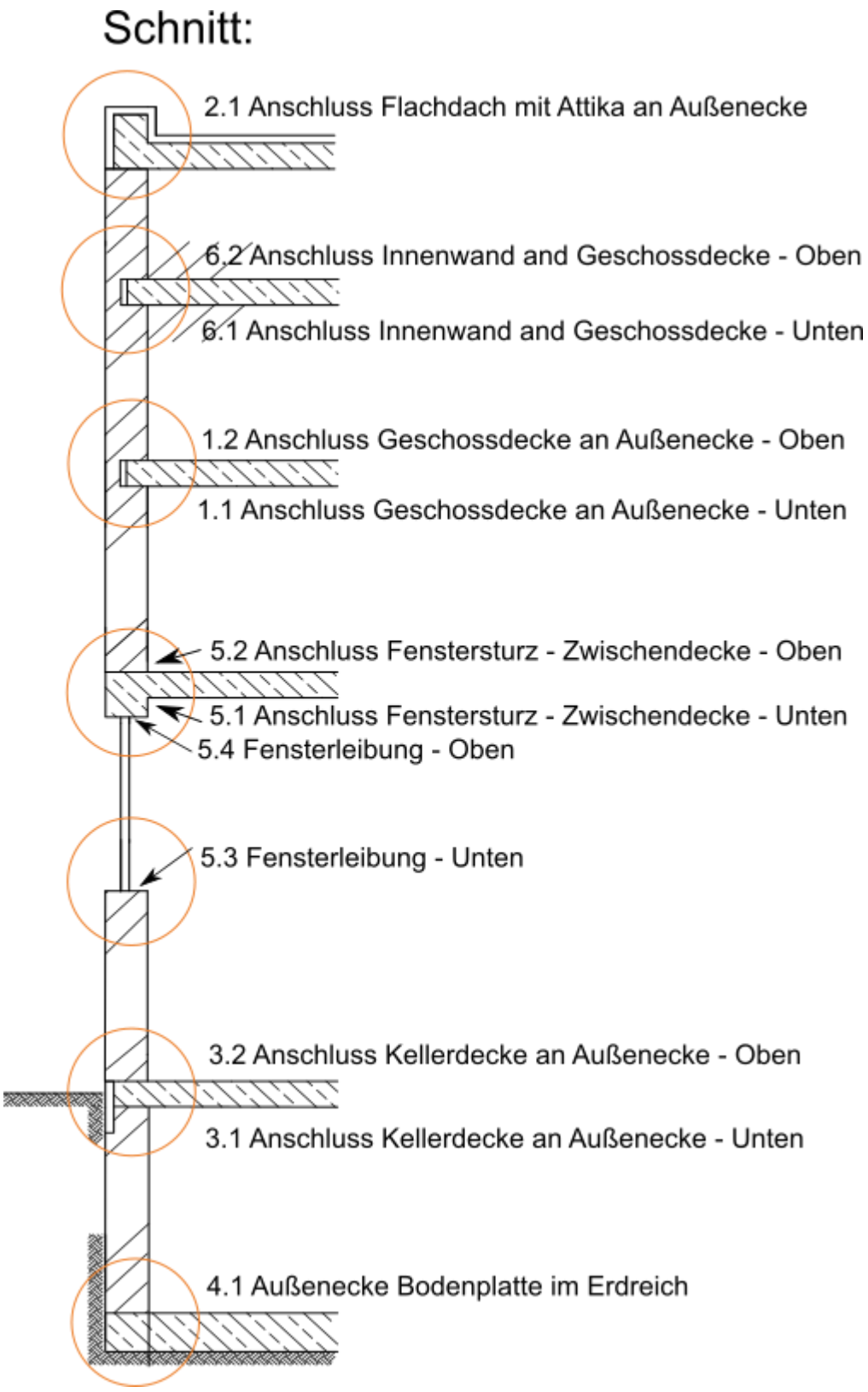
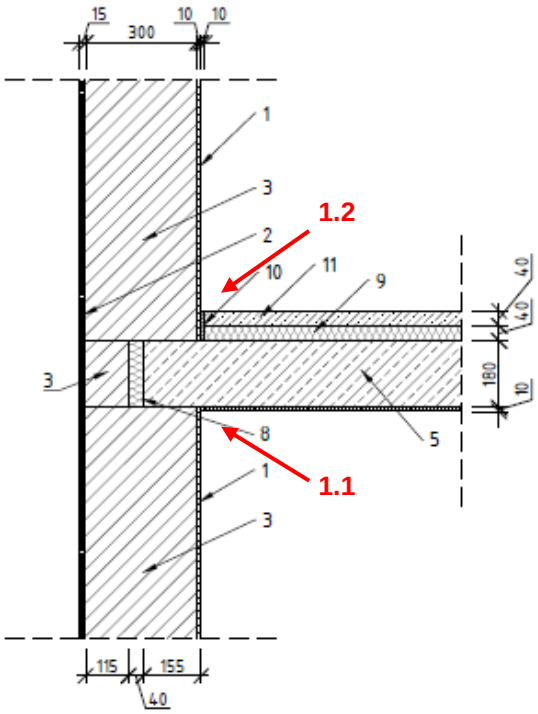


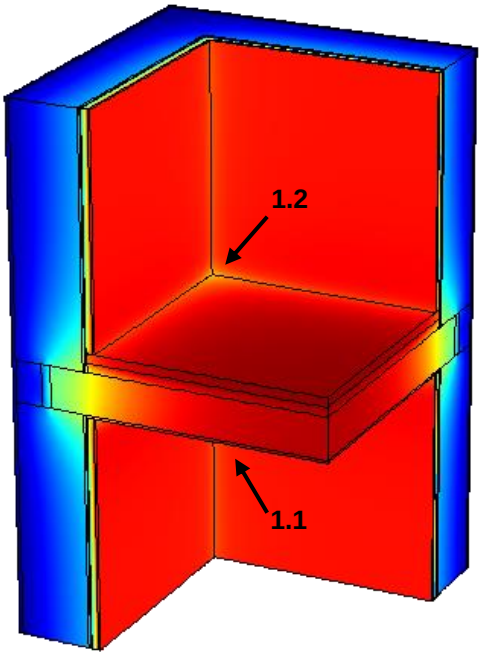
Abb. 4-6: Übersicht der untersuchten Anschlussdetails im Schnitt.

Detail 1: Anschluss Geschossdecke an Außenecke

Dieses Detail behandelt die punktförmige Wärmebrücke am Anschluss einer Geschossdecke an eine Außenecke nach Anbringen einer Innendämmung auf die Außenwände. Betrachtet werden dabei sowohl der obere Eckpunkt im unteren Raum (Detail 1.1) als auch der untere Eckpunkt im oberen Raum (Detail 1.2).

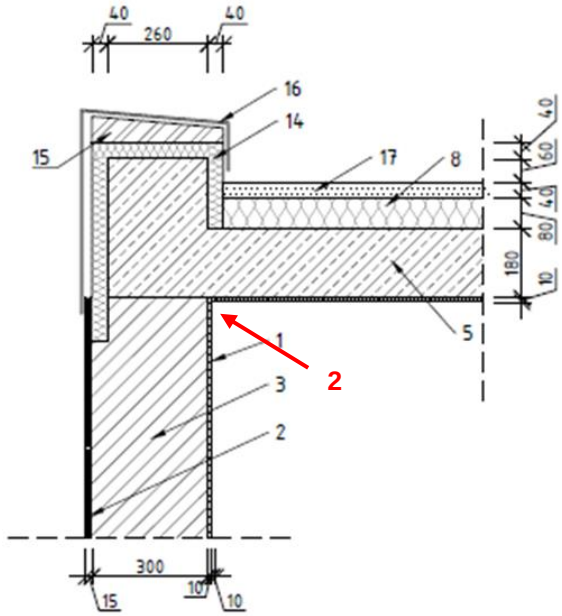
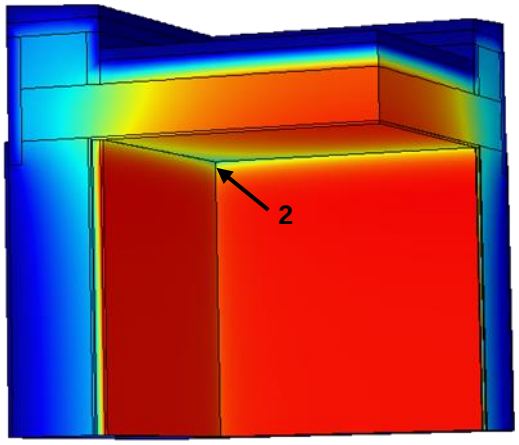
2D-Schnitt	3D- Wärmebrückenvisualisierung





Detail 2: Anschluss Flachdach mit Attika an Außenecke

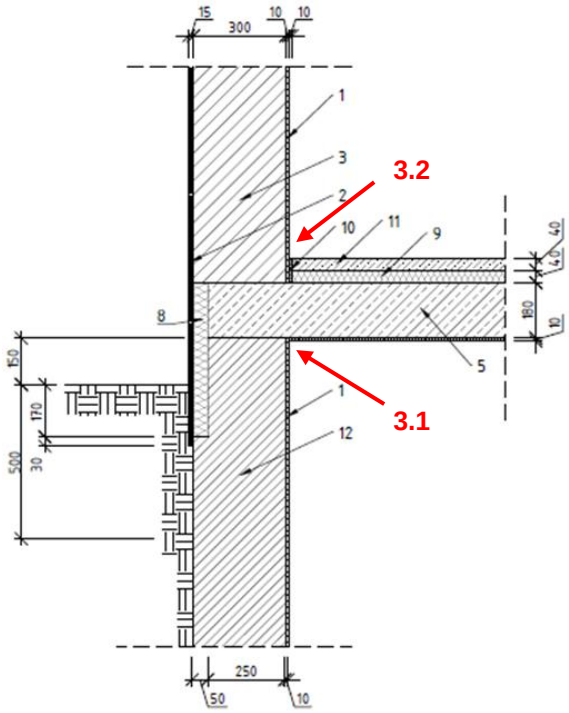
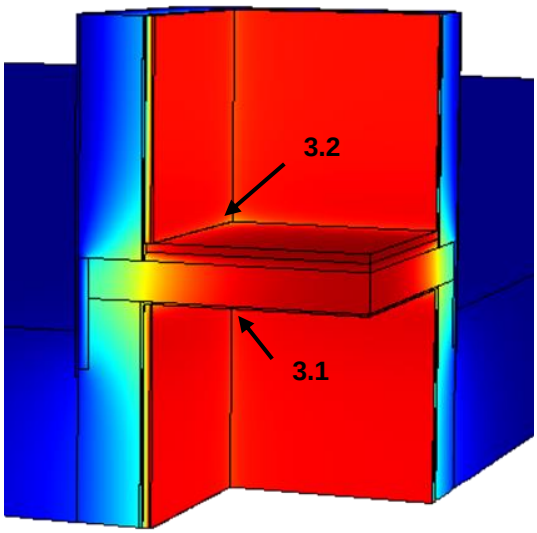
Dieses Detail behandelt die punktförmige Wärmebrücke am Anschluss eines Flachdachs mit Attika an eine Außenecke nach Anbringen einer Innendämmung auf die Außenwände. Betrachtet wird dabei obere Eckpunkt im Raum (Detail 2).

2D-Schnitt	3D- Wärmebrückenvisualisierung
	

Detail 3: Anschluss Kellerdecke an Außenecke

Dieses Detail behandelt die punktförmige Wärmebrücke am Anschluss einer Kellerdecke an eine Außenecke im Erdreich nach Anbringen einer Innendämmung auf die Außenwände. Betrachtet werden dabei sowohl der obere Eckpunkt im unteren Raum (Detail 1.1) als auch der untere Eckpunkt im oberen Raum (Detail 1.2).

Bei den Details im Erdreich (Nummer 3 und 4) wurde der Abstand zum zentralen Element bei Schnittebenen im Erdreich nach DIN EN ISO 10211:2015-06, S. 17 unter der Annahme einer Deckenbreite von 8 m errechnet. Dabei ergeben sich 20 m zu modellierender Erde.

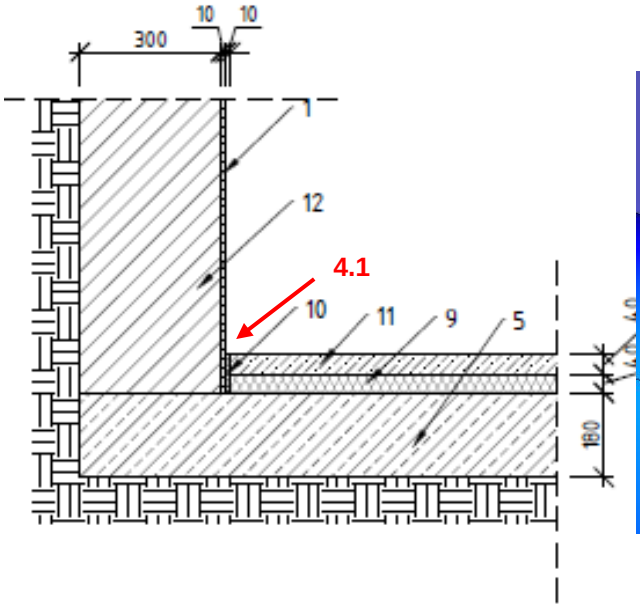
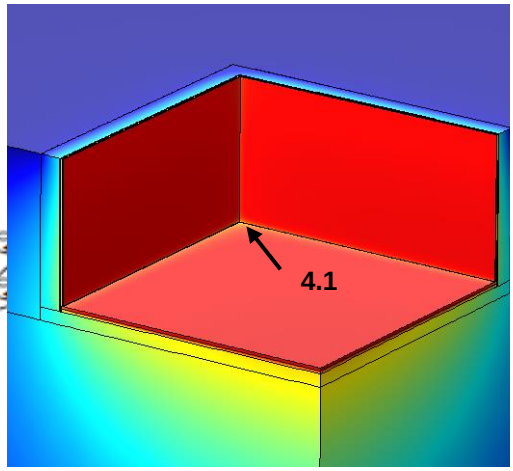
2D-Schnitt	3D- Wärmebrückenvisualisierung
	

Detail 4: Anschluss Bodenplatte an Kelleraußenecke

In Detail 4 wird die Wärmebrücke am Anschluss der innenseitig gedämmten Kelleraußenwand eines beheizten Kellerraumes an die Bodenplatte behandelt.

Bei den Details im Erdreich (Nummer 3 und 4) wurde der Abstand zum zentralen Element bei Schnittebenen im Erdreich nach DIN EN ISO 10211:2015-06, S. 17 unter der Annahme einer Deckenbreite von 8 m errechnet. Dabei ergeben sich 20 m zu modellierender Erde.

Für Detail 4 (Bodenplatte) besteht eine Anschüttung von 2 m Erdreich über OK Fußboden des Kellers. Die Außentemperatur wird auf diese Oberfläche angesetzt.

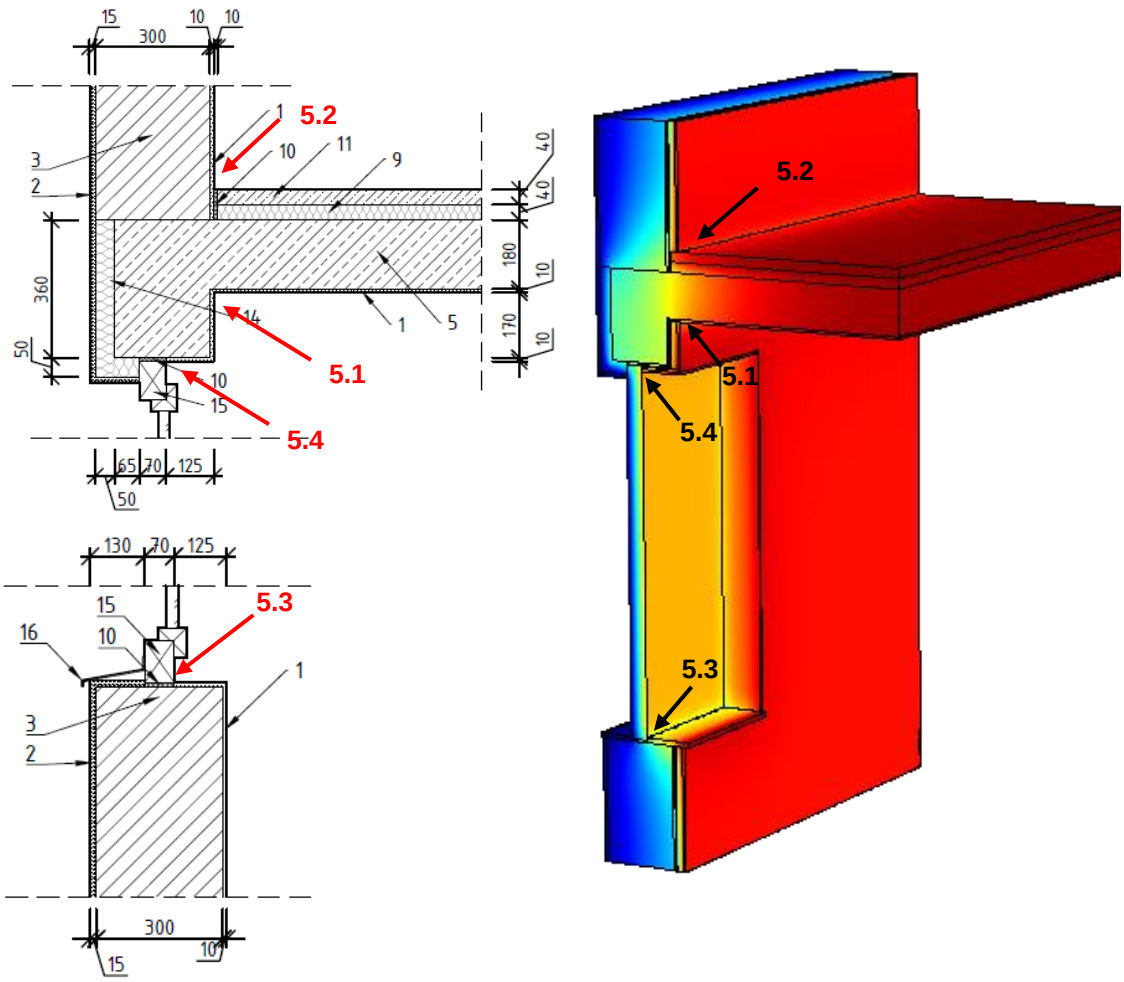
2D-Schnitt	3D- Wärmebrückenvisualisierung
	

Detail 5: Fensteranschlüsse an Außenwand

Das Detail 5 behandelt die Wärmebrückenwirkung an einem Anschluss des Fensters an den innenseitig gedämmten Fenstersturz ausgeführt als Betonunterzug der Geschossdecke aus Stahlbeton bei innenseitig gedämmten Außenwänden.

Für das Fensterdetail (Nummer 6) gibt es auch eine Laibungsinnendämmung. Von 1 – 3 cm Dicke entspricht sie der normalen Innendämmungsdicke (Dämmung an der Wand) und ab 4 cm bleibt die Dicke bei 3 cm konstant.

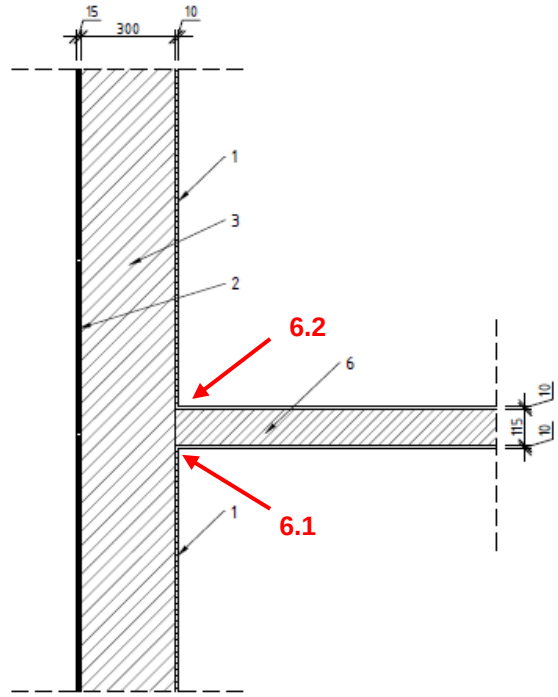
2D-Schnitt	3D- Wärmebrückenvisualisierung

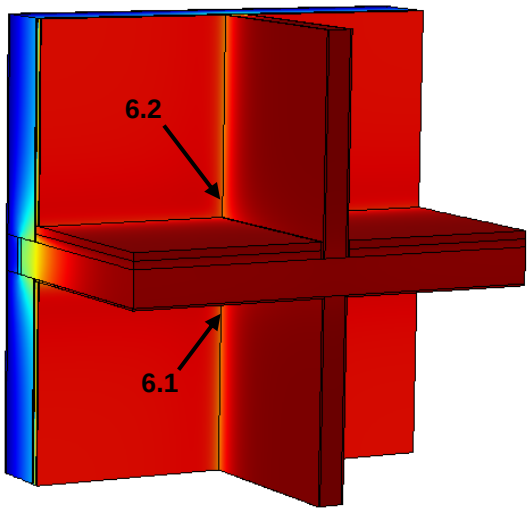


Detail 6: Anschluss Innenwand an Geschossdecke und Außenwand

Detail 6 betrachtet die Wärmebrücke am Eckpunkt von Innenwand, einbindender Geschossdecke und innen gedämmter Außenwand. Im Nachfolgenden 2D-Grundriss ist die Draufsicht und der Anschluss der Innenwand an die Außenwand dargestellt.

2D- Grundriss	3D- Wärmebrückenvisualisierung





4.4 Berechnungsmethoden und Hilfsmittel

4.4.1 Verwendete Programme

4.4.1.1 Inventor Professional

Inventor ist eine Software zur Bildung von Modellen dreidimensionaler Objekte, die hauptsächlich zur rechnergestützten Entwicklung von Konstruktionen (vorrangig im Maschinenbau) genutzt wird. Das Programm bietet z.B. auch integrierte Funktionen zur Bewegungssimulation und zu Spannungsanalysen mit FEM. Inventor gehört zu Autodesk, einem der führenden Hersteller von 3D Design Software.

Die Modelle der Anschlussdetails zur Wärmebrückenberechnung werden teilweise mit Inventor generiert und anschließend in Comsol Multiphysics importiert.

4.4.1.2 Comsol Multiphysics

Für die Berechnung des Wärmedurchgangs durch die erstellten Bauteile und der sich einstellenden Oberflächentemperaturen wurde Comsol Multiphysics verwendet. Das Programm ermöglicht die Modellierung und Simulation von physikalischen Phänomenen. Dabei kann die Simulationsplattform mit über 30 Physikinterfaces erweitert werden, die auch gekoppelt werden können. Dabei können z.B. Modelle für elektrische, mechanische, chemische und Fluidströmungs-Anwendungen berechnet werden. Für Wärmedurchgangsberechnungen benötigt man das Heat Transfer Module. Die Software basiert auf der Finite-Elemente-Methode, einem numerischen Diskretisierungsverfahren.

Die Geometrie und Materialkennwerte können mit variablen Parametern aufgebaut werden. Änderungen bei ähnlichen Modellen sind so schnell möglich. Auch kann eine Reihe von Berechnungen mit unterschiedlichen Parametersätzen (wie Wärmeleitfähigkeit und Dicke der Dämmung) in einem Berechnungsvorgang durchgeführt werden. Dadurch ergeben sich oft viele Modelle, was auch mit dementsprechender Rechen- und Speicherzeit verbunden ist. Für die in dieser Arbeit erstellten Modelle wurde eine Volumenkörpervernetzung mit Tetraedern gewählt. Für die Berechnung gibt es verschiedene indirekte und direkte Löser (Solver). Comsol Multiphysics ist nach der DIN EN ISO 10211 verifiziert.

4.4.1.3 WUFI-Bio

WUFI-Bio ist ein Programm, welches ein biohygrothermisches Modell zur Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos einsetzt. Dabei werden auf Grundlage des Isoplethenmodells (siehe Abschnitt 4.4.2.1) Sporenkeimung und Myzelwachstum von in Innenräumen vorkommenden Schimmelpilzen berechnet. Kein Schimmelpilzwachstum wird prognostiziert, wenn der Wassergehalt der Spore den Grenzwassergehalt nicht überschreitet. Bis 50 mm errechnetes Schimmelwachstum im Jahr wird nach WUFI-Bio als noch unbedenklich eingestuft. Von 50 bis 200 mm sollten weitere genauere Betrachtungen erfolgen. Über 200 mm sollte die Konstruktion auf keinen Fall so ausgeführt werden.

Das Programm berücksichtigt die relative Luftfeuchtigkeit, die Temperatur und das Substrat. Weitere Faktoren, die das Schimmelpilzwachstum beeinflussen können, werden nicht berücksichtigt. Somit kann Schimmelpilzwachstum vom Programm vorhergesagt werden, auch wenn in der Realität kein Schimmel entstehen würde. Die Berechnungen liegen demnach auf der sicheren Seite.

4.4.2 Schimmelpilzprognose

4.4.2.1 Isoplethenmodell

Für Schimmelpilze gibt es verschiedene Wachstumsvoraussetzungen, die im WTA Merkblatt 6-3-05/D erläutert werden. Entscheidende Umgebungsbedingungen sind die herrschende Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft bzw. des Substrats. Wichtig ist auch das Vorhandensein von Nährstoffen im Substrat und die Zeitdauer, in der Wachstum von Schimmelpilz möglich ist (d.h. wie lange die benötigten Umstände für ein Wachstum vorhanden sind). Andere Einflussgrößen sind der pH-Wert des Substrats (Optimum zwischen 5 und 7, teilweise toleriert wird ein Wert zwischen 2 und 11) und die Lichtverhältnisse (ein hoher UV-Anteil wirkt wachstumsbeeinträchtigend). Der Schimmelpilz kann sowohl aus dem Substrat als auch aus der Luft (Wasserdampf) Feuchte entnehmen.

Der DIN 4108-2:2013-02 nach besteht ab 80 % Luftfeuchtigkeit Schimmelpilzgefahr. Allerdings gibt es verschiedene Schimmelpilzarten, die bei unterschiedlichen Luftfeuchtegehalten mit dem Wachstum beginnen. Dabei werden Pilze als xerophil bezeichnet, die unterhalb einer relativen Feuchte von 85 % wachsen können, als mesophil, wenn sie 85 % benötigen und als hydrophil, wenn sie ab 95 % wachsen können. Das WTA Merkblatt 6-3-05/D, S. 7 besagt zusätzlich: „*Diese Einteilung ist bereits über 50 Jahre alt, so dass unter Berücksichtigung neuerer Untersuchungen die Grenzen um ca. 5 bis 10 % nach unten korrigiert werden müssen*“. Weiter heißt es: „*Die Feuchtegrenze, unterhalb der kein Wachstum von Schimmelpilzen in Gebäuden auftritt, liegt bei ca. 70 % relativer Feuchte. Xerophile Pilze begnügen sich zwar schon mit einer relativen Feuchte von 65 %, aber nicht alle Spezies treten in Gebäuden auf. Mit zunehmendem Feuchtegehalt steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Schimmelpilzwachstum auftritt. Bei 80 % relativer Feuchte sind die Wachstumsbedingungen für fast alle Schimmelpilzarten erreicht. Das Optimum liegt meist bei 90 % bis 95 %.*“. In Leimer und Toepfer 2005 werden Kriterien für eine Kontamination durch Schimmelpilze angegeben. Wird Staub auf der Oberfläche vorausgesetzt, der als Nährboden für das Schimmelpilzwachstum dient, sind diese Kriterien eine relative Luftfeuchte von mindestens 65 % und eine Temperatur von 0 – 50 °C für mindestens 3 Stunden pro Tag.

Die im vorherigen Textabschnitt genannten Oberflächenfeuchten sind aus der DIN 4108-2:2013-02, dem WTA Merkblatt 6-3-05/D und Leimer und Toepfer 2005 entnommen und in Tab. 4-6 erneut aufgelistet. Dazu ist je die zugehörige Oberflächentemperatur mithilfe des Wasserdampfsättigungsdrucks nach Volland et al. 2012 ermittelt worden. Die Randbedingungen für diese Ermittlung richten sich nach DIN 4108-2:2013-02und sind eine Lufttemperatur von 20 °C und eine relative Raumluftfeuchte von 50 %.

Tab. 4-6: Temperaturen zu kritischen Oberflächenfeuchten aus Literatur.

r.F. [%]	Θ_{Si} [°C]	Beschreibung
65	17,1	Kontamination nach Leimer und Toepfer 2005
70	14,7	Wachstum in Innenräumen nach WTA Merkblatt 6-3-05/D, S. 7
80	12,6	Schimmelpilzbildung auf der Oberfläche nach DIN 4108-2
100	9,3	Tauwasserausfall

Um die Wachstumsbedingungen von Schimmelpilzen zu beurteilen, müssen Feuchte und Temperaturkriterien gekoppelt betrachtet werden. Zusätzlich muss das Substrat mitberücksichtigt werden. Im WTA Merkblatt 6-3-05/D werden Isoplethensysteme für die Beurteilung von Wachstumsvoraussetzungen vorgestellt. Bei diesen beschriebenen Systemen werden nur im Innenraum auftretende Pilzarten berücksichtigt. Die unterste Grenze möglicher Pilzaktivität wird im Isoplethensystem LIM (Lowest Isopleth for Mould) genannt. Diese Isoplthensysteme sind in drei Substratgruppen eingeteilt, die die Untergrundverhältnisse beschreiben. Dabei ist Substratgruppe 0 der optimale Nährboden, Substratgruppe I sind Baustoffe mit biologisch gut verwertbaren Substraten (z.B. Tapeten, verschmutzte Oberflächen) und Substratgruppe II sind Baustoffe mit schlecht verwertbaren Substraten (Putze). Die minimalen Keim- und Wachstumsbedingungen, also die LIM-Kurven, sind in Abb. 4-5 dargestellt.

Es werden aber auch Einschränkungen für die Anwendung des Isoplethensystems genannt: *„Das vorgestellte Isoplethenmodell kann eine durch Trockenperioden auftretende Austrocknung bzw. ein Absterben der Sporen nicht berücksichtigen“* (WTA Merkblatt 6-3-05/D, S. 14). Für die praktische Anwendung des Verfahrens wird das Programm WUFI-Bio (siehe Abschnitt 4.4.1.3) vorgestellt und dessen Anwendung mit einem Beispiel beschrieben. Allerdings besteht das Prognosemodell auf vereinfachten Annahmen, die auf der sicheren Seite liegen und so kann auch bei prognostiziertem Schimmelpilzwachstum unter Verwendung des Isoplethensystems mit WUFI-Bio in der Realität kein Wachstum auftreten.

4.4.2.2 Herangehensweise zur vereinfachten Hochrechnung auf die Jahresprognose

Da die instationäre Berechnung nur jeweils für einen Monat durchgeführt wird, soll untersucht werden, wie groß der Anteil des prognostizierten Schimmelpilzwachstums des Monats Januar im Vergleich zum prognostizierten Schimmelpilzwachstum im ganzen Jahr ist. Grundgedanke dabei ist, anhand des prognostizierten Schimmelpilzwachstums für den Monat Januar auf das gesamte Jahreswachstum zu schließen. Aus diesem Grund wird für jedes Detail die Wärmedurchgangsberechnung und Schimmelpilzwachstumsprognose für wenigstens ein bis drei Varianten von Mauerwerk und Innendämmung für ein gesamtes Jahr durchgeführt.

Das Verhältnis des Schimmelpilzwachstums im Januar zu der gesamten Jahresprognose ergibt für jedes Detail ein ähnliches Verhalten, was in Abb. 4-7 zu sehen ist. Je Detail ergibt sich zur Wachstumsprognose aus einer linearen Regression ein Verhältnis von Schimmelpilzwachstum im Berechnungszeitraum Januar zur Jahresprognose.

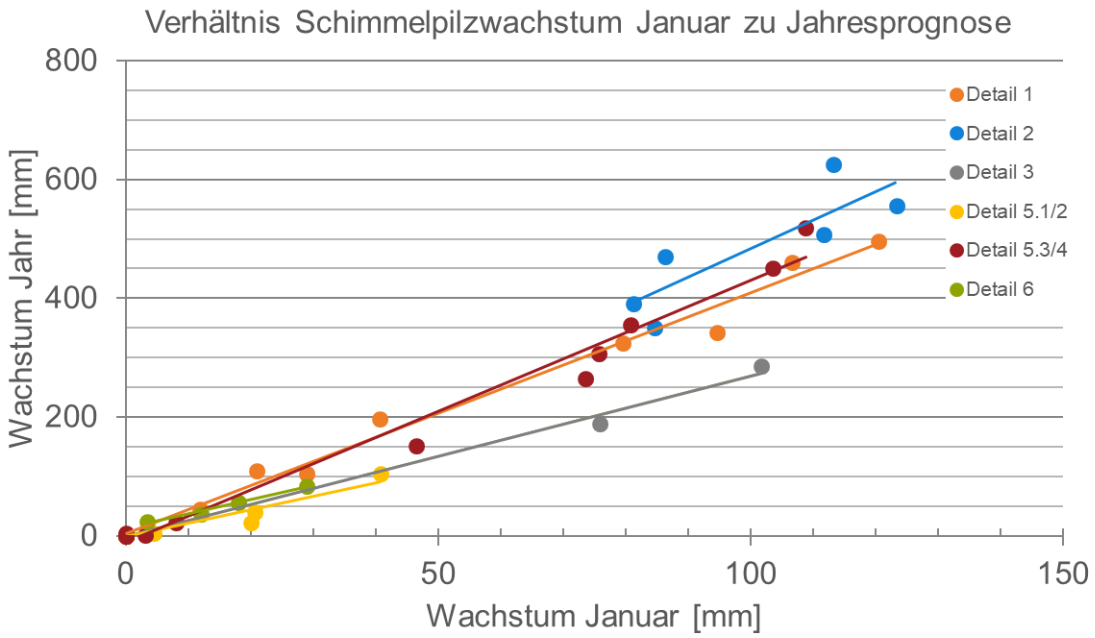


Abb. 4-7: Verhältnis Schimmelpilzwachstum im Januar zu gesamten Jahresprognose.

Bei dem Quotienten wird das prognostizierte Schimmelpilzwachstum im Jahr durch das im Monat Januar geteilt. So erhält man je Anschlussdetail den Multiplikationsfaktor für die restlichen nur für Januar instationär berechneten Varianten. Der Quotient errechnet sich wie folgt:

$$Q_{J;M} = \frac{Wachstum\ im\ gesamten\ Jahr}{Wachstum\ im\ Januar}\ [-]$$

In Tab. 4-11 ist die Herleitung des Faktors zwischen dem Schimmelpilzwachstum im gesamten Jahr und im Monat Januar beispielhaft für Detail 3 zusammengefasst. Dieses Vorgehen wurde äquivalent für alle Anschlussdetails durchgeführt. Lediglich für das Detail Nr. 4 (Außenecke an Bodenplatte im Erdreich) kann kein Quotient zwischen dem Schimmelpilzwachstum im Januar und der Jahresprognose bestimmt werden. Aufgrund der thermischen Trägheit des Erdreichs ist es für dieses Detail notwendig, die Simulation jeweils für das ganzes Jahr durchzuführen. Für weitere Informationen siehe Abschnitt 4.3.4.3.

Tab. 4-7: Ergebnisse des ermittelten Faktors zur Hochrechnung auf die Jahreswerte am Beispiel von Detail 3.

Variante						**Wachstum** [mm]		**Quotient** [-]
Position		d ID [cm]	λ ID [W/(mK)]	λ_{MW} [W/(mK)]	Substrat-gruppe	Jahr	Januar	Jahr/Januar
3	1	1,0	0,05	0,64	I	285,11	101,71	2,80
3	1	1,0	0,05	0,64	II	188,69	75,79	2,49
3	2	1,0	0,05	0,64	I	1,97	0,00	-
3	2	1,0	0,05	0,64	II	0,00	0,00	-
Mittel des Quotienten für Detail 3.:								2,65

Die folgende Tab. 4-8 zeigt die ermittelten Quotienten je Detailkonstruktion. Diese Quotienten sind die Grundlage für die Ableitung der Schimmelpilzprognose für ein gesamtes Jahr anhand der Wachstumsdaten für den Monat Januar.

Für Detail Nr. 4 ist kein Faktor ermittelt worden, da durch die große Masse an Erdreich im Zeitraum von einem Monat der Einfluss der Starttemperatur nicht ausgeschlossen werden konnte. Für mehr Informationen siehe Abschnitt 4.3.4.3.

Tab. 4-8: Ergebnisse des Quotienten $Q_{J;M}$ für alle Details.

Detail	**$Q_{J;M}$**
1. Außenecke Innendecke	4,19
2. Außenecke Attika	4,83
3. Außenecke Kellerdecke im Erdreich	2,65
4. Außenecke Bodenplatte im Erdreich	-
5.1/2 Einbindende Decke über Fenster	1,87
5.3/4 Fenster (Sturz, Brüstung)	3,88
6. Einbindende Innenwand	2,85

4.5 Durchführung der Berechnungen

4.5.1 Vorgehen

Durch eine systematische Wärmebrückenanalyse mit Variation verschiedenster Parameter soll eine Aussage zur Abhängigkeit der 2D- und 2D- Oberflächentemperaturen getroffen werden. Dazu wurde eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt.

Anschlussdetails
Insgesamt wurden 6 verschiedene typische Anschlussdetails im gesamten Gebäude betrachtet:

- Detail 1: Anschluss Geschossdecke an Außenecke
- Detail 2: Anschluss Flachdach mit Attika an Außenecke
- Detail 3: Anschluss Kellerdecke an Außenecke
- Detail 4: Anschluss Bodenplatte an Kelleraußenecke
- Detail 5: Fensteranschlüsse an Außenwand
- Detail 6: Innenwand an Geschossdecke

Innerhalb dieser Details wurden bei den 3D-Wärmebrückenberechnungen wiederum die Oberflächentemperaturen an bis zu vier verschiedenen Punkten berechnet und betrachtet. Die einzelnen Details und die betrachteten Punkte sind in Kapitel 4.3.5 genauer dargestellt und aufgeführt.

Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks der Außenwand
Um die verschiedenen Baualtersklassen im Bestand abzudecken, wurde die Wärmeleitfähigkeit der Außenwand bei gleichbleibender Konstruktionsstärke von 30 cm variiert. Die Wärmeleitfähigkeiten wurde zwischen 0,10 und 1,00 W/mK in sieben Stufen variiert. Die daraus resultierenden U-Werte reichen von 0,32 – 2,13 W/m²K. In Kapitel 4.3.2.1 sind die Varianten und die Hintergründe dazu genauer erläutert.

Wärmeleitfähigkeit und Dämmstärke der Innendämmung
Um eine möglichst große Bandbreite an Innendämmungsvarianten abzubilden, wurden insgesamt 26 verschiedene Kombinationen aus Dämmstärke und Wärmeleitfähigkeit betrachtet. Die Kombinationen und deren Auswahlkriterien sind in Kapitel 4.3.2.2 dargestellt.

Stationäre und Instationäre Randbedingungen
Neben den Variationen in der Konstruktion wurden auch verschiedene klimatische Randbedingungen untersucht. So wurden neben den Stationären Randbedingungen auch instationäre Berechnungen durchgeführt. Diese wurden aufgrund des deutlich höheren Rechenaufwandes jedoch nur für ausgewählte Parameterkombinationen durchgeführt. In Kapitel 4.3.4 sind die gewählten Randbedingungen genauer erläutert.

4.5.2 Berechnungsprogramm

Die zuvor vorgestellten Parameter ergeben durch Variation eine Vielzahl möglicher Berechnungskombinationen. Um den Berechnungsaufwand im Rahmen zu halten, wurden verschiedene Berechnungsprogramme definiert.

Detailliertes Berechnungsprogramm
Am Detail 2 (Anschluss Flachdach mit Attika an Außenwand) und Detail 3 (Anschluss Kellerdecke an Außenecke) wurde ein sehr detailliertes Berechnungsprogramm durchgeführt. Dieses ist in Tab. 4-9 zusammengefasst.

Die 26 definierten Kombinationen aus Dämmstärke und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung wurden mit allen sieben Varianten des Bestandsmauerwerks unter stationären Bedingungen berechnet. Für die instationären Berechnungen wurden jeweils drei Kombinationen für die Innendämmung mit vier verschiedenen Bestandsmauerwerken variiert. Insgesamt wurden für die Details 2 und 3 182 stationäre und 12 instationäre Berechnungen durchgeführt.

Moderates Berechnungsprogramm
Um den Berechnungsaufwand im Rahmen zu halten, wurde für die übrigen Anschlussdetails 1, 4, 5 und 6 für die stationären Berechnungen ein etwas moderateres Berechnungsprogramm festgelegt. Dieses ist in Tab. 4-10 zusammengefasst.

Dabei wurde die Anzahl der Innendämmungskombinationen von 26 auf neun reduziert. Bei der Auswahl wurde bewusst die Maximal- und Minimalkombinationen aus Dämmstärke und Wärmeleitfähigkeit der gesetzten Bandbreite des Wärmedurchlasswiderstands von 1,2 – 2,5 m^2K/W der Innendämmkonstruktion gewählt. Der Variantenumfang der Wärmeleitfähigkeit der Bestandskonstruktion wurde von sieben auf fünf reduziert. So ergaben sich jeweils für die Betrachteten Details 45 stationäre Berechnungsvarianten. Der Umfang und die Wahl der Parameter der instationären Berechnungen wurden im Vergleich zum detaillierten Programm nicht reduziert. Es ergaben sich daher wiederum jeweils 12 verschiedene Parameterkombinationen.

Insgesamt ergeben sich daraus 544 stationäre und 72 instationäre Wärmebrücken-berechnungen an den dreidimensionalen Modellen.

Tab. 4-9: Durchgeführte 2D- und 3D-Wärmebrückenberechnungen für die Anschlussdetails 2 und 3.

Parametervariation der 2D- und 3D- Wärmebrückenberechnungen für die Anschlussdetails 2 und 3															
Variation Innendämmung		Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk [W/mK]													
Dicke [cm]	WLF [W/mK]	0,10		0,30		0,42		0,53		0,64		0,80		1,00	
1	0,050	•	•	•		•	•	•		•	•	•		•	•
1	0,010	•		•		•		•		•		•		•	
2	0,010	•		•		•		•		•		•		•	
2	0,150	•		•		•		•		•		•		•	
2	0,020	•		•		•		•		•		•		•	
3	0,015	•		•		•		•		•		•		•	
3	0,020	•		•		•		•		•		•		•	
3	0,030	•	•	•		•	•	•		•	•	•		•	•
4	0,020	•		•		•		•		•		•		•	
4	0,030	•		•		•		•		•		•		•	
4	0,035	•		•		•		•		•		•		•	
4	0,040	•		•		•		•		•		•		•	
4	0,050	•		•		•		•		•		•		•	
5	0,030	•		•		•		•		•		•		•	
6	0,030	•		•		•		•		•		•		•	
6	0,035	•		•		•		•		•		•		•	
6	0,040	•		•		•		•		•		•		•	
6	0,050	•		•		•		•		•		•		•	
6	0,065	•		•		•		•		•		•		•	
7	0,030	•		•		•		•		•		•		•	
8	0,035	•		•		•		•		•		•		•	
8	0,040	•		•		•		•		•		•		•	
8	0,050	•		•		•		•		•		•		•	
8	0,065	•		•		•		•		•		•		•	
10	0,050	•		•		•		•		•		•		•	
10	0,065	•	•	•		•	•	•		•	•	•		•	•
Σ Stationär = 182		26		26		26		26		26		26		26	
Σ Instationär = 12			3				3				3				3

Tab. 4-10: Durchgeführte 2D- und 3D- Wärmebrückenberechnungen für die Anschlussdetails 1, 4, 5 und 6.

Parametervariation der 2D- und 3D- Wärmebrückenberechnungen für die Anschlussdetails 1, 4, 5 und 6											
Variation Innendämmung		Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk [W/mK]									
Dicke [cm]	WLF [W/mK]	0,10		0,42		0,53		0,64		1,00	
1	0,050	•	•	•	•	•		•	•	•	•
2	0,150	•		•		•		•		•	
3	0,015	•		•		•		•		•	
3	0,030	•	•	•	•	•		•	•	•	•
4	0,040	•		•		•		•		•	
6	0,065	•		•		•		•		•	
7	0,030	•		•		•		•		•	
8	0,040	•		•		•		•		•	
10	0,065	•	•	•	•	•		•	•	•	•
Σ Stationär = 45		9		9		9		9		9	
Σ Instationär = 12			3		3				3		3

4.5.3 Ergebnisse stationäre Berechnungen

Nachfolgend sind exemplarisch die Berechnungsergebnisse der minimalen Oberflächentemperatur der 2D- und 3D-Wärmerückenberechnungen in Tab. 4-11 zusammengefasst. In der Tabelle werden beispielhaft die Ergebnisse des Details 3 (Anschluss Kellerdecke an Außenecke) dargestellt. Wie zuvor in Kapitel 4.5.2 dargestellt, wurden für dieses Detail insgesamt 182 Varianten für die 2D- und 3D-Wärmebrückenberechnungen betrachtet. Pro Variante wurden drei Ergebnisse für die minimale Oberflächentemperatur ermittelt:

- $2D_K$ - minimale Oberflächentemperatur der linienförmigen Wärmebrücke des zweidimensionalen Modells
- $3D_K$ - Oberflächentemperatur der linienförmigen Wärmebrücken mit Abstand 1 m zur punkförmigen Wärmebrücke des dreidimensionalen Modells
- $3D_E$ - Oberflächentemperatur der punktförmigen Wärmebrücke des dreidimensionalen Modells

Diese drei Punkte wurden jeweils für den unteren Raum (Kellerraum) und den oberen Raum (Erdgeschoss) berechnet.

Tab. 4-11: Berechnungsergebnisse der minimalen Oberflächentemperatur im oberen Raum von Detail 3.

		Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk [W/mK]											
		0,10			**0,30**			**0,42**			**0,53**		
d	**WLF**	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$
[cm]	[W/mK]	**minθ_{si} [°C] im unteren Raum**											
0	0	16,9	16,6	13,7	15,6	15,3	11,5	15,0	14,7	10,8	14,6	14,3	10,2
1	0,050	16,5	16,1	12,8	14,5	14,1	10,0	13,8	13,3	9,0	13,2	12,7	8,3
1	0,010	16,7	16,3	13,1	14,9	14,4	10,4	14,1	13,7	9,4	13,6	13,1	8,8
2	0,010	16,5	16,1	12,9	14,6	14,2	10,1	13,9	13,4	9,1	13,3	12,8	8,5
2	0,150	16,6	16,2	13,0	14,8	14,4	10,3	14,1	13,6	9,3	13,5	13,1	8,7
2	0,020	16,7	16,3	13,1	14,9	14,5	10,5	14,2	13,8	9,5	13,7	13,2	8,9
3	0,015	16,6	16,2	12,9	14,7	14,2	10,1	14,0	13,5	9,2	13,4	13,0	8,5
3	0,020	16,6	16,2	13,0	14,8	14,4	10,3	14,1	13,6	9,3	13,5	13,1	8,7
3	0,030	16,7	16,3	13,1	15,0	14,6	10,5	14,3	13,9	9,6	13,8	13,3	8,9
4	0,020	16,6	16,2	12,9	14,8	14,3	10,2	14,0	13,6	9,2	13,5	13,1	8,6
4	0,030	16,7	16,3	13,0	15,0	14,5	10,4	14,3	13,8	9,5	13,8	13,3	8,8
4	0,035	16,8	16,3	13,1	15,1	14,6	10,5	14,4	13,9	9,5	13,8	13,3	8,9
4	0,040	16,8	16,4	13,1	15,1	14,6	10,5	14,5	13,9	9,6	14,0	13,4	9,0
4	0,050	16,7	16,4	13,2	14,9	14,7	10,6	14,2	14,0	9,7	13,7	13,5	9,1
5	0,030	16,7	16,3	13,0	14,9	14,4	10,3	14,2	13,7	9,4	13,7	13,2	8,8
6	0,030	16,7	16,2	13,0	15,0	14,4	10,3	14,3	13,7	9,4	13,8	13,2	8,7
6	0,035	16,7	16,3	13,0	15,0	14,5	10,4	14,3	13,8	9,4	13,8	13,3	8,8
6	0,040	16,8	16,3	13,1	15,1	14,6	10,4	14,4	13,9	9,5	13,9	13,4	8,9
6	0,050	16,9	16,4	13,1	15,2	14,6	10,5	14,5	14,0	9,6	14,1	13,5	9,0
6	0,065	16,7	16,4	13,2	14,9	14,8	10,7	14,2	14,1	9,8	13,7	13,6	9,1
7	0,030	16,7	16,2	12,9	14,9	14,4	10,3	14,2	13,7	9,4	13,7	13,2	8,7
8	0,035	16,7	16,2	13,0	15,0	14,5	10,3	14,3	13,8	9,4	13,8	13,3	8,8
8	0,040	16,7	16,3	13,0	15,0	14,5	10,4	14,3	13,8	9,5	13,8	13,4	8,9
8	0,050	16,8	16,3	13,1	15,1	14,6	10,5	14,4	13,9	9,6	13,9	13,5	9,0
8	0,065	16,8	16,4	13,2	15,2	14,7	10,6	14,5	14,1	9,7	14,1	13,6	9,1
10	0,050	16,8	16,3	13,1	15,1	14,6	10,5	14,4	14,0	9,6	14,0	13,5	9,0
10	0,065	16,8	16,4	13,1	15,2	14,7	10,6	14,6	14,1	9,7	14,1	13,6	9,1

		Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk [W/mK]								
		0,64			0,80			1,00		
d	**WLF**	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$	$2D_K$	$3D_K$	$3D_E$
[cm]	[W/mK]	**minθ_{si} [°C] im unteren Raum**								
0	0	14,2	13,9	9,8	13,8	13,5	9,2	13,3	13,0	8,7
1	0,050	12,7	12,3	7,8	12,1	11,7	7,2	11,5	11,1	6,6
1	0,010	13,1	12,7	8,2	12,5	12,1	7,6	12,0	11,5	7,0
2	0,010	12,8	12,4	7,9	12,3	11,8	7,3	11,7	11,3	6,7
2	0,150	13,1	12,6	8,1	12,5	12,0	7,5	11,9	11,5	6,9
2	0,020	13,2	12,8	8,3	12,7	12,2	7,7	12,1	11,7	7,1
3	0,015	13,0	12,5	8,0	12,4	12,0	7,4	11,9	11,4	6,8
3	0,020	13,1	12,7	8,2	12,5	12,1	7,6	12,0	11,6	7,0
3	0,030	13,3	12,9	8,4	12,8	12,3	7,8	12,3	11,8	7,2
4	0,020	13,1	12,6	8,1	12,5	12,1	7,5	12,0	11,6	6,9
4	0,030	13,3	12,8	8,3	12,8	12,3	7,7	12,3	11,8	7,1
4	0,035	13,4	12,9	8,4	12,9	12,4	7,8	12,4	11,9	7,2
4	0,040	13,5	13,0	8,5	13,0	12,5	7,9	12,5	11,9	7,3
4	0,050	13,3	13,1	8,6	12,7	12,6	8,0	12,2	12,1	7,4
5	0,030	13,2	12,8	8,3	12,7	12,3	7,7	12,2	11,8	7,1
6	0,030	13,3	12,8	8,2	12,8	12,3	7,7	12,3	11,8	7,1
6	0,035	13,4	12,9	8,3	12,9	12,4	7,7	12,4	11,9	7,2
6	0,040	13,5	12,9	8,4	13,0	12,4	7,8	12,5	11,9	7,2
6	0,050	13,6	13,1	8,5	13,2	12,6	7,9	12,7	12,1	7,4
6	0,065	13,3	13,2	8,6	12,8	12,7	8,1	12,3	12,2	7,5
7	0,030	13,3	12,8	8,3	12,8	12,3	7,7	12,3	11,8	7,2
8	0,035	13,4	12,9	8,3	12,9	12,4	7,8	12,4	12,0	7,3
8	0,040	13,4	13,0	8,4	13,0	12,5	7,8	12,5	12,0	7,3
8	0,050	13,5	13,1	8,5	13,1	12,6	7,9	12,6	12,1	7,4
8	0,065	13,7	13,2	8,6	13,2	12,7	8,1	12,7	12,2	7,5
10	0,050	13,6	13,1	8,5	13,1	12,6	8,0	12,7	12,2	7,5
10	0,065	13,7	13,2	8,7	13,2	12,8	8,1	12,8	12,3	7,6

4.5.4 Ergebnisse instationäre Berechnungen

Nachfolgend wird exemplarisch die instationären Berechnungsergebnisse des Anschlussdetails 3 (Anschluss Kellerdecke an Außenecke) vorgestellt. Es wurde eine Parameterkombination der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks von λ_{MW} = 0,42 W/mK und der Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung von λ_{ID} = 0,30 W/mK mit einer Stärke von 3 cm gewählt.

Die Oberflächentemperaturen in den Raumecken der berechneten Varianten für Detail 3 bei instationärer Rechnung mit einem gesamten Testreferenzjahr sind in

Abb. 4-8 dargestellt. Bei diesem Detail sowie bei Detail 4 musste die Anzahl an Zeitschritten aufgrund der Rechenkapazität reduziert werden.

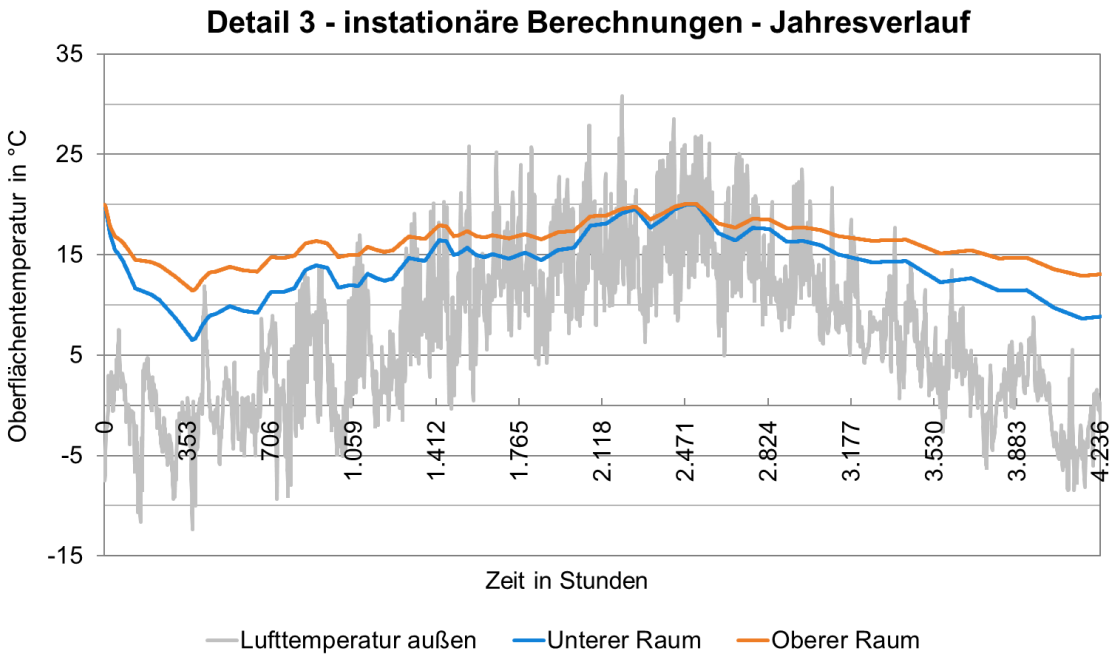


Abb. 4-8: Temperaturverlauf der instationären Betrachtung für Detail 3 im Jahresverlauf.

In Abb. 4-9 sind die Ergebnisse der Oberflächentemperaturen in den Raumecken des Bauteilanschlusses aus der instationären Berechnungen im oberen sowie im unteren Raum für den Monat Januar (vgl. Erläuterungen in Kapitel 4.3.4.2) dargestellt. Des Weiteren wurden die unter stationären Randbedingungen berechneten Oberflächentemperaturen im Eckpunkt sowie entlang der Anschlusskante zum Vergleich mit aufgetragen.

Es zeigt sich, dass die Raumtemperaturen während das Januars auf ein niedriges Niveau fallen, die jedoch noch knapp über den Werten unter stationären Standardrandbedingungen liegen.

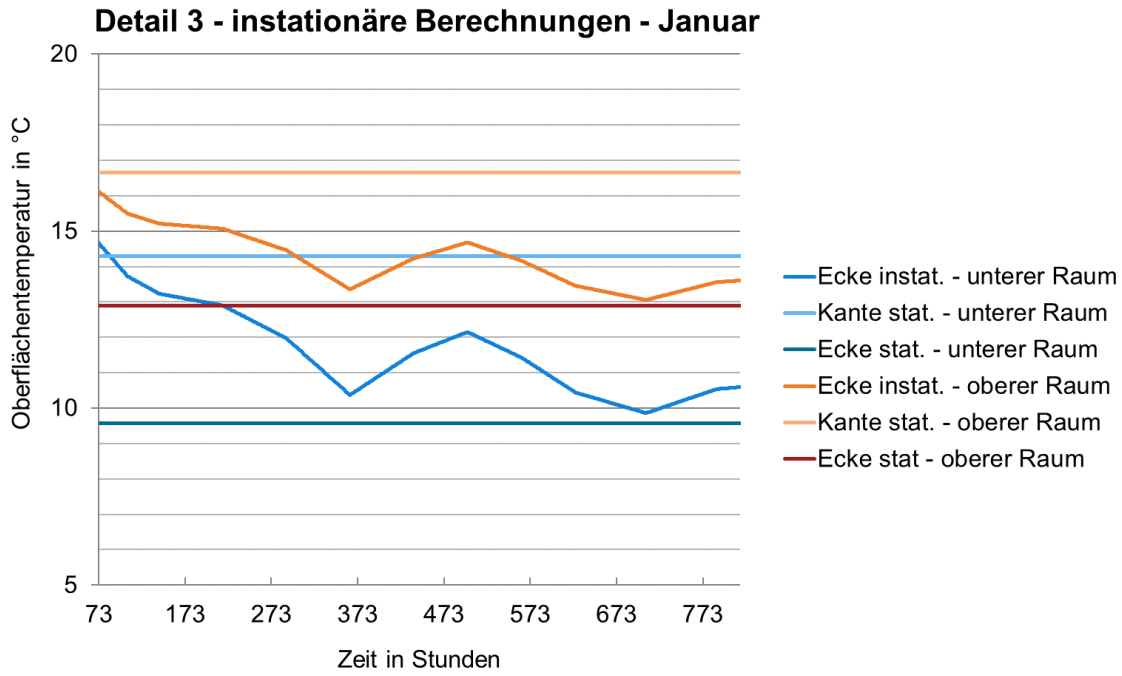


Abb. 4-9: Temperaturverlauf der instationären Betrachtung des Monats Januar für Detail 3.

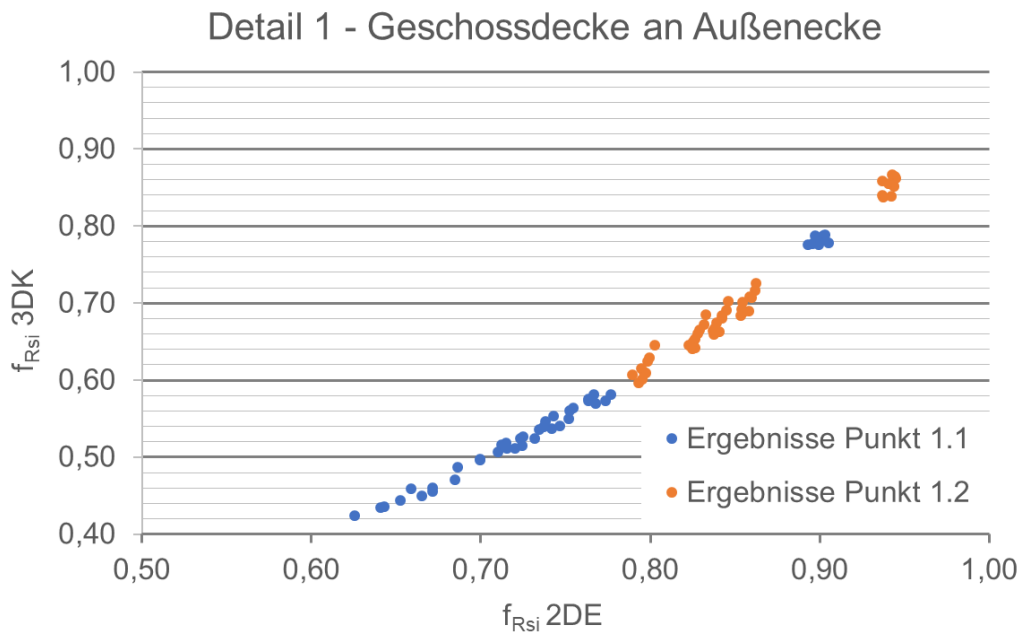
4.6 Auswertungen

4.6.1 Ermittlung der Temperaturfaktoren und Zusammenhang zwischen 2D- und 3D-Modellierungsergebnisse

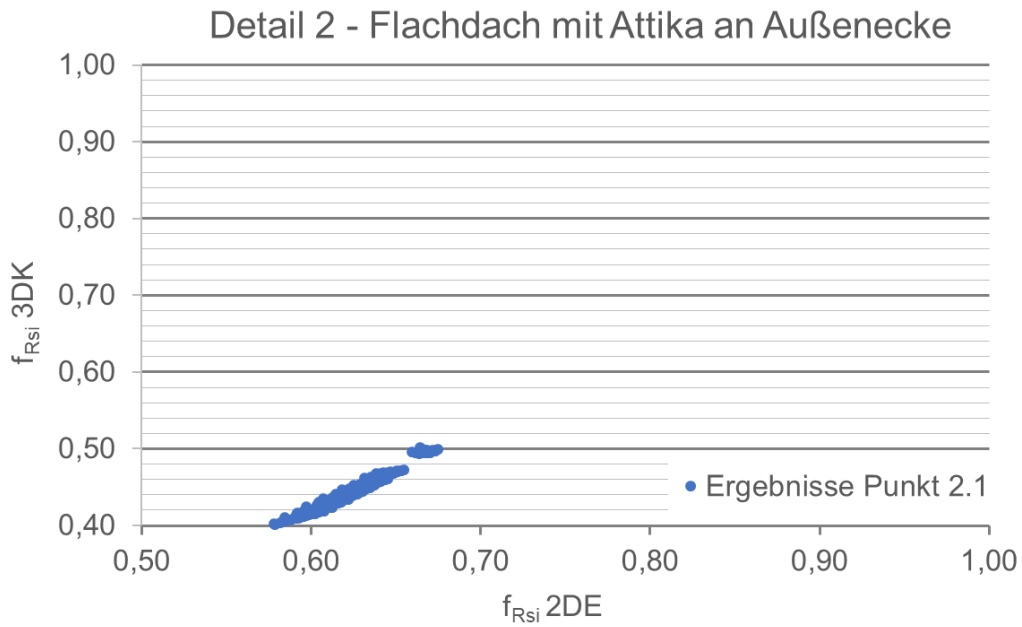
Auf Basis der in Kapitel 4.5.3 dargestellten Ergebnisse wurden die Temperaturfaktoren ermittelt. Um daraus ein Modell zur Vorhersage der 3-dimensionalen Wärmebrückeneffekte aus den Ergebnissen der 2-dimensionalen Modellierung herzuleiten, wird zuerst der Zusammenhang der beiden Berechnungsergebnisse f_{Rsi} 2DK (Temperaturfaktor der linienförmigen Wärmebrücke aus dem 2D Modell) und f_{Rsi} 3DE (Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke aus dem 3D Modell) untersucht.

4.6.1.1 Graphische Auswertung

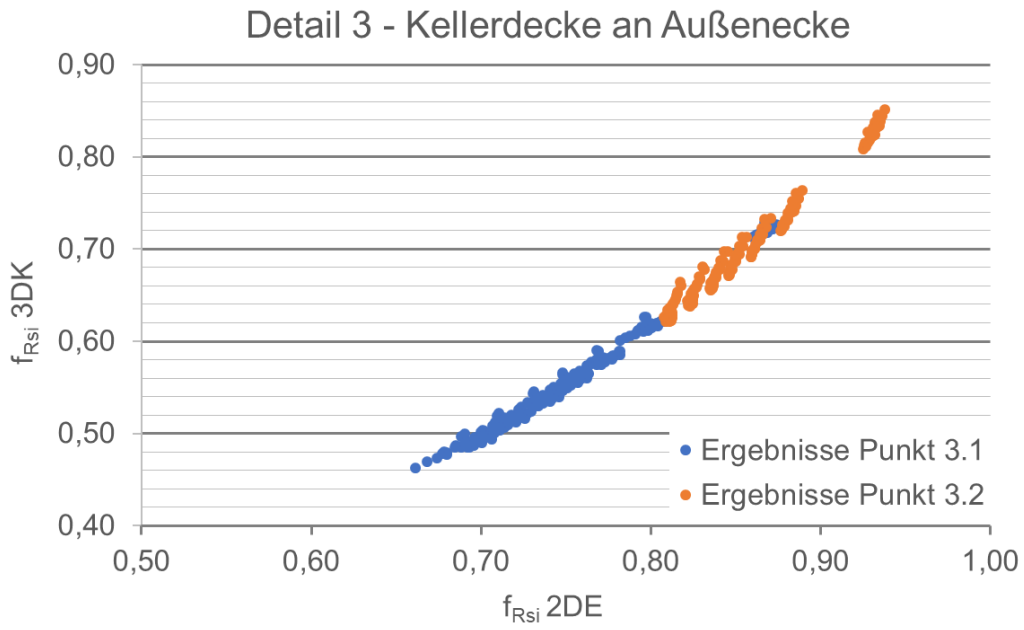
Als erster Schritt wird eine graphische Auswertung der Berechnungsergebnisse durchgeführt. In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 4-10 bis Abb. 4-15 sind diese für jedes untersuchte Detail und deren Betrachtungspunkte dargestellt. Je nach Detail und Betrachtungspunkt ist ein linearer bzw. leicht exponentieller Zusammenhang der beiden Größen ablesbar.



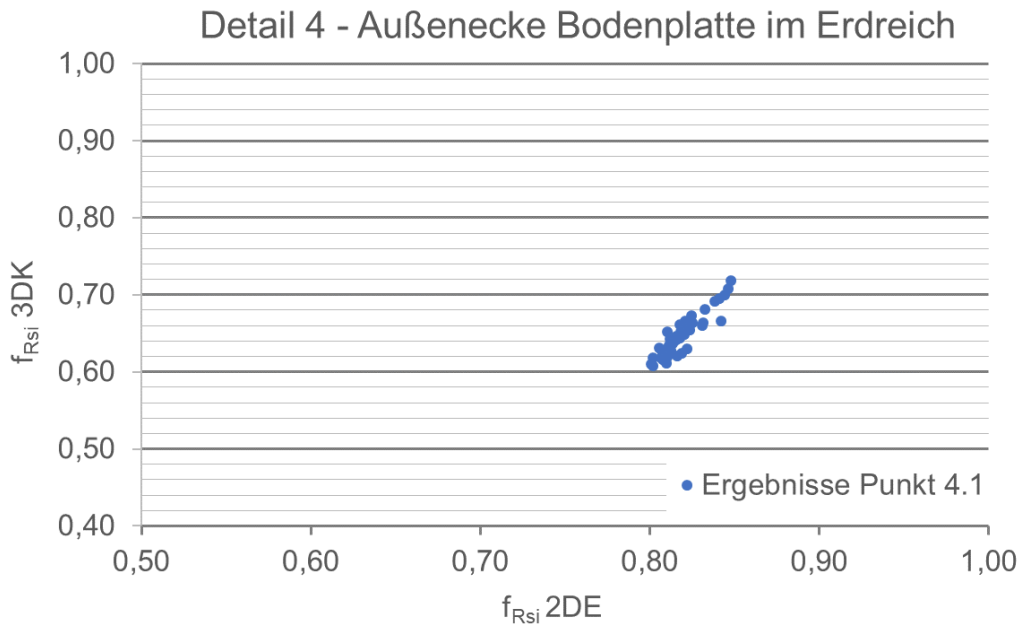
-10: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 1.



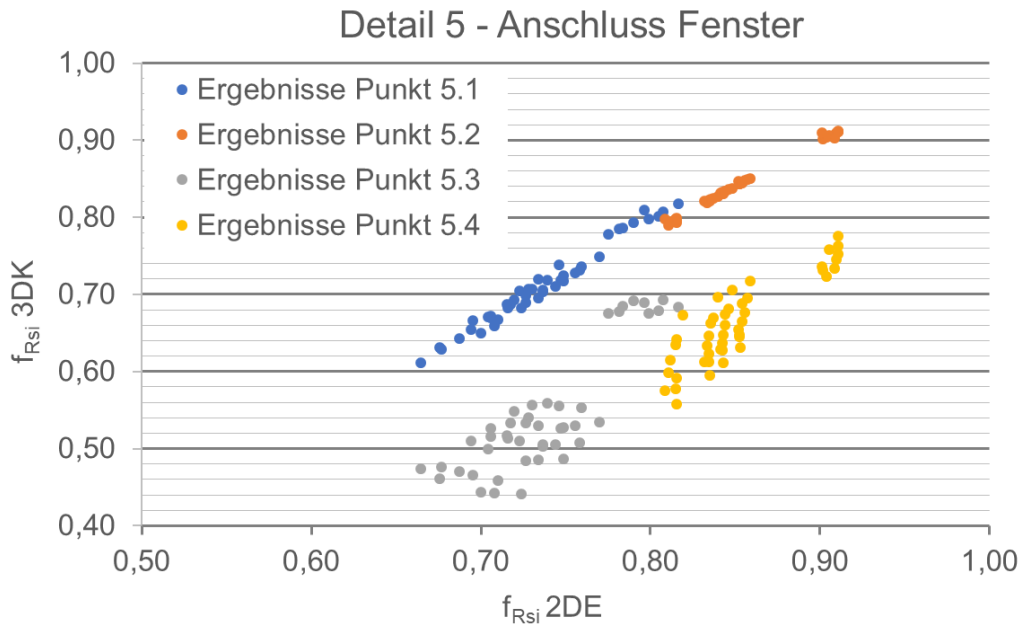
-11: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 2.



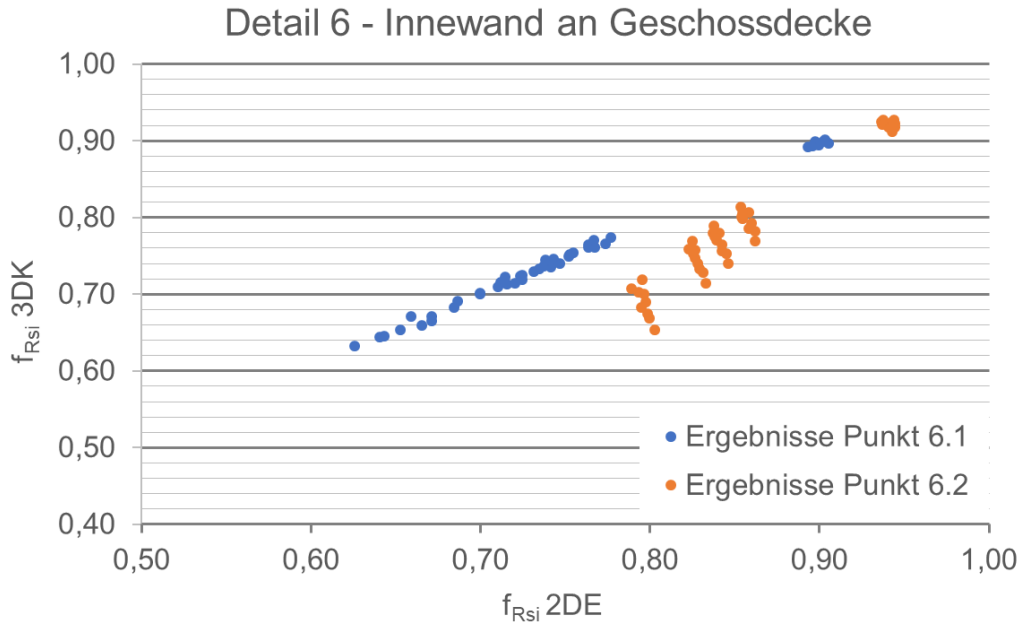
-12: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 3.



-13: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 4.



-14: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 5.



-15: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 6.

Die Anschlussdetails 4 – 6 zeigen keinen funktionellen Zusammenhang aus der direkten Gegenüberstellung der Temperaturfaktoren f_{Rsi} 2DK und f_{Rsi} 3DE. Daher muss dazu ein Näherungsmodell gefunden werden, das sich durch bekannte Parameter der Regelbauteile beschreiben lässt.

4.6.1.2 Untersuchung Einflussfaktoren

Für die weiterführenden Untersuchungen werden die Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Einflussparameter, wie z.B. Dämmstärke und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung, sowie der

Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks jeweils zum Quotienten der berechneten Temperaturfaktoren f_{Rsi} 2DK und f_{Rsi} 3DE betrachtet. Dieser wird wie folgt ermittelt:

$$Q_{3DE/2DK} = \frac{f_{Rsi,3DE}}{f_{Rsi,2DK}}$$

mit

$f_{Rsi,3DE}$ Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke aus dem 3D- Modell [-]

$f_{Rsi,2DK}$ Temperaturfaktor der linienförmigen Wärmebrücke aus dem 2D- Modell [-]

Die graphischen Auswertungen erfolgen beispielhaft am Detail 3, Punkt 3.2 (Anschluss der Kellerdecke an die Außenecke im oberen Raum).

Zusammenhang $Q_{3DK/2DE}$ und Wärmeleitfähigkeit Innendämmung

In nachfolgender Abb. 4-16 sind die ermittelten Quotienten der f_{Rsi} Werte der 3D und 2D Berechnungen gegen die jeweils zugehörige Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung aufgetragen. Des Weiteren wurden die Wärmeleitfähigkeiten des Bestandsmauerwerks farblich gekennzeichnet.

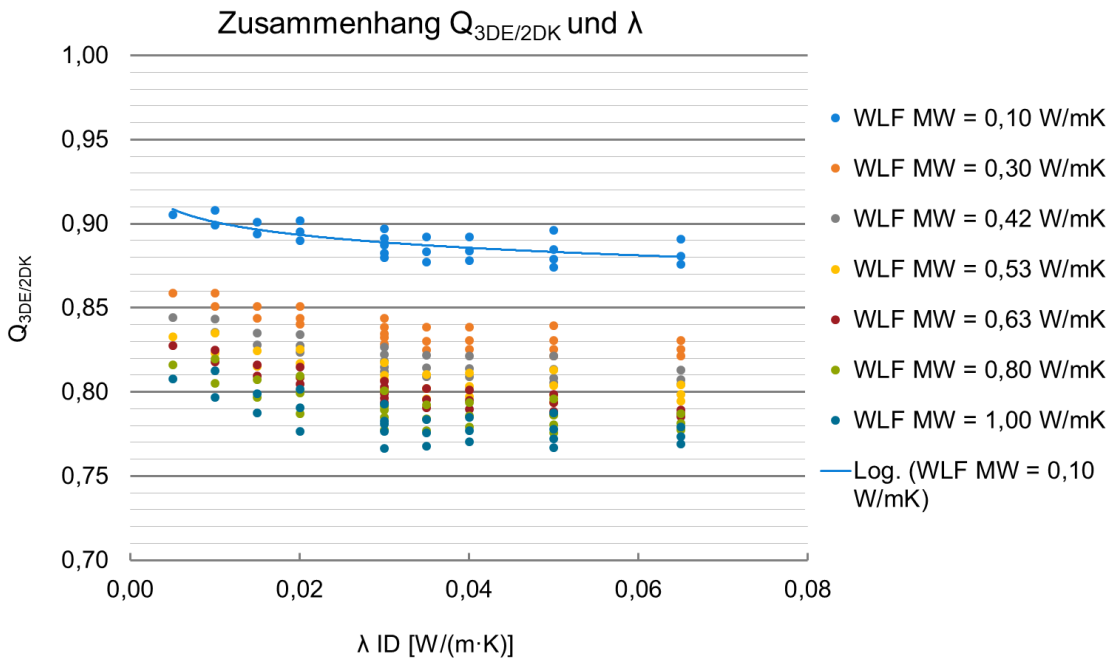


Abb. 4-16: Zusammenhang $Q_{3DE/2DK}$ und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung.

Zusammenhang $Q_{3DK/2DE}$ und Dämmstärke Innendämmung

Der Einfluss der Dämmschichtdicke in cm zum Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ ist in Abb. 4-17 dargestellt. Ebenfalls wurde die Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks farblich hervorgehoben.

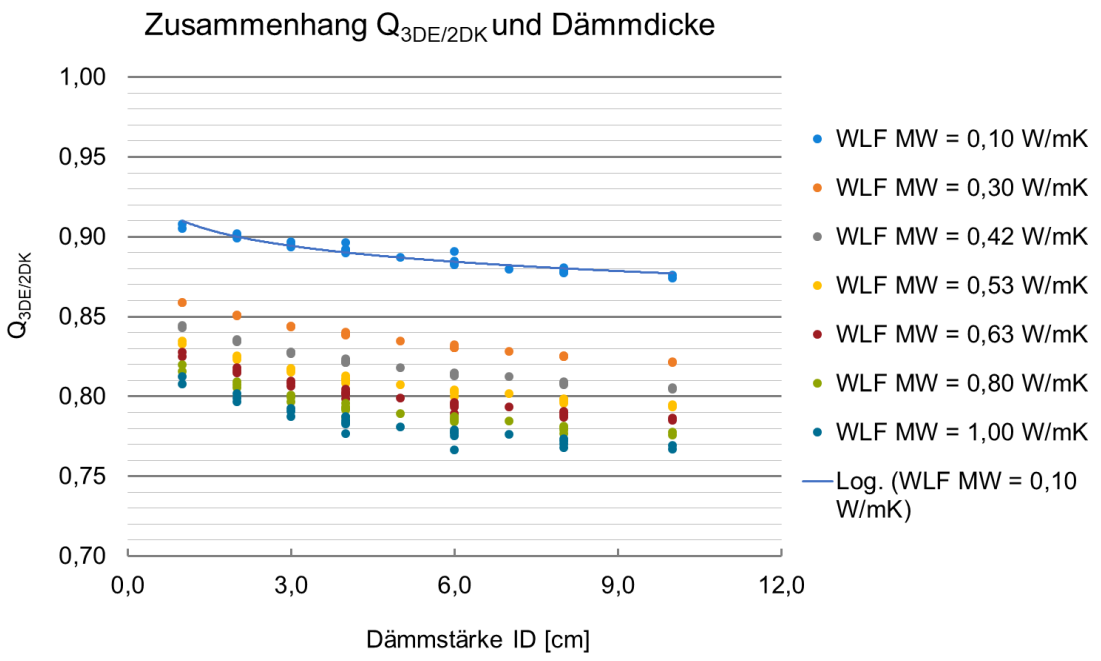


Abb. 4-17: Zusammenhang $Q_{3DE/2DK}$ und Dämmstärke der Innendämmung.

In den beiden Abbildungen Abb. 4-16 und Abb. 4-17 ist ein ähnlicher Verlauf innerhalb der einzelnen Wärmeleitfähigkeitsgruppen des Bestandsmauerwerks zu erkennen.

Zusammenhang $Q_{3DK/2DE}$ und Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Dämmstärke der Innendämmung

Als nächster Schritt, wird der Zusammenhang des Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ und dem Produkt aus der Dämmstärke, sowie der Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung graphisch dargestellt. Durch die wiederum farbliche Kennzeichnung, kann man den logarithmischen Zusammenhang dieser Größen innerhalb einer Wärmeleitfähigkeitsgruppe des Mauerwerks erkennen. Dieser logarithmische Verlauf zwischen $Q_{3DE/2DK}$ und dem Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Dämmdicke der Innendämmung ist in Abb. 4-18 dargestellt. Innerhalb der Wärmeleitfähigkeitsgruppen des Bestandsmauerwerks ist die Streuung der einzelnen Punkte um die Logarithmusfunktion sehr gering. Der Zusammenhang dieser beiden Größen kann daher sehr gut abgebildet werden.

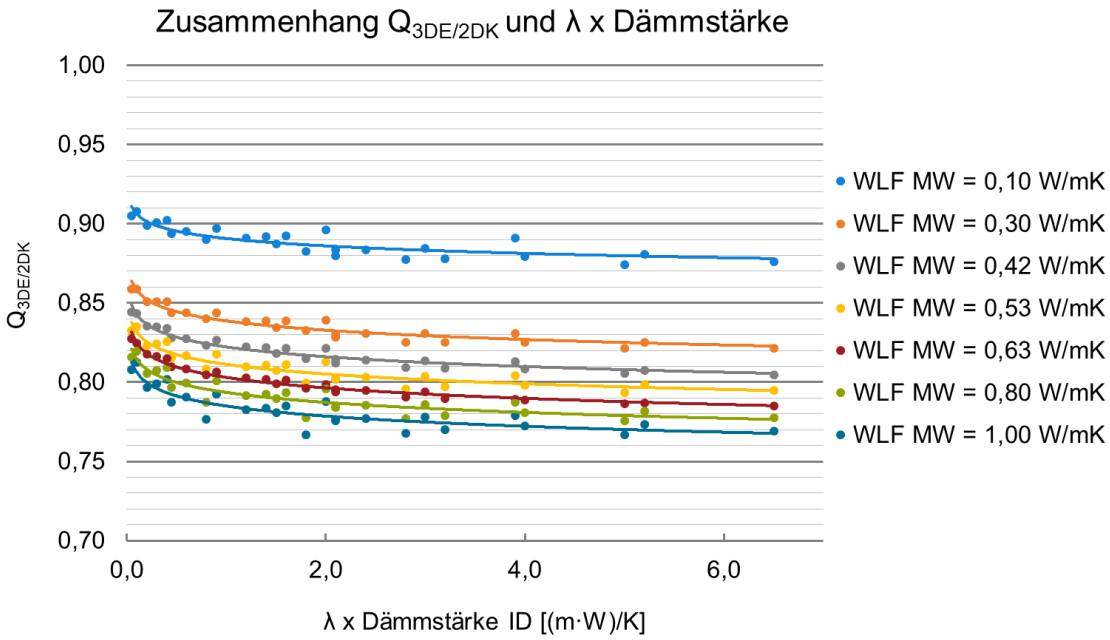


Abb. 4-18: Darstellung des logarithmischen Verlaufs von $Q_{3DE/2DK}$ zum Produkt aus WLF und Dicke der Innendämmung.

Zusammenhang $Q_{3DK/2DE}$ und Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks

Neben den Eigenschaften der Innendämmung, soll nun auch das Verhältnis vom Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ abgebildet werden. Die sieben betrachteten Varianten der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks bilden einzelne Säulen. Beispielhaft wurde in dieser Abbildung drei „Gruppen“ mit gleichem Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Dämmdicke der Innendämmung farblich gekennzeichnet. Wiederum lässt sich hierbei ein logarithmischer Zusammenhang ableiten.

Dieser logarithmische Verlauf zwischen $Q_{3DE/2DK}$ und der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks ist in Abb. 4-19 dargestellt. Der dargestellte Verlauf wurde über alle Ergebnisse gebildet.

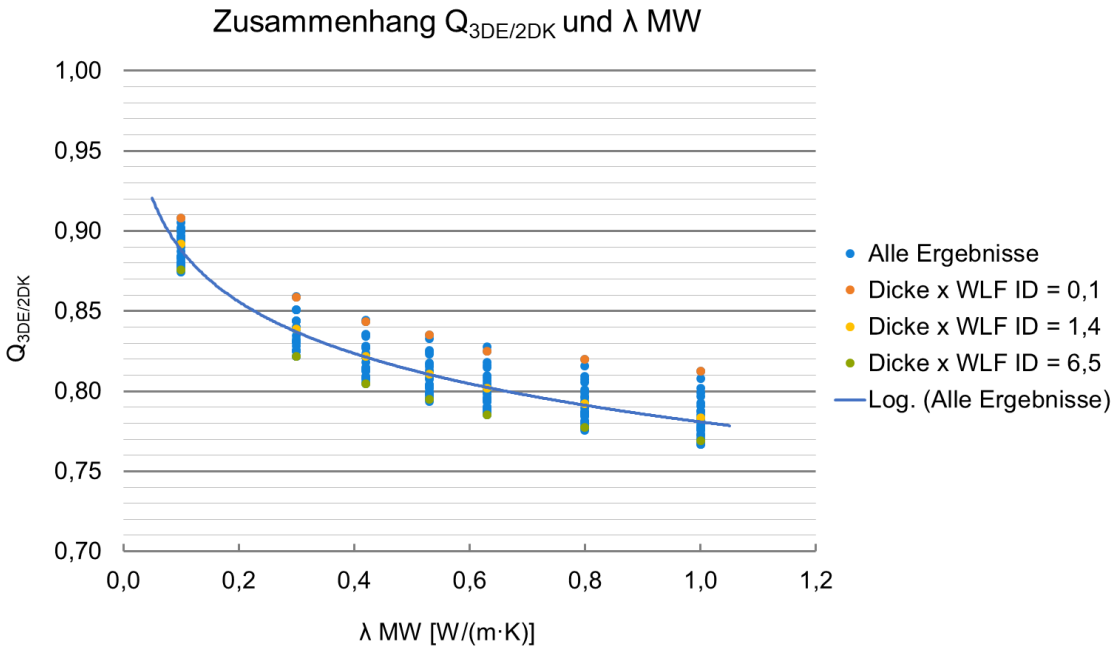


Abb. 4-19: Darstellung des logarithmischen Verlaufs von $Q_{3DE/2DK}$ und der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks.

4.6.2 Entwicklung eines Regressionsmodells

Ziel ist die Entwicklung eines Modells zur Abschätzung des 3-dimensionalen f_{Rsi} Wertes anhand von 2-dimensionalen f_{Rsi} Werten. Wie bereits im vorangegangenen Kapitel 4.6.1.2 festgehalten wurde, besteht ein logarithmischer Zusammenhang zwischen dem Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ und dem Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Dämmschichtdicke der Innendämmung (siehe Abb. 4-18). Daraus lass sich folgender Zusammenhang definieren:

$$Q_{3DE/2DK} \sim \ln(d_{ID} \cdot \lambda_{ID})$$

mit

d_{ID} Dämmschichtdicke der Innendämmung in m

λ_{ID} Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung in W/(m·K)

Des Weiteren wurde ein ebenfalls logarithmischer Zusammenhang des Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ und der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks festgestellt (vgl. Auswertung in Abb. 4-19). Daraus lässt sich folgender Zusammenhang ableiten:

$$Q_{3DE/2DK} \sim \ln(\lambda_{MW})$$

mit

λ_{MW} Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks in W/(m·K)

Begründet mit dem proportionalen Verhalten des Quotienten zum natürlichen Logarithmus von einerseits dem Produkt aus Dämmschichtdicke und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung und andererseits zum natürlichen Logarithmus der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks werden die

zwei logarithmische Terme mit den genannten Variablen gewählt, um den Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ zu beschreiben. Aus diesem Zusammenhang lässt sich der Quotient folgendermaßen darstellen:

$$Q_{3D/2D} = [A \cdot \ln(\lambda_{MW}) + B \cdot \ln(d_D \cdot \lambda_D) + C] \text{ [-]}$$

Durch eine Regressionsanalyse werden die Koeffizienten genähert, für die sich die geringste Abweichung zu den Berechnungsergebnissen ergibt. Dazu wird ein Optimierungsalgorithmus von MS Excel Solver für nichtlineare Probleme verwendet, um die Summe aller Fehlerquadrate (quadrierte Abweichungen zwischen dem jeweiligen Ergebnis von $f_{Rsi,3D}$ aus numerischer Berechnung und dem korrespondierenden Ergebnis aus dem Näherungsmodell) zu minimieren. Aus der hergeleiteten Formel für den Quotienten $Q_{3DE/2DK}$ ergibt sich folgende Formel für die Ermittlung des 3D-Temperaturfaktors auf Grundlage des 2D-Temperaturfaktors:

$$f_{Rsi,3D} = f_{Rsi,2D} \cdot [A \cdot \ln(\lambda_{MW}) + B \cdot \ln(d_D \cdot \lambda_D) + C] \text{ [-]}$$

So ergibt sich für jedes der 6 betrachteten Details ein Satz aus 3 Parametern für das Näherungsmodell. Dieses gibt die Berechnungsergebnisse mit geringen Abweichungen wieder. Für alle berechneten Varianten findet sich die größte Abweichung beim Anschlussdetail der Bodenplatte mit 0,019. Die mittlere Abweichung des genäherten $f_{Rsi,3D}$ vom jeweiligen numerischen Berechnungsergebnis aller Details und Varianten liegt bei ± 0,03.

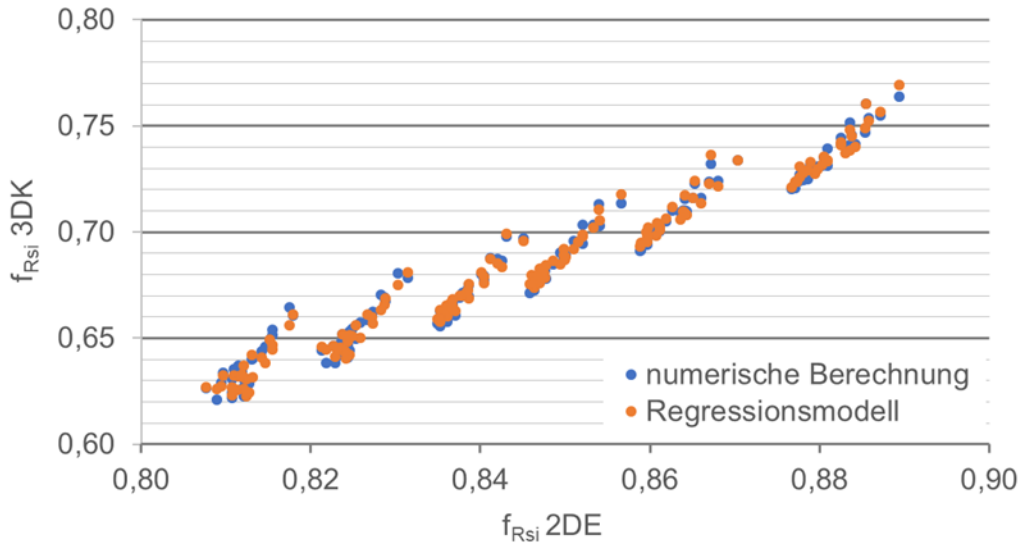


Abb. 4-20: Vergleich Regressionsmodell und numerische Lösungen (Detail 3: Anschluss Kellerwand an Außenecke der Außenwand; oberes Raumeck des beheizten Kellerraums).

Für das oben beispielhaft gezeigte Detail 3 ist die Gegenüberstellung der berechneten Temperaturfaktoren aus Wärmebrückensimulationen mit dem genäherten Regressionsmodell in oberer Abbildung dargestellt. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die übrigen in der Studie behandelten Anschlussdetails sind in Abschnitt 4.7 zusammengefasst.

4.6.3 Schimmelpilzprognose

4.6.3.1 Ergebnisauszug für Detail 3

Beispielhaft sind im Folgenden zunächst die Ergebnisse für das Detail 3 (Anschluss Kellerdecke an Außenecke) dargestellt. In Tab. 4-12 und Tab. 4-13 sind die Ergebnisse für das mit dem Faktor (s.a. Abschnitt 4.4.2.2) ermittelte Jahresschimmelpilzwachstum anhand der ermittelten Werte für Januar angegeben. Der verwendete Faktor ist ebenfalls in der Tabelle angegeben. Die Unterteilung erfolgt zuerst nach der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks und dann nach der Dämmvariante. Für jede Variante sind die zugehörigen f_{Rsi}-Werte aus der stationären Berechnung in 3D (punktförmige Wärmebrücke) und 2D (linienförmige Wärmebrücke) angegeben.

Tab. 4-12: Mithilfe des Faktors ermittelte Jahreswachstumswerte für Detail 3.1 (UNTEN).

Faktor	**4,19**		**INSTATIONÄR**		**STATIONÄR**	
Bestand	**Dämmung**		**Substratgruppe I**	**Substratgruppe II**	**fRsi**	**fRsi**
λ_{MW}	$d_{Dämm}$	$\lambda_{Dämm}$	Wachstum	Wachstum	3D	2D
[W/(m·K)]	[cm]	[mW/(m·K)]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
0,10	1	5	0,00	0,00	0,71	0,86
0,10	3	30	0,00	0,00	0,73	0,87
0,10	10	65	0,00	0,00	0,73	0,87
0,42	1	5	201,56	133,40	0,56	0,75
0,42	3	30	128,56	70,78	0,58	0,77
0,42	10	65	70,30	26,90	0,59	0,78
0,64	1	5	269,53	200,85	0,51	0,71
0,64	3	30	241,36	203,47	0,54	0,73
0,64	10	65	187,78	122,46	0,55	0,75
1,00	1	5	291,89	222,39	0,46	0,66
1,00	3	30	274,66	203,47	0,49	0,69
1,00	10	65	270,73	201,32	0,50	0,71

Tab. 4-13: Mithilfe des Faktors ermittelte Jahreswachstumswerte für Detail 3.2 (OBEN).

Faktor	4,19		INSTATIONÄR		STATIONÄR	
Bestand	Dämmung		Substratgruppe I	Substratgruppe II	fRsi	fRsi
λ_{MW}	$d_{Dämm}$	$\lambda_{Dämm}$	Wachstum	Wachstum	3D	2D
[W/(m·K)]	[cm]	[mW/(m·K)]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
0,10	1	5	0,00	0,00	0,85	0,93
0,10	3	30	0,00	0,00	0,84	0,93
0,10	10	65	0,00	0,00	0,81	0,93
0,42	1	5	0,00	0,00	0,73	0,87
0,42	3	30	0,00	0,00	0,72	0,87
0,42	10	65	0,00	0,00	0,69	0,86
0,64	1	5	0,00	0,00	0,70	0,84
0,64	3	30	3,09	4,23	0,68	0,84
0,64	10	65	23,04	0,16	0,66	0,84
1,00	1	5	4,59	0,00	0,66	0,82
1,00	3	30	42,45	4,23	0,64	0,81
1,00	10	65	95,70	46,14	0,62	0,81

In nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Schimmelpilzprognose für Detail 3 nochmals graphisch dargestellt. Farblich gekennzeichnet sind jeweils die Wärmeleitfähigkeiten des Bestandsmauerwerks. Die Ergebnisse für den oberen Raum (Punkt 3.2) sind als Rauten, die Ergebnisse für den unteren Raum (Punkt 3.1) in Kreisen dargestellt.

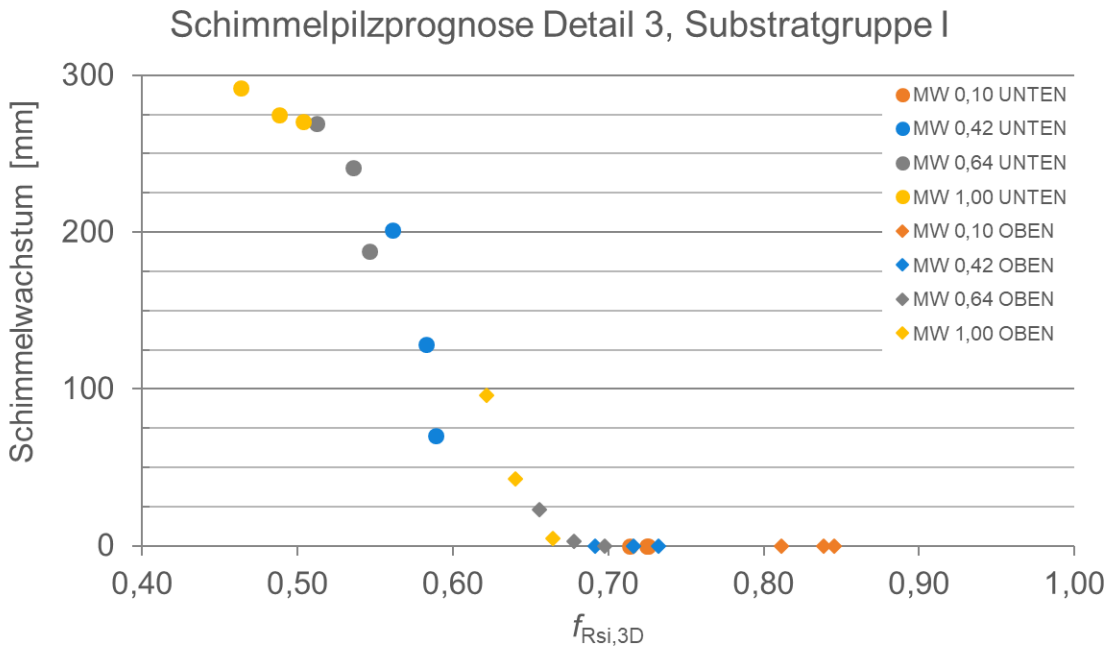


Abb. 4-21: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe I.

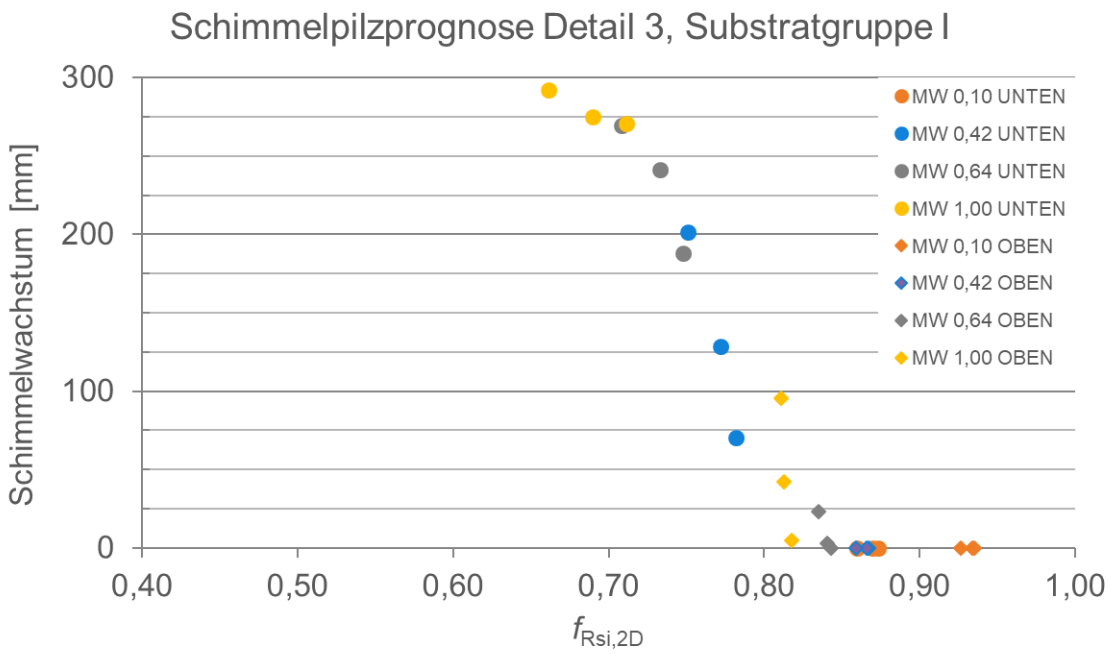


Abb. 4-22: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 2D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe I

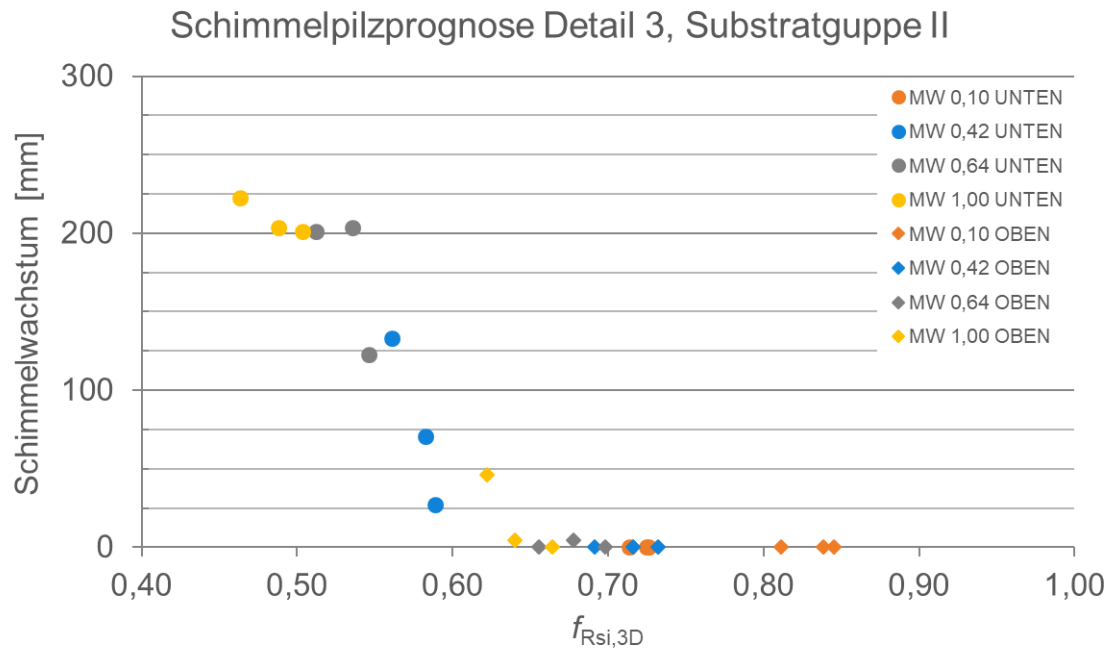


Abb. 4-23: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe II.

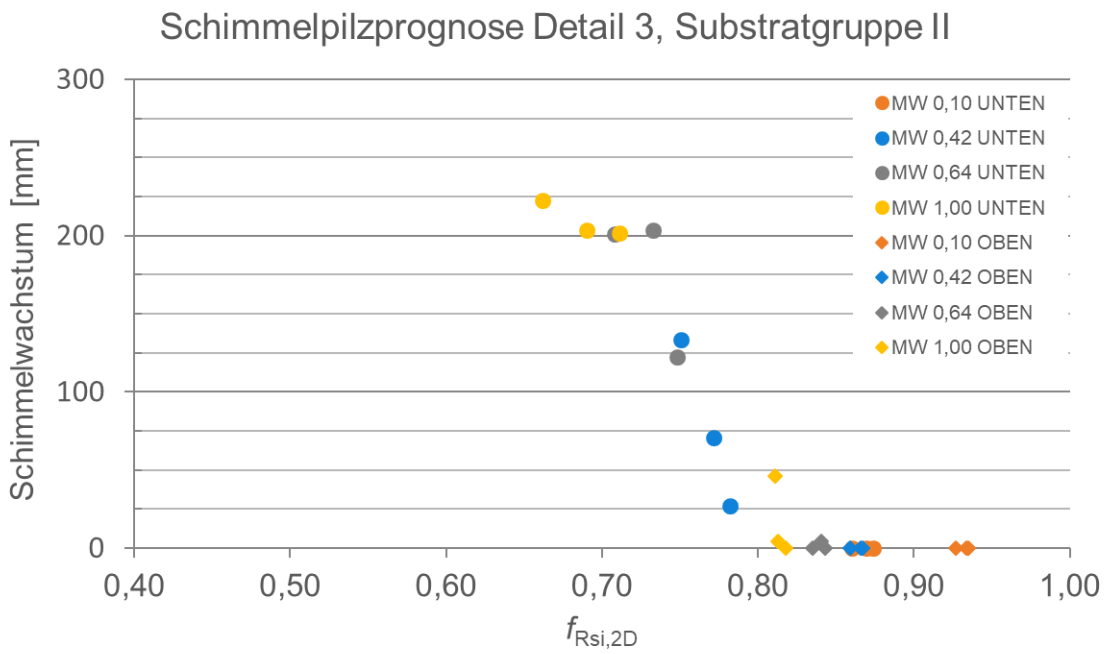


Abb. 4-24: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 2D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe II.

4.6.3.2 Ergebniszusammenfassung für alle Details

Unter diesem Abschnitt sind die Ergebnisse, die mit dem Faktor zwischen Schimmelpilzwachstum im Jahr und im Monat ermittelt worden sind, zu sehen (siehe Abschnitt 4.4.2.2). Die Grafiken (Abb. 4-25 bis Abb. 4-28) sind unterteilt für die zwei simulierten Substratgruppen und für den Temperaturfaktor der linienförmigen und punktförmigen Wärmebrücke. In der Legende sind alle instationär berechneten Detailkonstruktionen zu finden. Die Farbe der Datenpunkte orientiert sich an der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks. Das Symbol zeigt, um welches Konstruktionsdetail es sich handelt.

Die Ergebnisse der Schimmelpilzprognose über ein gesamtes Jahr ergeben in Relation zu dem Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke ein stimmiges Bild (Abb. 4-25 für Substratgruppe I und Abb. 4-27 für Substratgruppe II). In der Simulation in WUFI-Bio wird kein Schimmelpilzwachstum mehr prognostiziert ab dem Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke von 0,68 bei Substratgruppe I und 0,65 bei Substratgruppe II. Das gilt für alle berechneten Details. Ab diesem Bereich, bis zu den Temperaturfaktoren von ca. 0,65 bei Substratgruppe I und 0,60 bei Substartgruppe streut das prognostizierte Schimmelpilzwachstum kaum (entspricht ca. 50 mm Wachstum), doch umso niedriger der Temperaturfaktor ist, umso mehr Streuung zeigt sich (teilweise ca. 100 mm Unterschied bei demselben Temperaturfaktor). Bis zu 50 mm Wachstum ist die Konstruktion ohne weitere Berechnungen so ausführbar. Für Substartgruppe I ist der in diesem Bereich liegende geringste Temperaturfaktor 0,65 und für Substratgruppe II 0,61. Doch für die gleichen Temperaturfaktoren ist teilweise auch mehr Wachstum zu erwarten. Der Bereich, für den weitere Untersuchungen notwendig sind, die Konstruktion evtl. aber trotzdem ausführbar sein kann, reicht bis 200 mm Wachstum. Bei beiden

Substratgruppen wird dieser Wert bis zum Temperaturfaktor von größer oder gleich 0,56 eingehalten.

Vom Gesamtbild abweichend scheinen sich die erdberührten Bauteile zu verhalten. Bei Detail 3 wird im Vergleich zu allen nicht erdberührten Details weniger Schimmelpilzwachstum vorhergesagt. Bei fast gleichem Temperaturfaktor ist bei dem Detail Attika von fast doppelt so viel Wachstum auszugehen, wie bei dem Detail der einbindenden Kellerdecke. Für Detail 4 (mehr Erde im Modell als bei Detail 3) wird nie Schimmelpilzwachstum prognostiziert.

Werden diese Ergebnisse über den Temperaturfaktor der linienförmigen Wärmebrücke aufgetragen sind die Datenpunkte viel weiter voneinander gestreut (siehe Abb. 4-26 und Abb. 4-28). Das Wachstum tritt schon ab 0,86 und weniger ein. Die Detailkonstruktionen für die Einbindende Innenwand und die einbindende Decke über dem Fenster bilden die Ausnahme. Bei diesen Konstruktionen wird ab dem Temperaturfaktor von 0,7 und darüber kein Schimmelpilz mehr vorhergesagt.

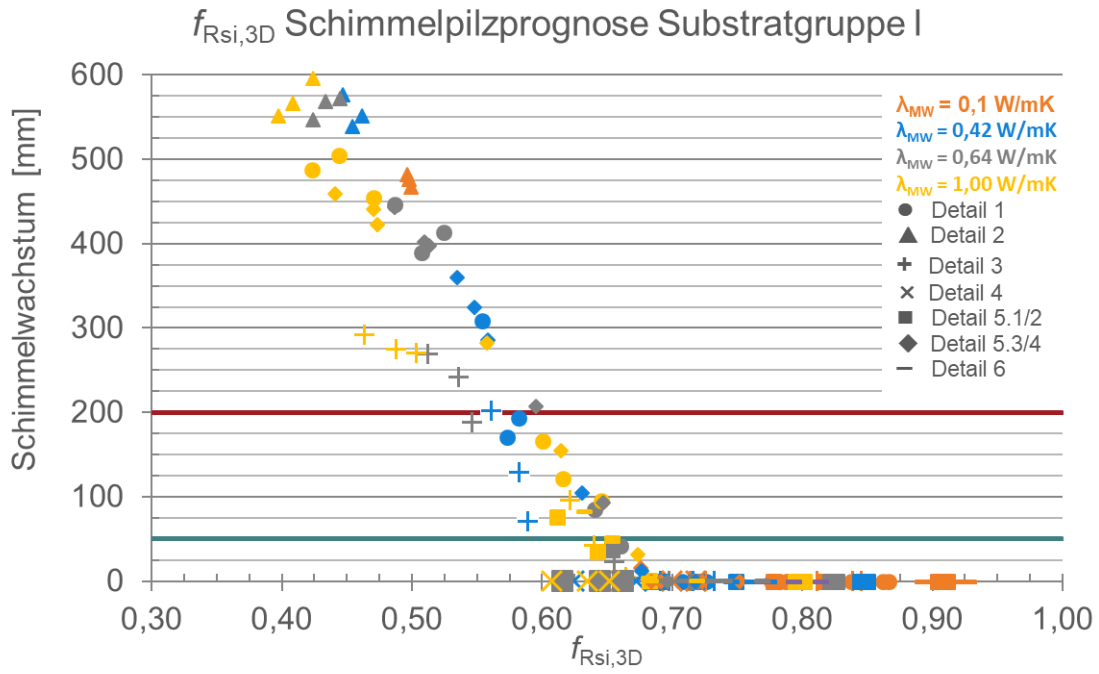


Abb. 4-25: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe I.

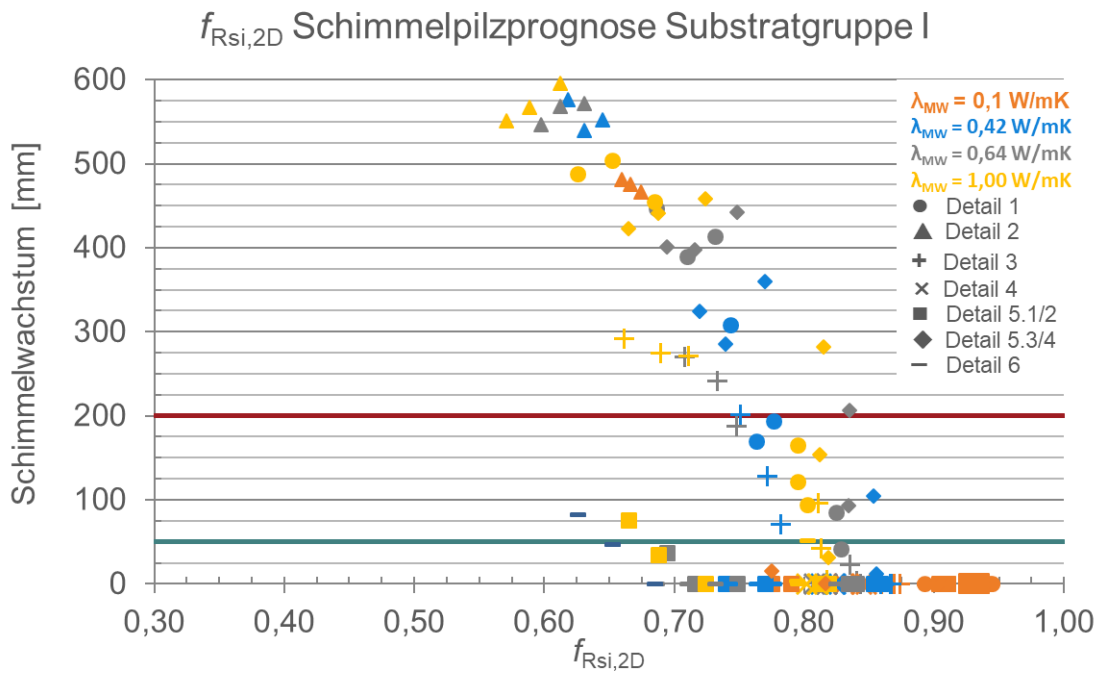


Abb. 4-26: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 2D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe I.

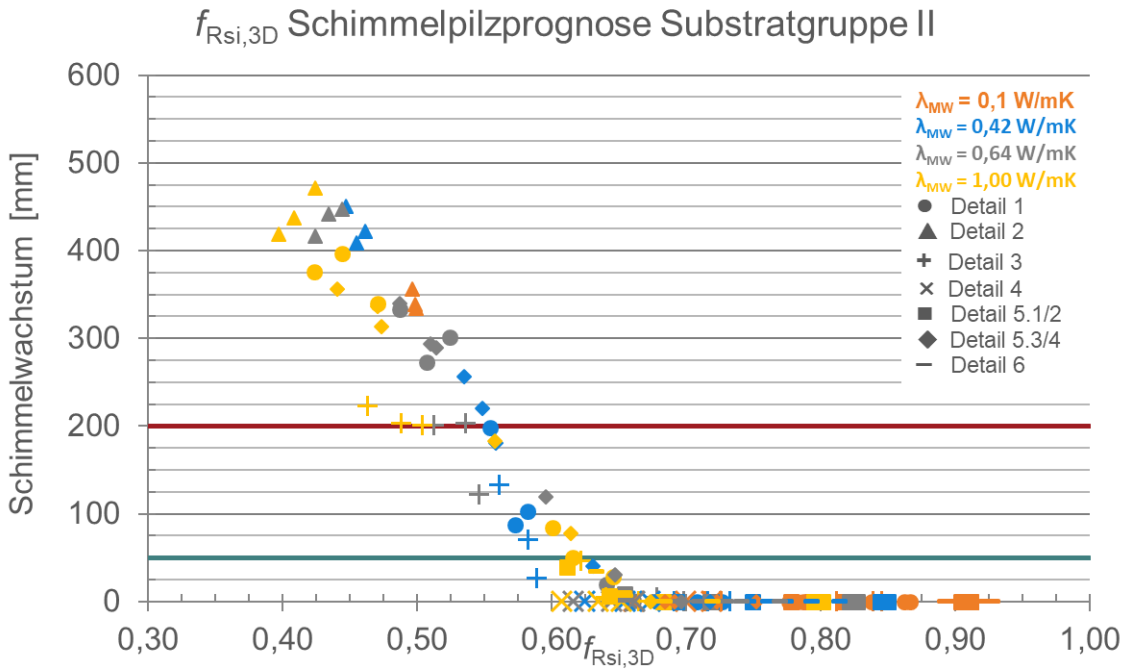


Abb. 4-27: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe II.

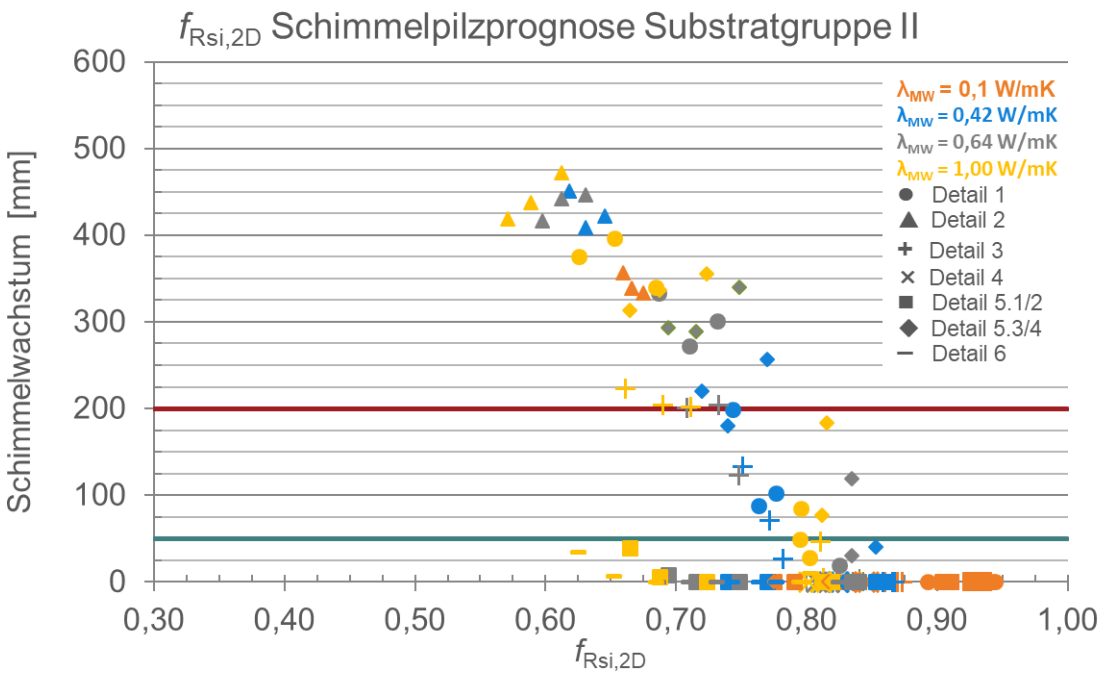


Abb. 4-28: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe II.

4.7 Ergebnisse und Validierung

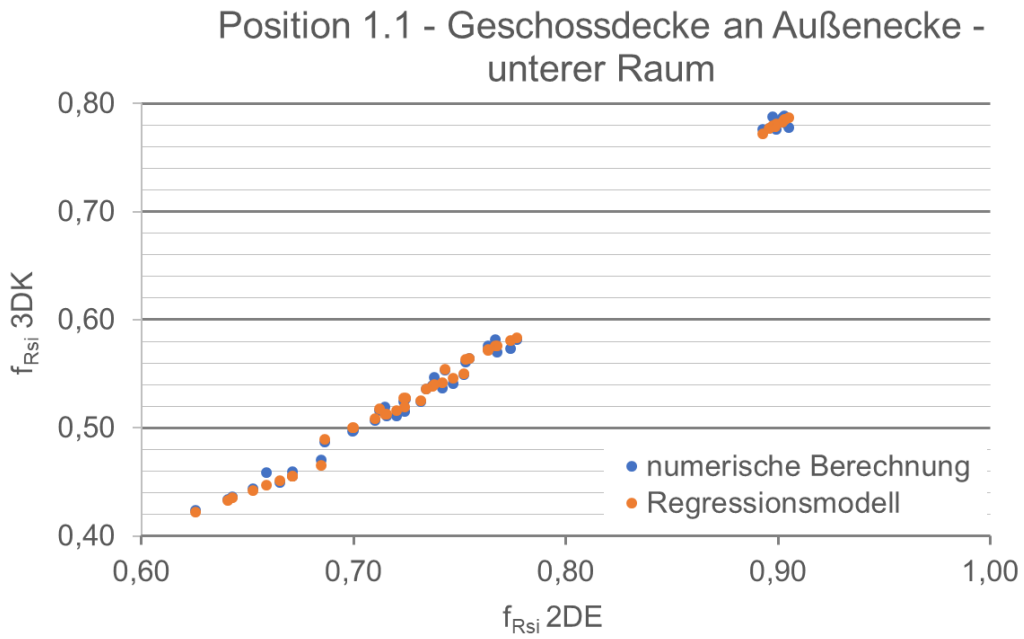
Aus dem im vorangegangenen Kapitel 4.6.2 entwickelten Regressionsmodell ergibt sich für jedes der untersuchten Anschlussdetails ein Satz aus drei Parametern. Diese sind in nachfolgender Tab. 4-14 zusammengefasst. Neben den Ergebnissen sind auch die Absolutwerte der maximalen Abweichungen der ermittelten 3D Temperaturfaktoren, welche mit Hilfe des entwickelten Regressionsmodells ermittelt wurden, zu den Werten aus numerischer Berechnung, welche mit Hilfe von 3D Modellen ermittelt wurden, aufgeführt. Des Weiteren wird das 90%-Quantil dieser Abweichungen angegeben.

Tab. 4-14: Ergebnisse Regressionsparameter für alle untersuchten Details und Vergleich zu numerischen Berechnungen stationär.

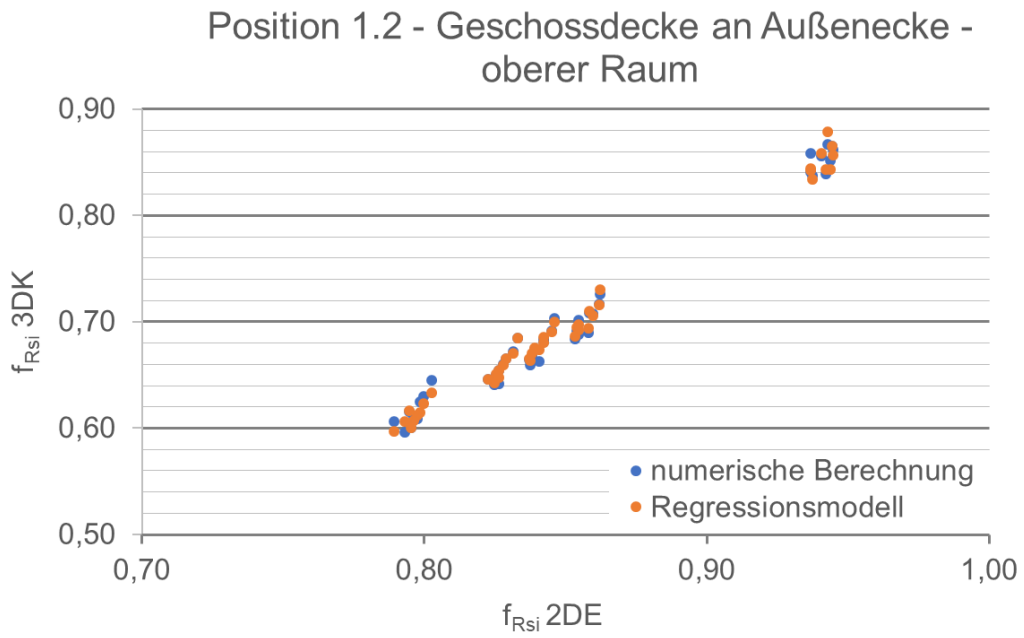
Anschlussdetail			**Regressions-parameter**			**Validierung**	
No.	Anschlussdetail		A	B	C	Max. Abw.	Q90
1.1	Geschossdecke an Außenecke	Unten	-8,26E-02	1,05E-03	0,685	0,012	0,007
1.2		Oben	-5,93E-02	-8,76E-03	0,709	0,014	0,010
2.1	Flachdach an Außenecke		-2,20E-02	-1,98E-03	0,683	0,004	0,003
3.1	Kellerdecke an Außenecke	Unten	-5,53E-02	5,26E-04	0,707	0,013	0,005
3.2		Oben	-4,67E-02	-8,62E-03	0,723	0,011	0,006
4.1	Bodenplatte an Außenecke		-1,92E-02	-9,33E-03	0,709	0,019	0,015
5.1	Fenstersturz an Zwischendecke	Unten	-2,78E-02	2,96E-03	0,961	0,008	0,005
5.2		Oben	-9,24E-03	-1,73E-04	0,979	0,015	0,009
5.3	Fensterbrüstung		-8,75E-02	-1,34E-02	0,566	0,022	0,020
5.4	Fenstersturz		-3,26E-02	-2,06E-02	0,609	0,033	0,021
6.1	Innenwand an Geschossdecke & Außenwand	Unten	1,80E-03	-1,29E-03	0,992	0,013	0,006
6.2		Oben	-4,59E-02	1,29E-02	0,967	0,027	0,018

Die größte Abweichung findet sich beim Fenster-Detail Nr. 5.4 mit 0,033. Die gemittelte Abweichung aller genäherten f_{Rsi} beträgt nur ± 0,016. Um eine statistische Absicherung in das Modell zu integrieren, könnte das für alle Details jeweils berechnete 90 % Quantil der Abweichungen zwischen numerischer Berechnung und Näherungsmodell vom Näherungsergebnis abgezogen werden. Damit könnte sichergestellt werden, dass die Näherung in 90 % der Fälle die Wärmebrückenwirkung im Vergleich zum numerisch berechneten Wert überschätzt. Doch da die maximalen und durchschnittlichen Abweichungen sehr gering bzw. die Ergebnisse relativ genau sind, kann davon abgesehen werden.

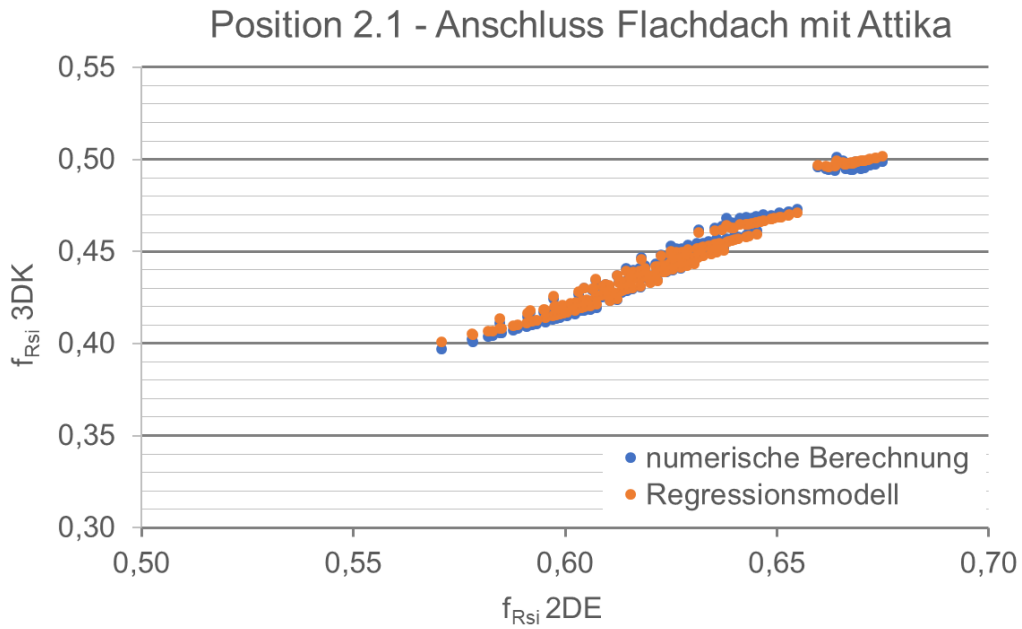
Nachfolgend sind in den Abb. 4-29 bis Abb.4-39 die Ergebnisse des numerischen Berechnungsmodells im Vergleich zum entwickelten Regressionsmodell für alle Positionen graphisch dargestellt. Die Achsen sind an die jeweiligen Ergebnisse angepasst, damit die Abweichungen besser erkannt werden können. Bei dieser Auswertung bestätigt sich nochmals die hohe Genauigkeit des entwickelten Regressionsmodells. Bei allen betrachteten Details und deren einzelnen Positionen können die 3-dimensionalen Temperaturfaktoren in den Eckbereichen für die untersuchte Bandbreite der wärmetechnischen Eigenschaften von Innendämmung und Bestandsmauerwerk ermittelt werden.



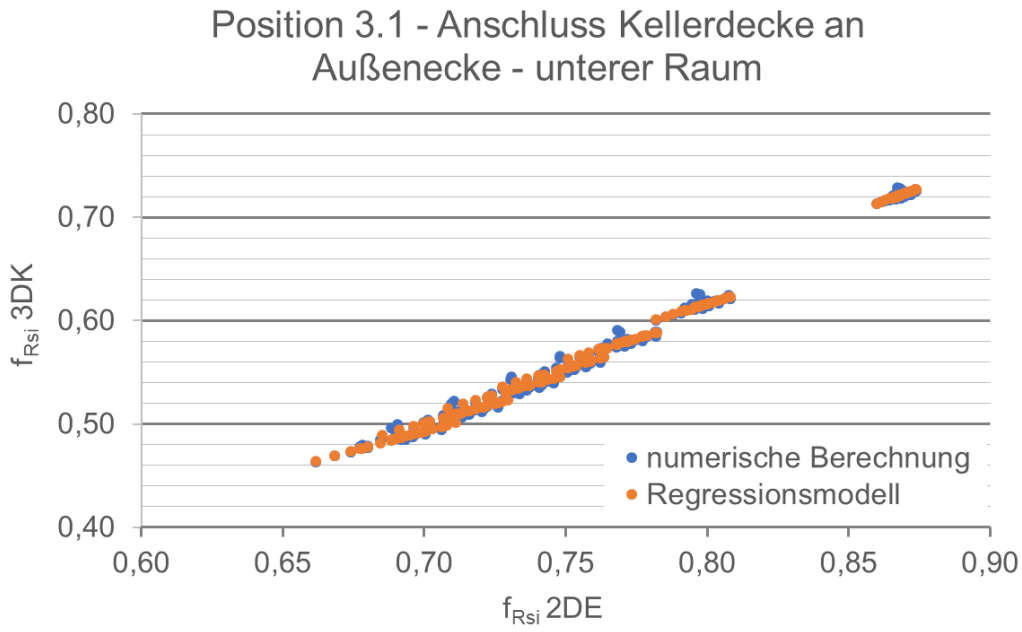
-29: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 1.1.



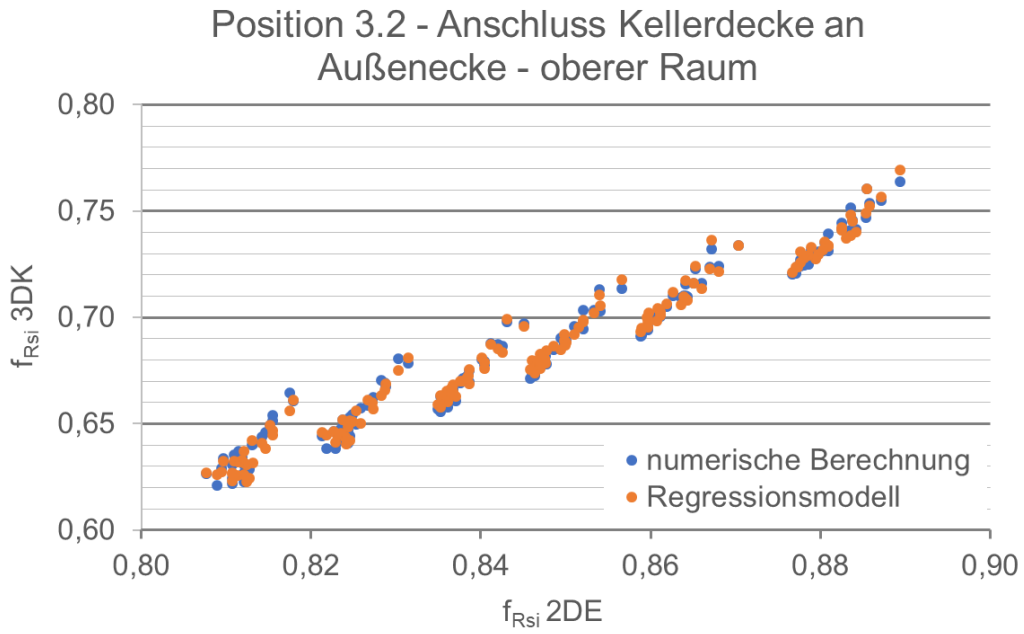
-30: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 1.2.



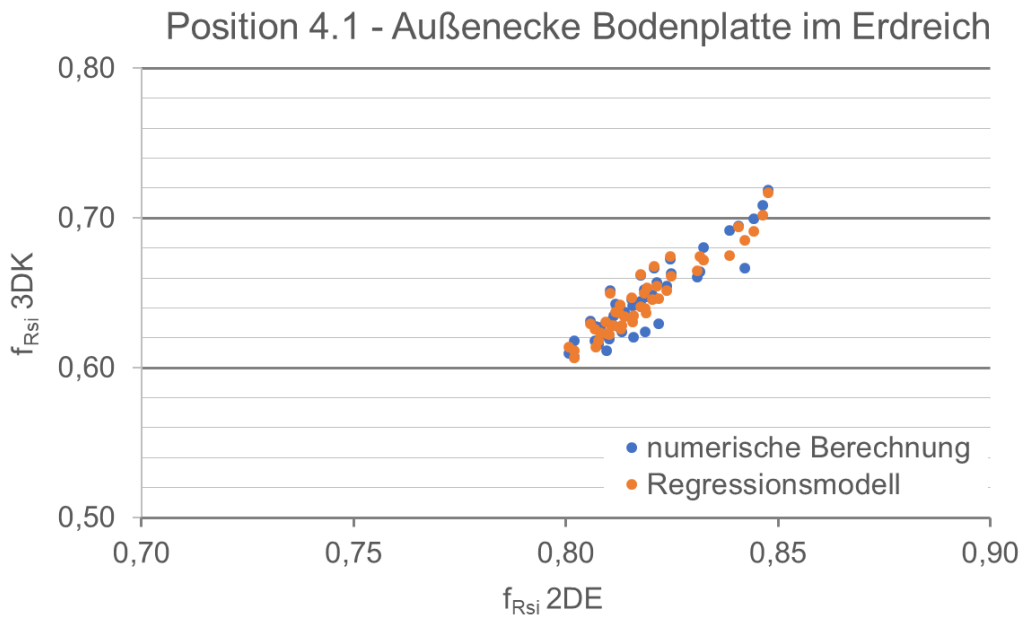
-31: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 2.1.



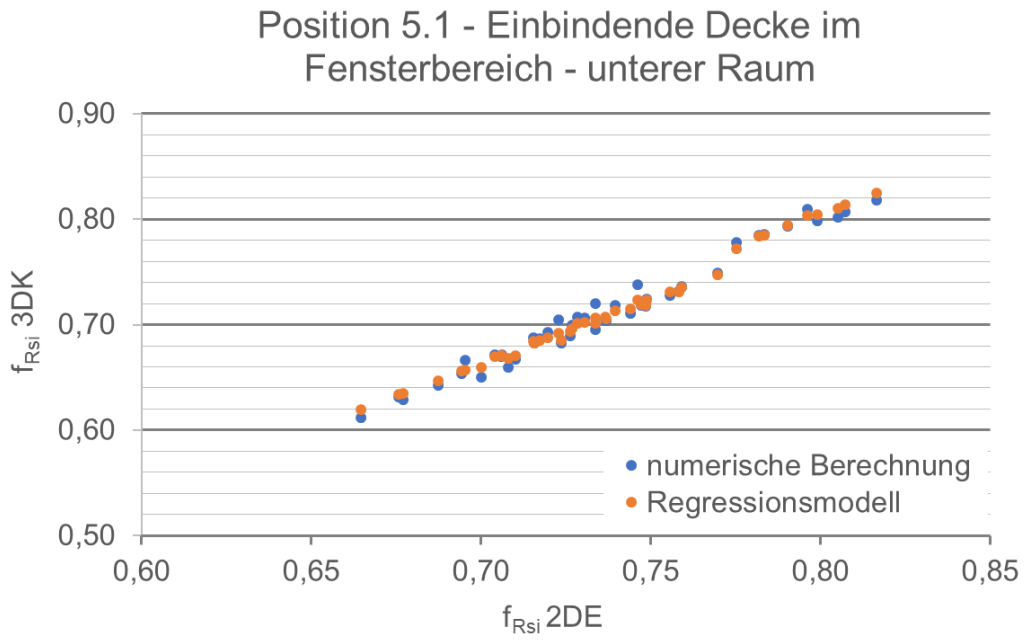
-32: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 3.1.



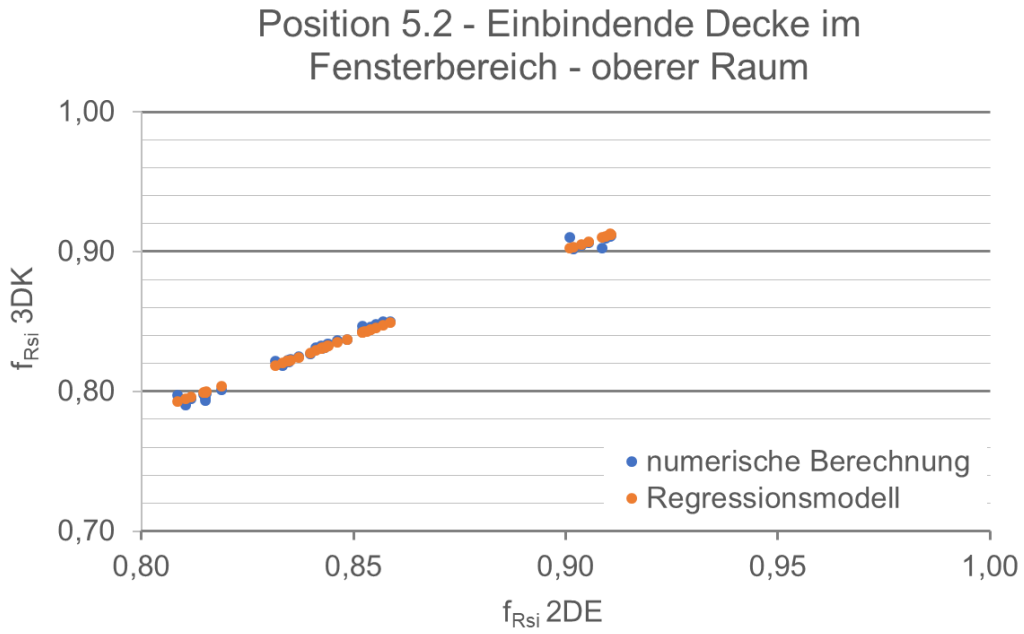
-33: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 3.2.



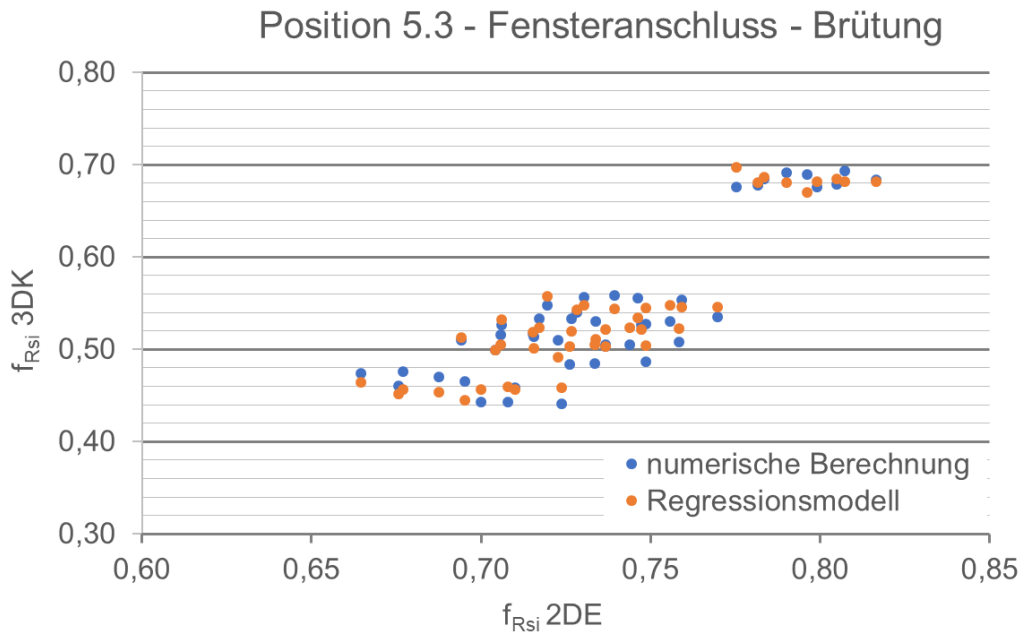
-34: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 4.1.



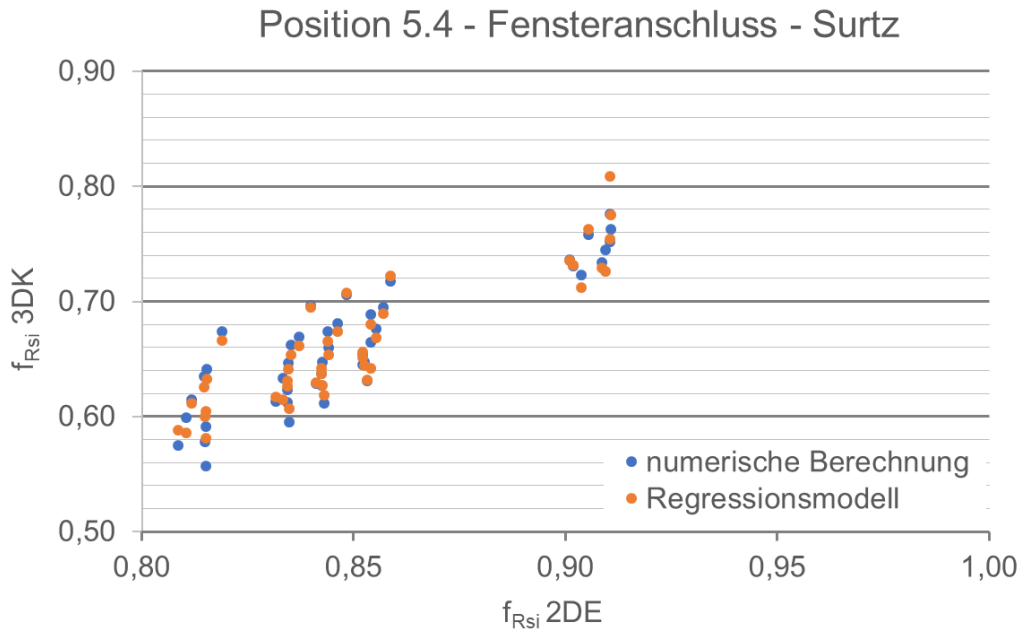
-35: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.1.



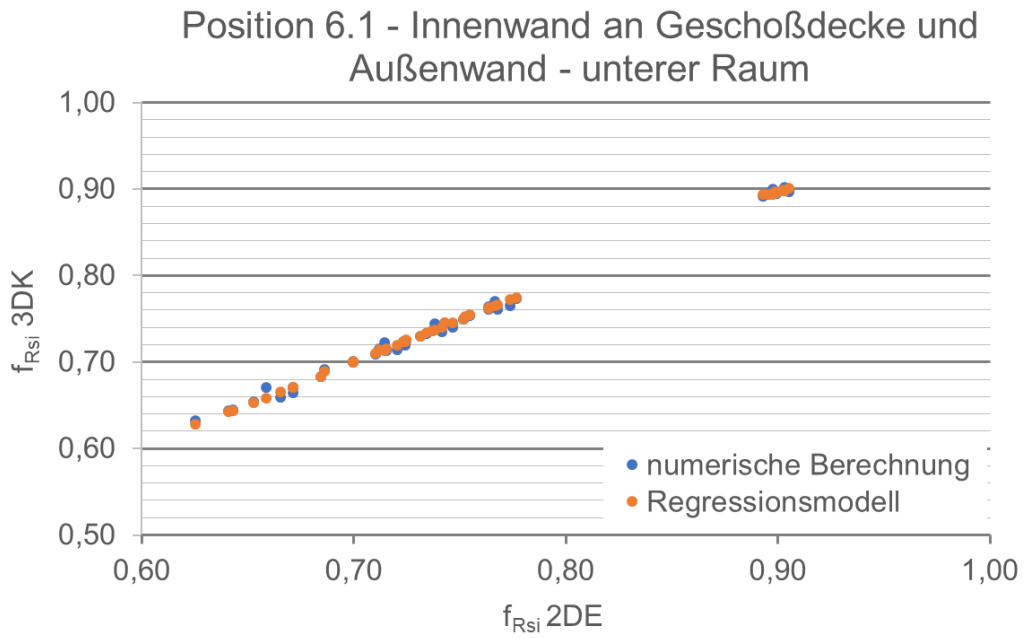
-36: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.2.



-37: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.3.



-38: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.4.



39: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 6.1.

4.8 Messtechnische Validierung der 3- dimensionalen Berechnungen

Um die Genauigkeit der 3-dimensionalen Wärmebrückenberechnungen zu überprüfen und zu validieren, wurden an zwei der betrachteten Details stationäre und instationäre Wärmedurchgangsprüfungen an großformatigen Bauteilen mit Innendämmung durchgeführt. Dieses Arbeitspaket wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Nicolas Benno Sedlmayr 2016) sowie eines Studentenprojektes (Wolfgang Schmidt 2018) am FIW München erarbeitet. Im Folgenden werden das Vorgehen und die Ergebnisse daraus kurz zusammengefasst

4.8.1 Vorgehen

Um die in Kapitel 4.5 aufgeführten Modelle zur Berechnung der 3-dimensionalen Wärmebrückeneffekte, die zu wählenden Modellparameter sowie die daraus resultierenden Berechnungsergebnisse der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten zu validieren, sollen diese Ergebnisse durch Vergleichsmessungen verifiziert werden. Die Wahl der beiden Anschlussdetails fiel aufgrund deren hohen Relevanz für das Gesamtgebäude auf den Anschluss einer einbindenden Geschossdecke in eine Außenwand (Detail 1) sowie eine einbindende Innenwand (Detail 6).

Zuerst müssen daher zwei maßstabsgetreue Prüfkörper gebaut werden. Nach Erstellung eines Messkonzeptes zur Erfassung der längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten und der Temperaturen an charakteristischen Positionen (an Oberflächen, Kanten sowie vereinzelt zwischen Bauteilschichten) wurden die Messungen in einem Differenzklimaprüfstand durchgeführt. Die Messungen werden an den unsanierten Prüfkörpern sowie nach Anbringung einer Innendämmung an der Außenwand durchgeführt.

Untersucht werden sollen der stationäre Wärmeverlust, die Wärmestromdichte sowie Messwerte für den Ψ-Wert im Hotboxverfahren. Im selben Versuch soll der Wärmedurchgangskoeffizient im ungestörten Außenwandbereich aus den Messergebnissen von am Prüfkörper angebrachten Wärmestrommessplatten bestimmt werden. Die Oberflächentemperaturen sollen an allen für die Bewertung des Wärmebrückeneinflusses wichtigen Stellen am Prüfkörpers sowohl für die stationäre Messung als auch die instationäre Messungen aufgezeichnet und bewertet werden. Für den instationären Fall sind die Oberflächentemperaturen nötig, um ein Temperaturprofil über die Aufheiz- und Abkühlphase erstellen zu können. Übergeordnetes Ziel ist es, die Oberflächentemperaturen und wärmebrückenbedingte Energieverluste aus der Messung mit aus der numerischen Berechnung stammenden Ergebnissen zu vergleichen und zu validieren.

4.8.2 Bau der Prüfkörper

Die Materialien des Prüfkörpers werden so gewählt, dass im ungestörten Außenwandbereich ein Wärmedurchgangskoeffizient U von ca. 1,0 W/(m²·K) erreicht wird. Die Wandkonstruktion entspricht damit einer typischen Außenwand vor der ersten Wärmeschutzverordnung (1977) und ist somit in Anbetracht heutiger Standards als sanierungsbedürftig einzustufen.

4.8.2.1 Einbindende Decke

Beim dem zu planenden Prüfkörper handelt es sich um eine 24 cm starke Außenwand, in welche eine 18 cm dicke Stahlbetondecke einbindet. Um diesen herzustellen werden zuerst drei Reihen der 24 cm starken Außenwand gemauert. Der Prüfkörper wird mit einem Innenwand-Planziegel hergestellt. Der verwendete LD-Hochlochziegel weist eine Rohdichteklasse von 0,80 sowie eine deklarierte Wärmeleitfähigkeit von 0,390 W/(m·K) auf. Für die Mörtelschicht der ersten Ziegelreihe wird ein Normalmauermörtel mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,89 W/(m·K) verwendet. Da es sich um Planziegel handelt, werden die restlichen Ziegelreihen in Dünnbettmörtel mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,61 W/(m·K) getaucht und verklebt. Als Deckenabmauerungselement wird ein 11,5 cm Planziegel auf 8 cm zugeschnitten sowie auf eine Höhe von 18 cm gekürzt. Als Gleitlager zwischen Betondecke und dem Auflager der Ziegelwand dient eine gesandete Mauersperrbahn. Als Trennung zwischen Betondecke und Deckenabmauerungselement dient ein 0,5 cm starker Styroporstreifen. Die Bewehrung besteht aus 2 Q188 A Matten, welche mit Hilfe von Bügeln zu einem Bewehrungskorb zusammengebunden werden. Der Bewehrungskorb liegt in der Schalung auf Deckenringen, um eine Betondeckung von 4 cm einzuhalten. Zusätzlich werden die Gewindestangen mit Bindedraht an den Bewehrungskorb gebunden, um einen besseren Verbund und höhere Stabilität zu erzeugen. Betoniert wird mit einem Beton-Estrich aus Säcken der Festigkeitsklasse C25/30. Durch stochern sowie klopfen der Schalung wird der Betonestrich verdichtet. Um eine vorschriftsgemäße Nachbehandlung zu gewährleisten wird die Betondecke mit einer Folie abgedeckt und wenn nötig gewässert.

In nachfolgender Abb. 4-40 ist links ein Detailschnitt des Probekörpers mit Abmessungen und Angabe der Materialien zu sehen. Rechts ist eine Fotografie des fertig gemauerten und betonierten Prüfkörpers abgebildet.

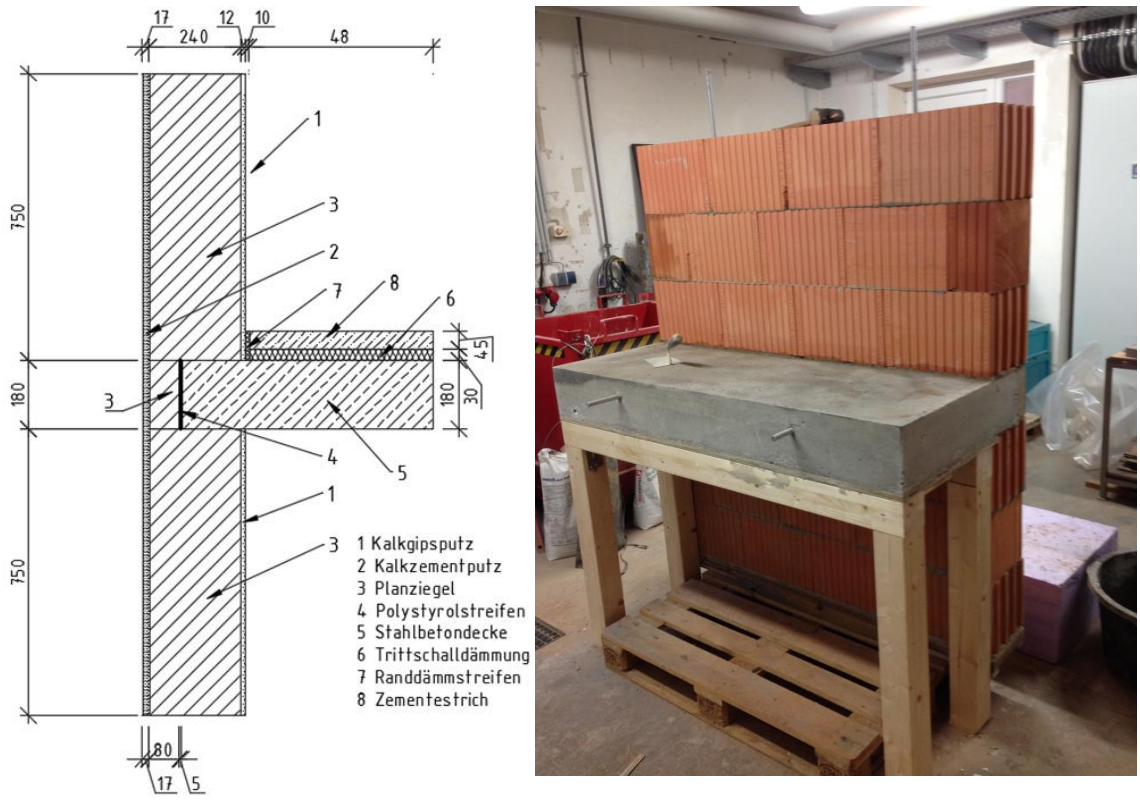


Abb. 4-40: Konstruktion des Prüfkörpers der einbindenden Zwischendecke.

4.8.2.2 Einbindende Innenwand

Der Prüfkörper mit der direkt eingebundenen Innenwand besteht komplett aus Innenwand Planziegel und aus zwei Schichten Putz für innen und außen. Die Wahl der Ziegel im Aufbau soll die schlechten Dämmeigenschaften einer Bestandswand nachstellen. Die Rohdichte der LD-Hochlochziegel liegt bei der Rohdichteklasse 0,90, die Wärmeleitfähigkeit beträgt laut Deklaration 0,390 W/(mK). Die Planziegel werden mit einem Dünnbettmörtel mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,61 W/(m·K) miteinander verbaut. Der Prüfkörper steht auf einer Unterkonstruktion aus Holz und Metall und ist mit Gewindestangen verstärkt. An der Oberseite befindet sich eine Metallkonstruktion und an den Enden der Gewindestangen sind Ösen für den Transport mit dem Kran angebracht.

Abb. 4-41 zeigt die Maße des Prüfkörpers in der Ansicht der Warmseite und die Maße des unsanierten Prüfkörpers im Horizontalschnitt.

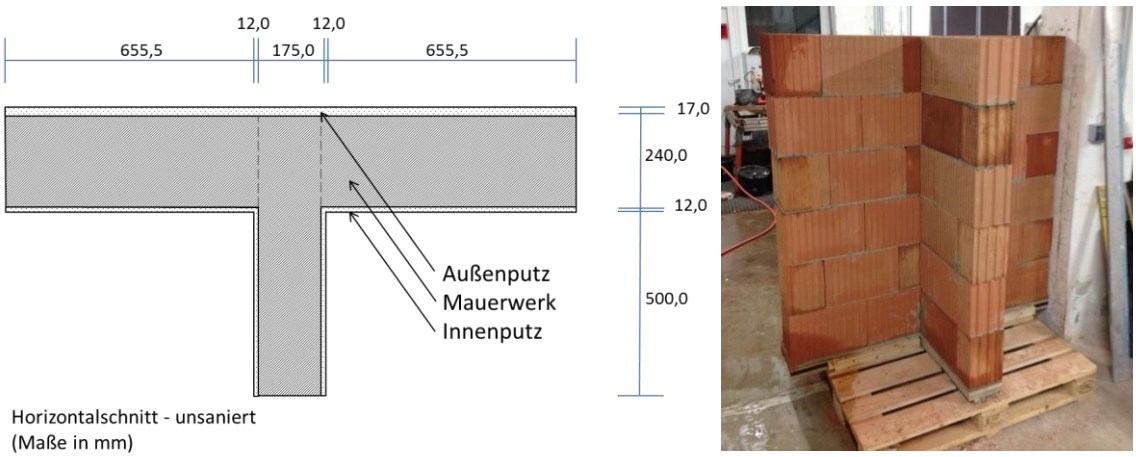


Abb. 4-41: Konstruktion des Prüfkörpers der einbindenden Innenwand.

4.8.2.3 Anbringen der Thermoelemente und Messplatten

Bei der Positionierung der Wärmestrommessplatten ist es das Ziel einen Wandabschnitt zu erfassen, der repräsentativ für das gesamte Bauteil ist. Dieser Ausschnitt stellt die kleinste Fläche dar, die das wiederkehrende Muster der Anordnung von Mauerziegeln und Fugen komplett erfasst. Unter Berücksichtigung des Mauerverbandes des Prüfkörpers ist diese Fläche über die zweifache Steinhöhe und zweifache Steinlänge definiert.

Die Wärmestrommessplatte hat eine Kantenlänge von 250 mm und ist quadratisch. Der Messbereich beschränkt sich jedoch auf 180 mm. Die Platten sind vom Werk aus kalibriert. Über eine Verhältnisberechnung lassen sich nun die nötigen Lager- und Stoßfugenlängen berechnen, die vom Messbereich der Wärmestrommessplatten erfasst werden müssen, um einen repräsentativen Messausschnitt zu erhalten:

Die Oberflächentemperaturen in der Hotbox und auf dem Probekörper werden über Thermoelemente erfasst. Die Elemente von Typ T haben eine Messunsicherheit von ± 0,5 K und für Temperaturdifferenzen eine Genauigkeit von ± 0,2 K. Die Thermoelemente werden gleichmäßig auf dem Prüfkörper verteilt und auf der Warm- und Kaltseite an den identischen Stellen verklebt, wodurch sich an den jeweiligen Messpunkten Paare bilden, die die Oberflächentemperaturen an der Warm- und Kaltseite ausgeben. Beim Anbringen der Thermoelemente wird auf eine äquidistante Verteilung geachtet. Die Distanzen zwischen den Messstellen werden so gewählt, dass sich diese nicht auf einer Fuge zwischen den Ziegelsteinen befinden und wichtige Stellen, wie z.B. der Bereich um die eingebundene Innenwand und die Stellen mit dem größten zu erwartenden Wärmebrückeneffekt, von den Sensoren erfasst werden. Die Positionierung der Messplatten und Thermoelemente auf den beiden Prüfkörpern ist in Abb. 4-42und Abb. 4-43 dargestellt.

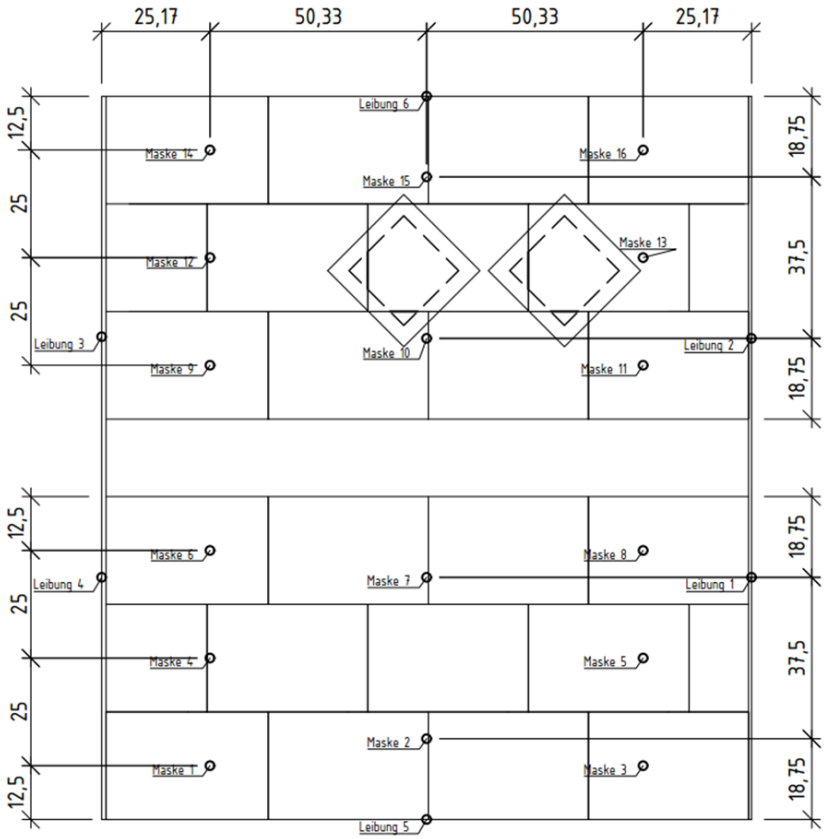


Abb. 4-42: Positionierung Thermoelemente und Messplatten auf der Warmseite des Prüfkörpers mit einbindender Decke.

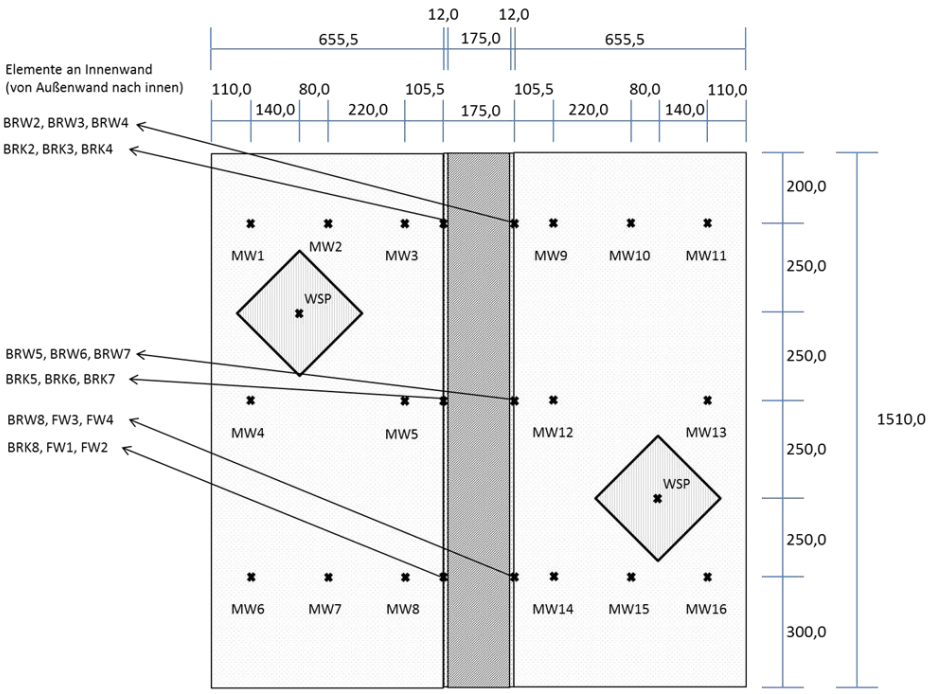


Abb. 4-43: Positionierung Thermoelemente und Messplatten auf der Warmseite des Prüfkörpers mit einbindender Innenwand.

4.8.3 Durchführung der Messungen und Berechnungen

4.8.3.1 Messkonzept

Die stationären und instationären Messungen erfolgen im 2-Kammerdifferenzklimaprüfstand des FIW München. Die Oberflächentemperaturen werden von Thermoelementen erfasst. Im Bereich der Außenwand des Prüfkörpers, der durch seinen ausreichenden Abstand zum einbindenden Bauteil nicht mehr durch die dortigen Abweichungen des Wärmeflusses beeinflusst wird („ungestörter Bereich“), kann die Bestimmung des U-Wertes des Regelquerschnitts mittels Wärmestrommessplatten erfolgen.

Die Anordnungen der Temperatur- und Wärmestromsensoren an der Prüfkonstruktion sind in Kapitel 4.8.2.3 dargestellt. Die Messreihe beginnt mit der stationären Messung des unsanierten Prüfkörpers mit einer Lufttemperatur auf der Warmseite von 20°C und einer Lufttemperatur von 0°C auf der Kaltseite. Direkt im Anschluss startet die instationäre Messung mit weiterhin stationären Verhältnissen auf der Warmseite von 20°C und instationären Verhältnissen auf der Kaltseite. Auf der Kaltseite herrscht für 8 Stunden eine Lufttemperatur von +5°C und 16 Stunden lang eine Temperatur von -10 °C. Dies soll den klassischen Winterfall simulieren. Die 8 Stunden mit +5 °C simulieren die Sonnenstunden, wobei die -10°C die frühen Abendstunden die Nacht sowie den kalten morgen simulieren sollen. Die Umstellung am Prüfstand erfolgt händisch und somit 2-mal täglich.

Nach der instationären Messung wird die Außenwand des Prüfkörpers mit der Systemlösung Rigitherm032 der Firma Rigips von innen gedämmt. Zuvor werden die Thermoelemente auf der Warmseite entfernt und nach der Dämmmaßnahme neu positioniert. Anschließend startet die stationäre und instationäre Messung für den gedämmten Prüfkörper unter denselben Klimabedingungen wie am unsanierten Prüfkörper.

4.8.3.2 Funktionsweise Hotbox

Der Prüfstand, in dem die Messungen durchgeführt werden, wird in der DIN EN ISO 8990:1996-09 als geregelter Heizkasten (GHB) bezeichnet. Dieser auch als Hotbox bezeichnete Aufbau besteht aus einem beheizten Messkasten auf der Warmseite, der von einem Schutzkasten umgeben ist, und einer kühlbaren Kammer auf der Kaltseite. Zwischen der Warm- und der Kaltseite wird der Prüfkörper in einen aus Dämmstoff bestehenden Prüfrahmen eingebaut, der als Maske bezeichnet wird. Beim geregelten Heizkasten ist der Messkasten von einem Schutzraum umgeben, in welchem die identische Temperatur erzeugt wird. Damit werden die Wärmeströme ϕ_2 und ϕ_3 zwischen Messkasten und Schutzraum minimiert, weshalb im Idealfall ein Gleichgewicht herrscht, da $\phi_2 = \phi_3 = 0$ siehe Abb. 4-44. Bei der stationären Messung herrschen stationäre Oberflächen- und Lufttemperaturen sowohl auf der Warm- als auch auf der Kaltseite. Die Leistungszufuhr in den Heizkasten ist ebenfalls stationär und geht in die Messung zur Berechnung der Wärmedurchgangseigenschaften ein. Der Wärmedurchgangskoeffizient wird in der Hotbox über die Umgebungstemperaturen T_n, welche mit Hilfe der Luft und Strahlungstemperaturen bestimmt werden, und dem fließenden Wärmestrom ϕ_1 ermittelt. Der Wärmedurchgangskoeffizient ergibt sich wie folgt:

$$U = \phi_1 / A(T_{ni} - T_{ne})$$

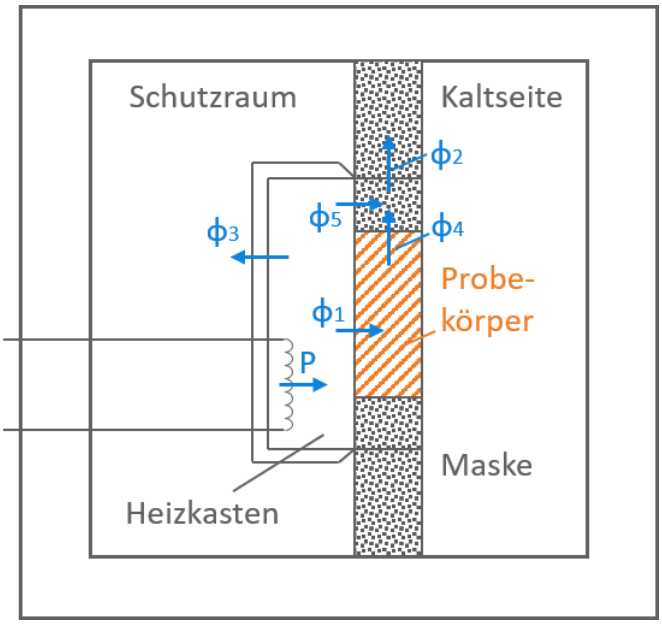


Abb. 4-44: Geregelter Heizkasten (Quelle: DIN EN ISO 8990).

Die Lufttemperatur des Schutzraumes um den Heizkasten auf der Warmseite und die Lufttemperatur auf der Kaltseite werden während der Messung über Thermostate geregelt, damit konstante Temperaturbedingungen geschaffen werden können. Über ein Gebläse mit Leitblechen wird auf beiden Seiten der Hotbox eine natürliche Konvektion erzeugt, welche die Strömungsverhältnisse an Außen- und Innenseite des Bauteils im Gebrauchszustand nachstellen soll (DIN EN 1934:1998-04).

Der gesamte Wärmedurchgangskoeffizient in der Hotbox, welcher für die Bestimmung des für die Ψ-Wert-Berechnung relevanten L_{2D} Werts (siehe Kapitel 4.2.3.3) nötig ist, lässt sich über die Eingangsleistung des Heizkastens bestimmen. Die Eingangsleistung des Heizkastens Φ_{in} ist die Summe der Heizleistung, der Motorleistung und der Leistung der auf der Warmseite zusätzlich angebrachten Lüfter. Φ_{sur} ist der Prüfrahmenwärmestrom und Φ_{edge} der Randzonenwärmestrom. Die Wärmestromdichte q_{sp} des gesamten Prüfkörpers berechnet sich damit wie folgt:

$$q_{sp} = \frac{\Phi_{in} - \Phi_{sur} - \Phi_{edge}}{A_{Probe}}$$

Über die Wärmestromdichte q_{sp} lässt sich dann der für die Psi-Wert Berechnung relevante gesamte Wärmedurchgangskoeffizient der Hotbox bestimmen.

4.8.3.3 Numerische Berechnungen

Die numerischen Berechnungen erfolgen mit dem Programm Comsol Muliphysics basierend auf der Finite-Elemente-Methode. Für die Simulationen mit Comsol wird zunächst die Prüfkörpergeometrie mit dem Programm Inventor Professional nachgebildet und anschließend mit den einzelnen Materialkennwerten und Umgebungsrandbedingungen in Comsol zu einem

Modell zusammengeführt. Die Oberflächentemperaturen werden basierend auf den Positionen der Thermoelemente im Prüfstand berechnet, um Vergleichswerte für Messung zu erhalten.

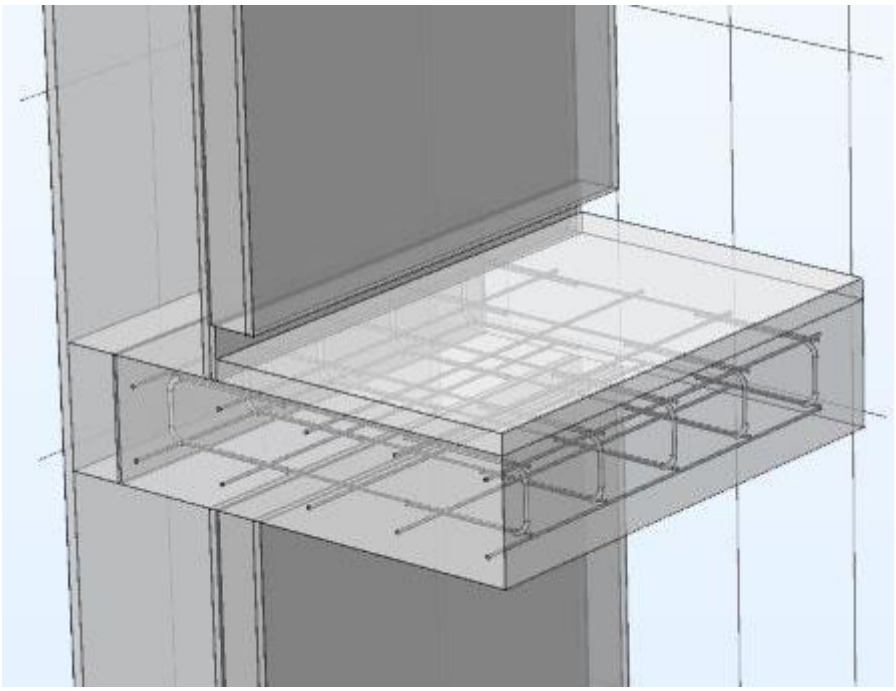


Abb. 4-45: 3-D modellierte Stahlbetondecke in Comsol Multiphysics.

Die Wärmeübergangswiderstände nach DIN EN ISO 6946:2018-03 müssen auf die Hotboxsituation angepasst werden. Um die passenden Wärmeübergangswiderstände zu finden, die aus der Hotboxmessung im Bereich der einbinden Decke nicht bekannt sind, werden mehrere Variationen durchgerechnet und dadurch versucht, die Oberflächentemperaturen aus der Berechnung so gut wie möglich an die Messwerte anzupassen. Neben den Oberflächentemperaturen wird ebenso der Ψ-Wert für die Optimierung der einzelnen Parameter betrachtet sowie die Abweichungen in Summe für den unsanierten und sanierten Fall. Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung kann mit R_{si} = 0,20 (m^2·K)/W und R_{se} = 0,05 (m^2·K)/W erzielt werden.

4.8.4 Auswertung stationäre Betrachtung

Nachfolgend wird ein Auszug der vergleichenden Auswertungen von Messung und Berechnung der stationären Betrachtung an den beiden betrachteten Details nach Anbringung der Innendämmung vorgestellt.

4.8.4.1 Vergleich Oberflächentemperaturen

Auswertung einbindende Decke

In Abb. 4-46 sind die Temperaturverläufe der Warmseite von Messung und Berechnung entlang des Details der einbindenden Decke dargestellt. Dabei ist ein fast identischer Temperaturverlauf zu erkennen. Im Randbereich des Prüfkörpers, also WS 1.1, WS 2, WS8 und WS 9.1, sind die Temperaturen der Berechnung kälter als die der Hotbox, wobei die Abweichung der einzelnen Punkte zueinander fast gleich ist. Im Wärmebrückenbereich, also den Punkten WS 4.1 und WS 6.1, ist dies ebenfalls der Fall. Ausschließlich in den beiden Punkten WS 3.1 und WS 7.1 sind die berechneten Punkte wärmer als die tatsächlichen aus der Messung. Ein ungestörter Bereich auf dem Prüfkörper ist aufgrund der erhöhten Wärmebrückenwirkung durch die Innendämmung weder in der Messung noch in der Berechnung zu finden.

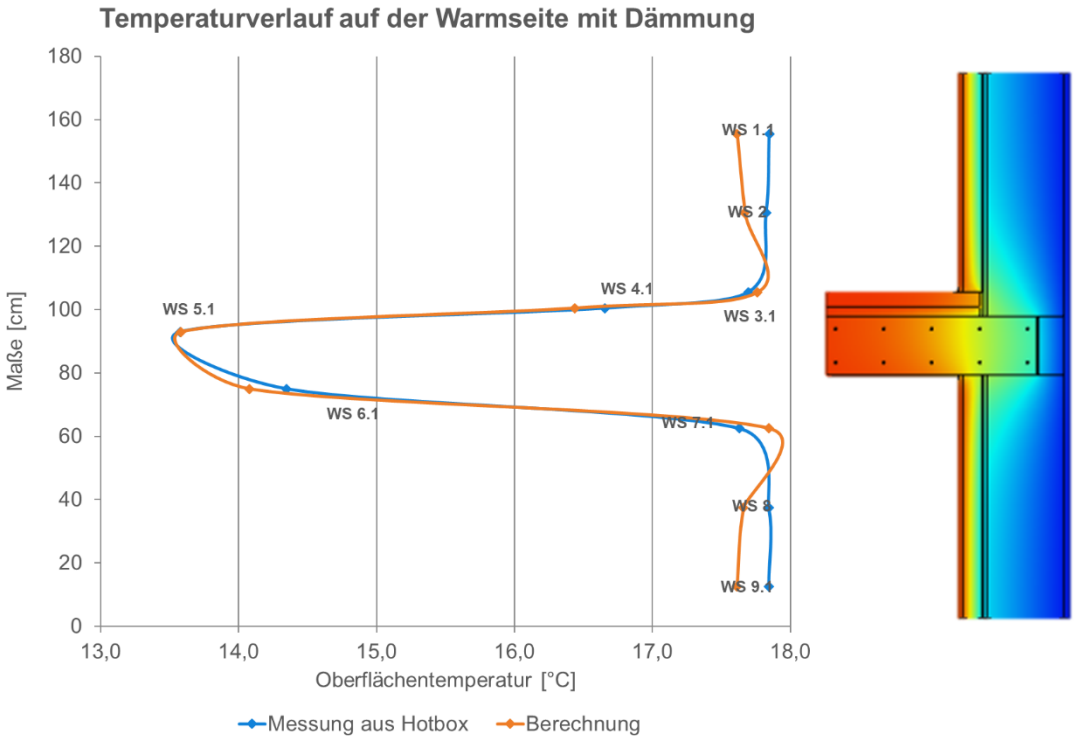


Abb. 4-46: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Decke: Temperaturverlauf auf der Warmseite im gedämmten Fall.

In Abb. 4-47 sind die Temperaturverläufe der Kaltseite von Messung und Berechnung entlang des Details der einbindenden Decke dargestellt. Die Oberflächentemperaturen auf der Kaltseite weisen im Durchschnitt aller Messpunkte eine Abweichung von 0,11 K auf. Die Temperaturen in der unteren Wandhälfte sind in der Messung kühler als in der Berechnung und in der oberen Wandhälfte ist die Berechnung kälter als die Messung. Da die kalte Luft über Leitbleche von unten am Wandkörper entlangströmt und sich durch die Wärmeverluste des Wandkörpers erwärmt steigen die Oberflächentemperaturen der Messung mit der Höhe des Prüfkörpers an. Aufgrund der Innendämmung und den dadurch resultierenden geringeren Wärmeverlusten ist der

Unterschied zwischen KS 1 und KS 11 mit 0,2 K wesentlich geringer als im unsanierten Zustand, wo es zu einer Abweichung von 0,62 K kommt.

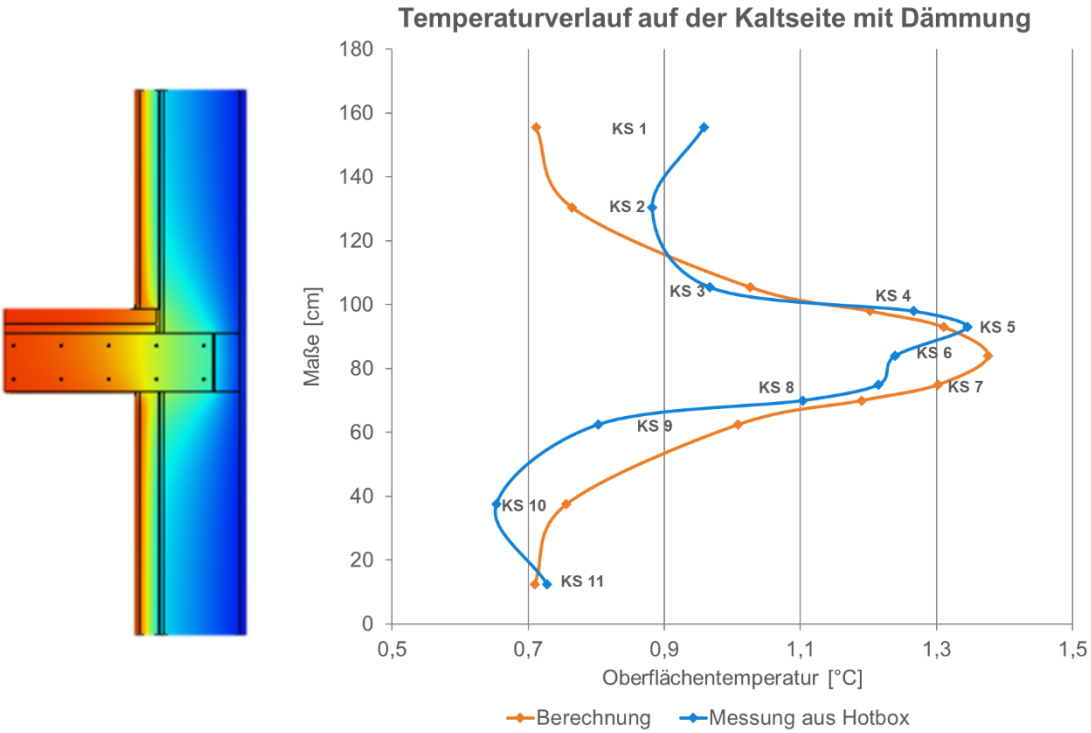


Abb. 4-47: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Decke: Temperaturverlauf auf der Kaltseite im gedämmten Fall.

Auswertung einbindende Innenwand

In Abb. 4-48 sind die Temperaturverläufe auf der Warmseite der einbindenden Innenwand dargestellt. Auch hier sind nur geringe Abweichungen (max. Abweichungsbetrag WS 4.1, ΔT= 0,35 K) zwischen Berechnung und Messung zu erkennen. Ein Grund dafür ist die nach der Sanierung geschaffene plane Oberfläche des Prüfkörpers, welche nun auch nicht mehr 80 mm in den Prüfrahmen hineinragt, sondern eine ebene Fläche mit diesem bildet. Dies verbessert nicht nur die Strömungsverhältnisse in der Hotbox, sondern verringert auch mögliche Abweichungen bei den Wärmeübergangswiderständen. Dadurch nähern sich die Messwerte den Berechnungswerten an, was auch der gemittelte Abweichungsbetrag der warmseitigen Oberfläche mit 0,20 K bestätigt. Der maximale Abweichungsbetrag auf der Warmseite (WS4.1) liegt im Eck- und Einbindungsbereich des Prüfkörpers, was auf die gestörten Strömungsverhältnisse als Ursache für diese Differenz schließen lässt. Im ungestörten Bereich der Innenwand (WS4.2, WS5.2) treten niedrigere gemessene Temperaturen auf.

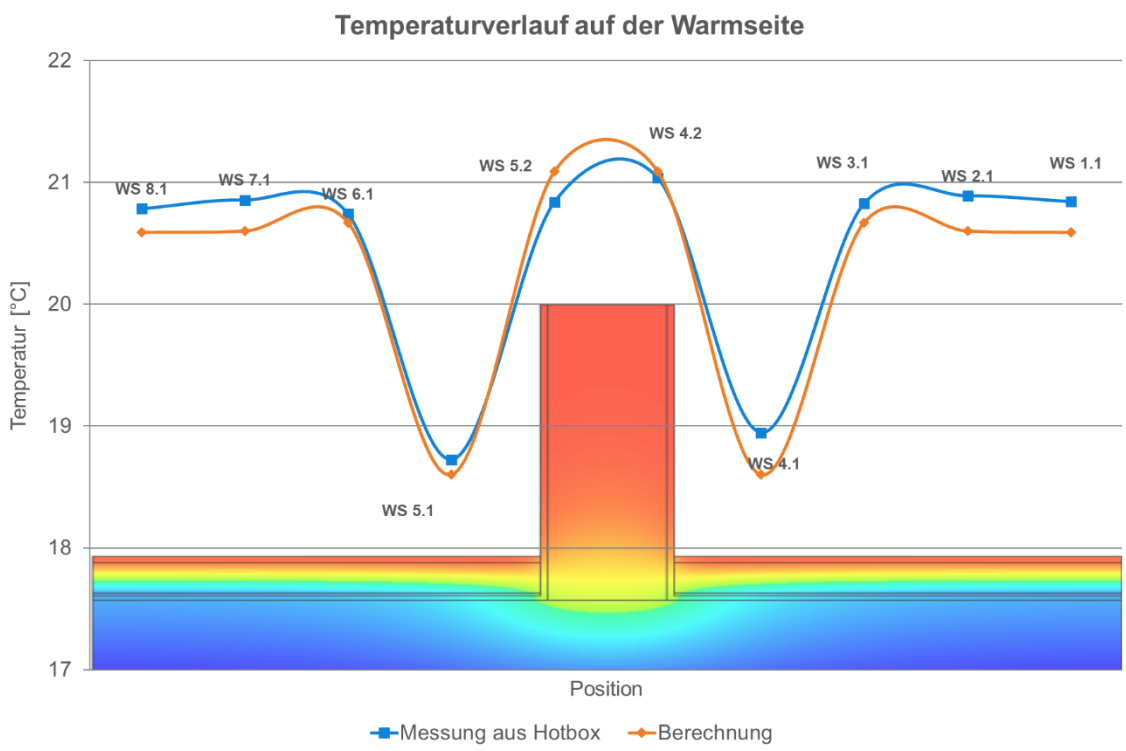


Abb. 4-48: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Innenwand: Temperaturverlauf auf der Warmseite im gedämmten Fall.

In Abb. 4-49 sind die Ergebnisse der einbindenden Innenwand auf der Kaltseite entlang des Details aufgetragen. Im Vergleich zur Warmseite sind dort etwas höhere Abweichungen zwischen Messung und Berechnung zu erkennen. Dies ist auf dieselben Ursachen wie am untersuchten Detail der einbindenden Zwischendecke zurückzuführen.

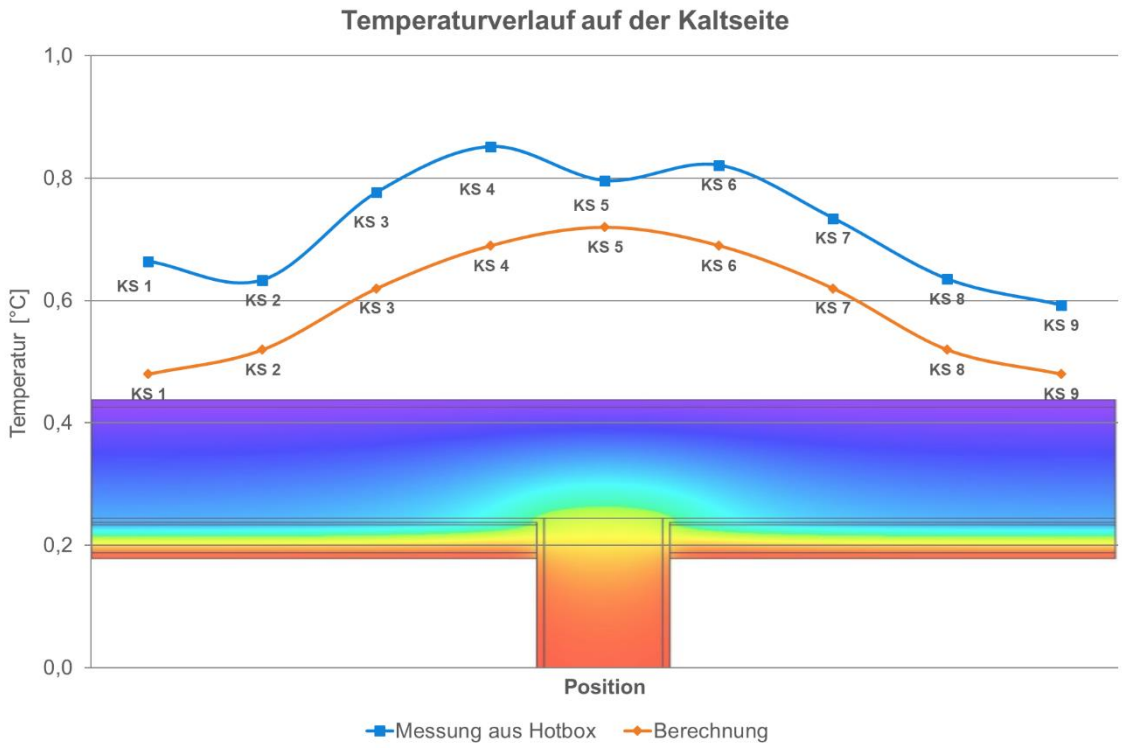


Abb. 4-49: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Innenwand: Temperaturverlauf auf der Kaltseite im gedämmten Fall.

4.8.4.2 Messtechnische Bestimmung des Wärmebrückenkoeffizienten Ψ und Vergleich mit numerischer Berechnung

Neben den Oberflächentemperaturen sollen auch die Ψ-Werte der Konstruktion durch Messung und rechnerisch ermittelt und miteinander verglichen und bewertet werden. Zu den berechneten und gemessenen Temperaturwerten werden dazu auch die Randbedingungen der Versuche, die Maße des Prüfkörpers, die durch die Wärmestrommessplatten ermittelten Wärmeströme im Regelquerschnitt (Außenwand) der Bauteile und der Gesamtwärmeverlust des Bauteils (Energiezufuhr des Heizkastens) benötigt.

Für die Ermittlung des Ψ-Wertes des Innenwandanschlusses und zum anschließenden Vergleich nach der Sanierung wird vorerst der U-Wert des Prüfkörpers im Regelquerschnitt mithilfe der Wärmestrommessplatten ermittelt. Hierfür wird die durch die Platten ermittelte Wärmestromdichte durch die Umgebungstemperaturdifferenz geteilt:

$$U_{WSP} = \frac{q_{WSP}}{\Delta T_L} \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$$

mit

U_{WSP} U-Wert des Prüfkörpers im Regelquerschnitt in W/m²K

q_{WSP} Mit Hilfe der Messplatten ermittelte Wärmestromdichte in W/m²

ΔT_L Differenz der angrenzenden Umgebungstemperaturen am Prüfkörper in K

Für den standardisierten U-Wert der Außenwand benötigt man den Wärmedurchlasswiderstand des Prüfkörpers, welcher sich aus dem Quotienten zwischen der Oberflächentemperaturdifferenz und der Wärmestromdichte bestimmen lässt. Der Widerstand wird anschließend mit den Standard-Wärmeübergangswiderständen (R_{si} / R_{se}) nach DIN EN ISO 6946:2018-03 für horizontale Wärmeströme addiert und der Kehrwert gebildet:

$$\boldsymbol{R_{PK} = \frac{\Delta T_O}{q_{WSP}}} \left[\frac{\boldsymbol{m^2 K}}{\boldsymbol{W}}\right]$$

$$\boldsymbol{U_{st,WSP} = \frac{1}{R_{si} + R_{PK} + R_{se}}} \left[\frac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{m^2 K}}\right]$$

mit

R_{Pk}	Wärmedurchlasswiderstand des Prüfkörpers in m²K/W
ΔT	Differenz der Oberflächentemperaturen in K
$U_{st,WSP}$	standardisierter U-Wert des Prüfkörpers in W/m²K
R_{si}	innerer Wärmeübergangswiderstand nach DIN EN ISO 6946 = 0,13 W/m²K
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand nach DIN EN ISO 9646 = 0,04 W/m²K

Parallel zum U-Wert des Regelquerschnittes $U_{st,WSP}$ wird auch der U-Wert des gesamten Bauteils basierend auf den Gesamtwärmeübergangswiderständen $R_{s,t}$ der mittleren durch den Heizkasten zugeführten Wärmestromdichte des Probekörpers q_{HB} (bezogen auf die projizierte Fläche des Prüfkörpers) und der Umgebungstemperaturdifferenz ΔT_U berechnet.

$$\boldsymbol{U_{HB} = \frac{q_{HB}}{\Delta T_U}} \left[\frac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{m^2 K}}\right]$$

mit

U_{HB}	Wärmedurchgangskoeffizient
q_{HB}	Wärmestromdichte des Probekörpers innerhalb der Hotbox in W/m²
ΔT_U	Umgebungstemperaturdifferenz in K

Damit der U-Wert aus dem Hotboxverfahren mit dem standardisierten U-Wert aus dem Wärmestrommessplattenverfahren verglichen werden kann, wird der Kehrwert abzüglich des Gesamtwärmeübergangswiderstandes nach demselben Prinzip mit den Standard-Wärmeübergangswiderständen der DIN EN ISO 6946 verrechnet:

$$\boldsymbol{U_{st,HB} = \frac{1}{\frac{1}{U_{HB}} - R_{s,t} + R_{si} + R_{se}}} \left[\frac{\boldsymbol{W}}{\boldsymbol{m^2 K}}\right]$$

Mit

$U_{st,HB}$	standardisierter U-Wert durch die Hotbox in W/m²K

$R_{s,t}$ Wärmeüberganswiderstand gesamt in m²K/W

Die Berechnung der ψ-Werte aus den Messergebnissen erfolgt unter Anwendung folgender Formel:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^{n} U_j \cdot l_j \left[\frac{W}{mK}\right]$$

Wobei

$$L_{2D} = U_{st,HB} \cdot l \left[\frac{W}{mK}\right]$$

mit

L_{2D} thermischer Leitwert der zweidimensionalen Wärmebrücke in W/mK
U_j Wärmedurchgangskoeffizient der ungestörten Bereiche in W/m²K
l_j Länge des Bauteils, mit der dessen Fläche berechnet wird in m

Auswertungen

Die Ergebnisse der L_{2D} – Werte sowie der ψ- Werte der beiden untersuchten Anschlussdetails im unsanierten und sanierten Zustand sind in Tab. 4-15 zusammengefasst. Die ermittelten Werte aus der Hotbox Messung sowie diejenigen, die anhand der Wärmebrückenberechnungen erhalten wurden, stimmen guten überein. Nur bei der unsanierten einbindenden Innenwand ergibt sich eine etwas größere Abweichung von Mess- und Berechnungswerten.

Tab. 4-15: Ergebnisse der Wärmebrückenkennwerte im Vergleich.

	Einbindende Decke		Einbindende Innenwand		Einheit
	unsaniert	saniert	unsaniert	saniert	
L_{2D} aus Messung	1,79	0,91	1,57	0,63	W/mK
L_{2D} aus Berechnung	1,77	0,93	1,43	0,66	W/mK
Ψ – Wert aus Messung	0,14	0,35	0,11	0,14	W/mK
Ψ – Wert aus Berechnung	0,16	0,37	-0,02	0,16	W/mK

4.9 Zusammenfassung

4.9.1 Modellentwicklung zur Vorhersage

In diesem Arbeitspaket wurde der Zusammenhang von Oberflächentemperatur von linien- zu punktförmigen Wärmebrücken bei innengedämmten Bestandskonstruktionen untersucht. Es wurden stationäre Wärmedurchgangsberechnungen mit Randbedingungen nach DIN 4108-2 an sechs verschiedenen Konstruktionsdetails mit unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten des Bestandsmauerwerks durchgeführt. Dabei sind generische Dämmvarianten an den Bestandsbauteilen untersucht worden. Die stationären Berechnungen sind in 2D und 3D

ausgeführt worden, um die Temperaturen an den linien- (2D-Modell) und punktförmigen (3D-Modell) Wärmebrücken ermitteln zu können (siehe Kapitel 4.5 und 4.6). Mithilfe einer Regressionsanalyse (Kapitel 4.6.2) ist anhand der umfangreichen Daten eine Modellgleichung aufgestellt worden, mit der der Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke aus denen der linienförmigen Wärmebrücke ermittelt werden kann. Durch diese Vorgehensweis kann bei den zugrunde gelegten Bestandskonstruktionen der Temperaturfaktor einer punktförmigen Wärmebrücke anhand einer 2D-Wärmedurchgangsberechnung und unter Verwendung des Regressionsmodells ermittelt werden. Dieses Vorgehen stellt eine wesentliche Reduzierung des Aufwands bei der Planung von Innendämmmaßnahmen dar. Die Beurteilung von punktförmigen Wärmebrücken mit 3D-Simulationen sind nicht nur zeitintensiver, sondern auch nicht mit jedem Programm möglich. Die Risiken bzgl. des Schimmelpilzwachstums können durch die Anwendung der Modellgleichung reduziert werden. Allerdings gilt das hier vorgestellte Regressionsmodell nur für die zugrunde gelegten Konstruktionsdetails und Dämmvarianten. Inwiefern die Modelle bei abweichenden Geometrien und Materialkombinationen zutreffen wäre in einer nennenswerten Erweiterung des Berechnungsumfangs zu prüfen. Die Betrachtung des Temperaturfaktors an der punktförmigen Wärmebrücke sichert eine Schimmelpilzbeurteilung im Vergleich zur ausschließlichen Betrachtung des Temperaturfaktors der angrenzenden linienförmigen Wärmebrücke zusätzlich ab.

4.9.2 Instationäre Berechnungen und Schimmelpilzprognose

Durch instationäre Wärmedurchgangsberechnungen derselben Konstruktionsdetails ist der Temperaturverlauf an der punktförmigen Wärmebrücke ermittelt worden (siehe Kapitel 4.5.4 und 4.6.3.), wegen des großen Zeitaufwandes bei instationären Simulationen allerdings in reduziertem Variantenumfang. Dabei wurden für die Außenlufttemperatur Wetterdaten aus dem südöstlichen Mittelgebirge angesetzt. Anhand der Oberflächentemperaturen wurde die Oberflächenfeuchte ermittelt. Die Daten wurden dann in WUFI-Bio importiert, um eine biohygrothermische Simulation durchzuführen. Da diese instationären Berechnungen sehr zeitaufwändig sind, wurde je Konstruktionsdetail nur eine bis zu maximal drei instationäre Berechnungen für ein ganzes Jahr durchgeführt. Die restlichen Varianten wurden nur für den Monat Januar berechnet. Aus diesen Ergebnissen wurde für jedes Anschlussdetail ein Faktor für das Schimmelpilzwachstum für das gesamte Jahr gebildet. Dadurch wurde der Berechnungsaufwand erheblich verringert und es konnten für mehr Varianten je Detail Simulationen unter instationären Randbedingungen berechnet werden. Das Wachstum des Schimmelpilzes, welches von Wufi-Bio prognostiziert wurde, ist ins Verhältnis zu den 2D-Temperaturfaktoren (Kante/linienförmige Wärmebrücke) und 3D-Temperaturfaktoren (Ecke/punktförmige Wärmebrücke) gesetzt worden. Durch diese Vorgehensweise kann mit Hilfe des Temperaturfaktors auch das Schimmelpilzwachstum abgeschätzt werden.

Die Temperaturfaktoren der linienförmigen Wärmebrücke zeigen in Relation zum Schimmelpilzwachstum an der punktförmigen Wärmebrücke hohe Streuungen. Ist der geforderte Temperaturfaktor der DIN 4108-2 von 0,7 an der linienförmigen Wärmebrücke eingehalten, wurde bei diesen Berechnungen an der zugehörigen punktförmigen Wärmebrücke durch WUFI-Bio ein Schimmelpilzwachstum von bis zu 500 mm in einem Jahr prognostiziert. Das heißt, diese Konstruktion kann so nicht ausgeführt werden. In der DIN 4108-2 ist nicht

eindeutig genug festgelegt, wann neben dem Temperaturfaktor der linienförmigen Wärmebrücke auch der Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke ermittelt werden muss, bzw. ob das überhaupt gefordert ist. Da insbesondere Innendämmungen den Wärmebrückeneffekt erhöhen, ist besonders in dieser Situation eine Abschätzung des Schimmelpilzbildungsrisikos über den Temperaturfaktor der linienförmigen Wärmebrücke (Kante) kritisch zu sehen. Die Temperatur an der punktförmigen Wärmebrücke (Ecke) kann deutlich niedriger sein. Der 3D-Temperaturfaktor ist aussagekräftiger. Im Durchschnitt ist eine Temperaturdifferenz von 4,3 °C zwischen linienförmiger und punkförmiger Wärmebrücke ermittelt worden (ohne die Details Nr. 6, 5.1 und 5.2). Dies bedeutet für den Temperaturfaktor eine Verringerung von fast 0,2. Die Temperaturfaktoren der punktförmigen Wärmebrücke können somit weit von den Temperaturfaktoren der linienförmigen Wärmebrücke abweichen.

Das für den Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke ermittelte prognostizierte Schimmelpilzwachstum nimmt einen gleichmäßigen Verlauf ohne große Abweichungen an. Es hat sich gezeigt, dass ab dem Wert von über oder gleich 0,68 kein Schimmelpilzwachstum mehr auftritt. Wird also der Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke nach DIN 4108-2 ermittelt und beträgt mindestens 0,7 an der punktförmigen Wärmebrücke, kann die Konstruktion als unbedenklich hinsichtlich Schimmelpilzbildung angesehen werden. Da sich gezeigt hat, dass sich der Temperaturfaktor der punktförmigen Wärmebrücke mit dem Regressionsmodell aus dem der linienförmigen Wärmebrücke ermitteln lässt, kann über diesen Umweg auch das Schimmelpilzbildungsrisiko anhand des Temperaturfaktors der linienförmigen Wärmebrücke abgeschätzt werden.

Während der Berechnungen stellte sich heraus, dass der in DIN EN ISO 10211 genannte Mindestabstand zu punkt- und linienförmigen Wärmebrücken von einem Meter nicht ausreichend ist, um die Oberflächentemperatur der linienförmigen Wärmebrücke an einem 3D-Modell zu ermitteln. Das bedeutet, dass der Einflussbereich der punktförmigen Wärmebrücke bei den hier untersuchten Anschlussdetails und Varianten deutlich größer ist.

Durch die große Bandbreite der Varianten konnte ein großer Bereich von prognostiziertem Schimmelwachstum in Relation zum Temperaturfaktor dargestellt werden. Die Konstruktionen, die für die Berechnungen modelliert wurden, sind ausschließlich auf der Innenseite der Außenwand gedämmt. Das heißt, dass keine weitere Dämmung an der Raumdecke oder einer Innenwand angebracht ist. Um eine Ausführung möglich zu machen, kann z.B. eine Art Dämmkeil, der zusätzlich an die Decke angebracht wird, verwendet werden. So kann der verstärkte Einflussbereich von Wärmebrücken durch Innendämmung teilweise überdämmt werden. Auch wäre es möglich (z.B. bei Detail Nr. 6) die einbindende Innenwand teilweise zu dämmen. Dämmkeile können in vielen verschiedenen Varianten verwendet werden. Es besteht also die Möglichkeit verschiedene Optimierungen an den Dämmkonstruktionen vorzunehmen.

4.9.3 Messtechnische Validierung

Wie die numerischen Berechnungen von der Messung abweichen und ob sie auf der sicheren Seite liegen war eine Kernfrage des Forschungsauftrags. Es galt zu klären, ob durch die in der Berechnung angesetzten Wärmeleitfähigkeiten und den angesetzten Wärmeübergangswider-

ständen ein Sicherheitspuffer entsteht, der dafür sorgt, Schäden durch zu niedrige Oberflächentemperaturen zu verhindern. Die stationäre Auswertung hat ergeben, dass im Bereich der Wärmebrücke (zwischen Außenwand und Stahlbetondecke) im unsanierten Fall an der Unterkante zur Betondecke die Berechnung um nur 0,2 K kälter ist und damit ein geringer Sicherheitspuffer vorliegt. Auch für den Fall mit Innendämmung ist die minimale Oberflächentemperatur an der unteren Kante der Betondecke im Berechnungsergebnis 0,3 K kälter als der korrespondierende Messwert. Durch die gute Abstimmung der Materialparameter weist die Berechnung im untersuchten Wärmebrückenbereich einen nur geringen Sicherheitspuffer auf. Unter Berücksichtigung der Messungenauigkeit der Thermoelemente von ±0,4 K sind die Ergebnisse als identisch zu betrachten (siehe Kapitel 4.8).

Um zwischen Messung und Berechnung übereinstimmende Ergebnisse zu erzielen, müssen die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} ebenfalls der Situation angepasst werden. Am Prüfkörper mit einbindender Stahlbetondecke hat sich gezeigt, dass die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erzielt werden kann, wenn für die Berechnung ein R_{si} von 0,20 (m²·K)/W und R_{se} von 0,05 (m²·K)/W angesetzt werden. Werden die Standardbedingungen aus DIN EN ISO 6946 von R_{si} = 0,13 (m²·K)/W und R_{se} = 0,04 (m²·K)/W angesetzt, ergeben sich etwas größere Abweichung zwischen Messung und Berechnung, was dafür spricht, dass die Wärmeübergangsrandbedingungen bei der Messung durch die Modifikationen im Prüfstand (größerer Hotboxraum für auskragendes Bauteil) etwas von den Standardbedingungen abweichen.

Zusammenfassend lässt sich hinsichtlich der Übereinstimmung von Messung und Berechnung feststellen, dass sobald die für die Berechnung nötigen Eingangsgrößen wie Wärmeleitfähigkeiten und Wärmeübergangswiderstände passend gewählt werden, ein hoher Übereinstimmungsgrad mit nur geringem Sicherheitspuffer festzustellen ist.

4.10 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Wärmebrücken an der Gebäudehülle nach DIN EN ISO 10211, eigene Darstellung des FIW München in Anlehnung an Volland et al. 2012. 315
Abb. 4-2: Temperaturverlauf desselben Bauteils; von links nach rechts: ungedämmt, mit Außendämmung, mit Innendämmung. 318
Abb. 4-3: Wärmestromdichte desselben Bauteils, von links nach rechts: ungedämmt, mit Außendämmung, mit Innendämmung. 318
Abb. 4-4: Zusammenhang von Lufttemperatur, Wassergehalt der Luft und der relativen Luftfeuchte (Quelle: Sprengard und Spitzner 2010). 321
Abb. 4-5: Minimale Keim- und Wachstumsbedingungen für Schimmelsporen auf biologisch verwertbaren ($LIM_{Bau}I$) und nicht verwertbaren Substraten ($LIM_{Bau}II$) wie sie im Baubereich vorkommen in Abhängigkeit von der vorherrschenden Temperatur und relativen Feuchte nach Sedlbauer 2001. Zum Vergleich ist die LIM-Kurve für ein biologisch optimales Substrat (LIM 0) dargestellt. 323
Abb. 4-6: Übersicht der untersuchten Anschlussdetails im Schnitt. 331
Abb. 4-7: Verhältnis Schimmelpilzwachstum im Januar zu gesamten Jahresprognose. 341

Abb. 4-8: Temperaturverlauf der instationären Betrachtung für Detail 3 im Jahresverlauf. 349
Abb. 4-9: Temperaturverlauf der instationären Betrachtung des Monats Januar für Detail 3. ..350
Abb. 4-10: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 1. 351
Abb. 4-11: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 2. 351
Abb. 4-12: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 3. 352
Abb. 4-13: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 4. 352
Abb. 4-14: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 5. 353
Abb. 4-15: Darstellung Ergebnisse der 2- und 3- dimensionalen f_{Rsi} Werte für Detail 6. 353
Abb. 4-16: Zusammenhang $Q_{3DE/2DK}$ und Wärmeleitfähigkeit der Innendämmung. 354
Abb. 4-17: Zusammenhang $Q_{3DE/2DK}$ und Dämmstärke der Innendämmung. 355
Abb. 4-18: Darstellung des logarithmischen Verlaufs von $Q_{3DE/2DK}$ zum Produkt aus WLF und Dicke der Innendämmung. 356
Abb. 4-19: Darstellung des logarithmischen Verlaufs von $Q_{3DE/2DK}$ und der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks. 357
Abb. 4-20: Vergleich Regressionsmodell und numerische Lösungen (Detail 3: Anschluss Kellerwand an Außenecke der Außenwand; oberes Raumeck des beheizten Kellerraums). 358
Abb. 4-21: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe I. 360
Abb. 4-22: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 2D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe I 361
Abb. 4-23: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe II. 361
Abb. 4-24: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 2D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen für Detail 3 aus Substratgruppe II. 362
Abb. 4-25: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe I. 363
Abb. 4-26: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 2D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe I. 364
Abb. 4-27: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe II. 364
Abb. 4-28: Jahresschimmelpilzwachstum in Abhängigkeit der 3D Temperaturfaktoren aus stationären Berechnungen aus Substratgruppe II. 365
Abb. 4-29: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 1.1. 367
Abb. 4-30: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 1.2. 367
Abb. 4-31: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 2.1. 368
Abb. 4-32: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 3.1. 368
Abb. 4-33: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 3.2. 369
Abb. 4-34: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 4.1. 369

Abb. 4-35: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.1. 370
Abb. 4-36: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.2. 370
Abb. 4-37: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.3. 371
Abb. 4-38: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 5.4. 371
Abb.4-39: Vergleich Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit Regressionsmodell für Position 6.1. 372
Abb. 4-40: Konstruktion des Prüfkörpers der einbindenden Zwischendecke. 374
Abb. 4-41: Konstruktion des Prüfkörpers der einbindenden Innenwand. 375
Abb. 4-42: Positionierung Thermoelemente und Messplatten auf der Warmseite des Prüfkörpers mit einbindender Decke. 376
Abb. 4-43: Positionierung Thermoelemente und Messplatten auf der Warmseite des Prüfkörpers mit einbindender Innenwand. 376
Abb. 4-44: Geregelter Heizkasten (Quelle: DIN EN ISO 8990). 378
Abb. 4-45: 3-D modellierte Stahlbetondecke in Comsol Multiphysics. 379
Abb. 4-46: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Decke: Temperaturverlauf auf der Warmseite im 380
Abb. 4-47: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Decke: Temperaturverlauf auf der Kaltseite im gedämmten Fall. 381
Abb. 4-48: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Innenwand: Temperaturverlauf auf der Warmseite im gedämmten Fall. 382
Abb. 4-49: Stationäre Betrachtung an der einbindenden Innenwand: Temperaturverlauf auf der Kaltseite im gedämmten Fall. 383

4.11 Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1: Untersuchte Varianten der Wärmeleitfähigkeit der Bestandskonstruktion. 325
Tab. 4-2: Parametervariation von Dicke und Wärmeleitfähigkeit für die Innendämmung. 326
Tab. 4-3: Materialkennwerte. 327
Tab. 4-4: Randbedingungen für die stationäre Berechnung von $f_{Rsi.}$ 328
Tab. 4-5: Randbedingungen für die instationäre Berechnung von Θ_{si} 329
Tab. 4-6: Temperaturen zu kritischen Oberflächenfeuchten aus Literatur. 340
Tab. 4-7: Ergebnisse des ermittelten Faktors zur Hochrechnung auf die Jahreswerte am Beispiel von Detail 3. 342
Tab. 4-8: Ergebnisse des Quotienten $QJ;M$ für alle Details. 342
Tab. 4-9: Durchgeführte 2D- und 3D-Wärmebrückenberechnungen für die Anschlussdetails 2 und 3. 345
Tab. 4-10: Durchgeführte 2D- und 3D- Wärmebrückenberechnungen für die Anschlussdetails 1, 4, 5 und 6. 346
Tab. 4-11: Berechnungsergebnisse der minimalen Oberflächentemperatur im oberen Raum von Detail 3. 347

Tab. 4-12: Mithilfe des Faktors ermittelte Jahreswachstumswerte für Detail 3.1 (UNTEN). 359
Tab. 4-13: Mithilfe des Faktors ermittelte Jahreswachstumswerte für Detail 3.2 (OBEN). 360
Tab. 4-14: Ergebnisse Regressionsparameter für alle untersuchten Details und Vergleich zu numerischen Berechnungen stationär. 366
Tab. 4-15: Ergebnisse der Wärmebrückenkennwerte im Vergleich. 385

4.12 Literaturverzeichnis

DIN EN ISO 10456, Mai 2010: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften.

DIN EN ISO 6946, März 2018: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren.

Bundesamt für Raumwesen und Raumordnung (BBR) (Hg.) (2017): Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Unter Mitarbeit von DWD.

DIN 68800-2, Februar 2012: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.

Künzel, Hartwig M.; Sedlbauer, Klaus P. (2015): Neufassung von DIN 4108-3 zur rechnerischen Feuchteschutzbeurteilung. In: *Bauphysik* 37 (2), S. 132–136. DOI: 10.1002/bapi.201520015.

Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden ; erarbeitet im Rahmen der EU-Projekte TABULA - "Typology approach for building stock energy assessment", EPISCOPE - "Energy performance indicator tracking schemes for the continous optimisation of refurbishment processes in European housing stocks". 2., erw. Aufl. Darmstadt: IWU. Online verfügbar unter http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf.

Nicolas Benno Sedlmayr (2016): Wärmetechnische Messungen an einer innen gedämmten Außenwand mit einbindender Betondecke. Vergleich mit numerischen Berechnungen für den stationären und instationären Fall. Bachelorarbeit. FH München, München.

Prof. Dr.-Ing. Leimer, Hans-Peter; Toepfer, Ilka (2005): Fensterlüftung v/s kontrollierte Wohnraumbe- und entlüftung. Auswirkung auf den Schimmelpilzbefall. Hg. v. HAWK Hildesheim.

WTA Merkblatt 6-3-05/D: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstums.

Sprengard, Christoph; Spitzner, Martin (2010): KLB-Handbuch Bauphysik und Wärmeschutz.

Volland, Johannes; Pils, Michael; Skora, Timo (2012): Wärmebrücken. Erkennen, optimieren, berechnen, vermeiden ; mit 47 Tabellen. 1. Aufl. Köln: Müller.

DIN EN ISO 10211, Juni 2015: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen.

DIN EN ISO 8990, September 1996: Wärmeschutz - Bestimmung der Wärmedurchgangseigenschaften im stationären Zustand.

DIN 4108-2, Februar 2013: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

DIN 4108-3, November 2014: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.

DIN 4108-8, September 2010: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden.

DIN 4108 Beiblatt 2, November 2017: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele.

DIN 4108-6, Juni 2003: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs.

DIN EN 13370, März 2018: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden.

DIN EN 1934, April 1998: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Messung des Wärmedurchlasswiderstandes.

Wolfgang Schmidt (2018): Wärmetechnische Messungen an einer innen gedämmten Außenwand mit einbindender Innenwand. Study Project. TU München, München.

ZUB - Zentrum für Umweltbewusstes Bauen: Altbau Atlas - Zentrum für Umweltbewusstes Bauen. Online verfügbar unter http://www.altbaukonstruktionen.de/, zuletzt geprüft am 04.09.2018.

5 Energetische Betrachtung von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb unter Komfortbedingungen

Rund 30 % des Energieverbrauchs in Deutschland sind auf Privathaushalte und davon wiederum ca. 85 % auf die Wohnungsheizung zurückzuführen, was auf große Energieeinsparpotentiale in diesem Sektor schließen lässt. Die meisten Bemühungen zur Energieeffizienzsteigerung im Gebäudesektor zielen jedoch auf neu zu errichtende Gebäude ab (z.B. EnEV). Um deutliche Energieeinsparungen zu erzielen und dadurch den Primärenergiebedarf in Deutschland zu reduzieren ist es aber vonnöten, auch den Gebäudebestand in diese Überlegungen mit einzubeziehen. In ihrem Energiekonzept von 2010 hat sich die Bundesregierung daher das Ziel gesetzt, die energetische Sanierungsrate von jährlich weniger als 1 % auf 2 % des gesamten Gebäudebestandes zu verdoppeln (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010; Intergovernmental Panel On Climate Change 2013).

Eine potentiell wirtschaftliche Strategie, um eine weitgehende energetische Verbesserung von (Bestands-)Gebäuden zu erzielen, stellt das Aufbringen einer Innendämmung dar. Insbesondere in Kombination mit intermittierendem Gebäudebetrieb, niedrigemissiven Beschichtungen und Strahlungsheizungen können durch Entkoppelung der thermischen Speichermassen eine schnellere Aufheizzeit sowie Energieeinsparungen erwartet werden. Allerdings verändert eine solche Maßnahme auch das hygrothermische Verhalten von Bauteilen sowie die thermische Behaglichkeit im Raum. Die Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf, hygrothermischem Bauteilverhalten und Komfort im Zusammenhang mit Innendämmungen im intermittierenden Gebäudebetrieb sind nach derzeitigem Stand der Forschung noch nicht ausreichend untersucht. Deren detaillierte rechnerische und messtechnische Betrachtung soll also Bestandteil dieses Kapitels sein.
Dies erforderte die in Abb. 5-1 zusammengefassten Arbeitsschritte, deren genauere Beschreibung Inhalt dieses Teilberichts ist. Ziel dabei ist, Vorteile und Potentiale neuartiger Ansätze im Bereich von Innendämmung im Zusammenspiel mit intermittierendem Betrieb sowohl auf Gebäudeebene als auch für den gesamten deutschen Gebäudebestand zu identifizieren.

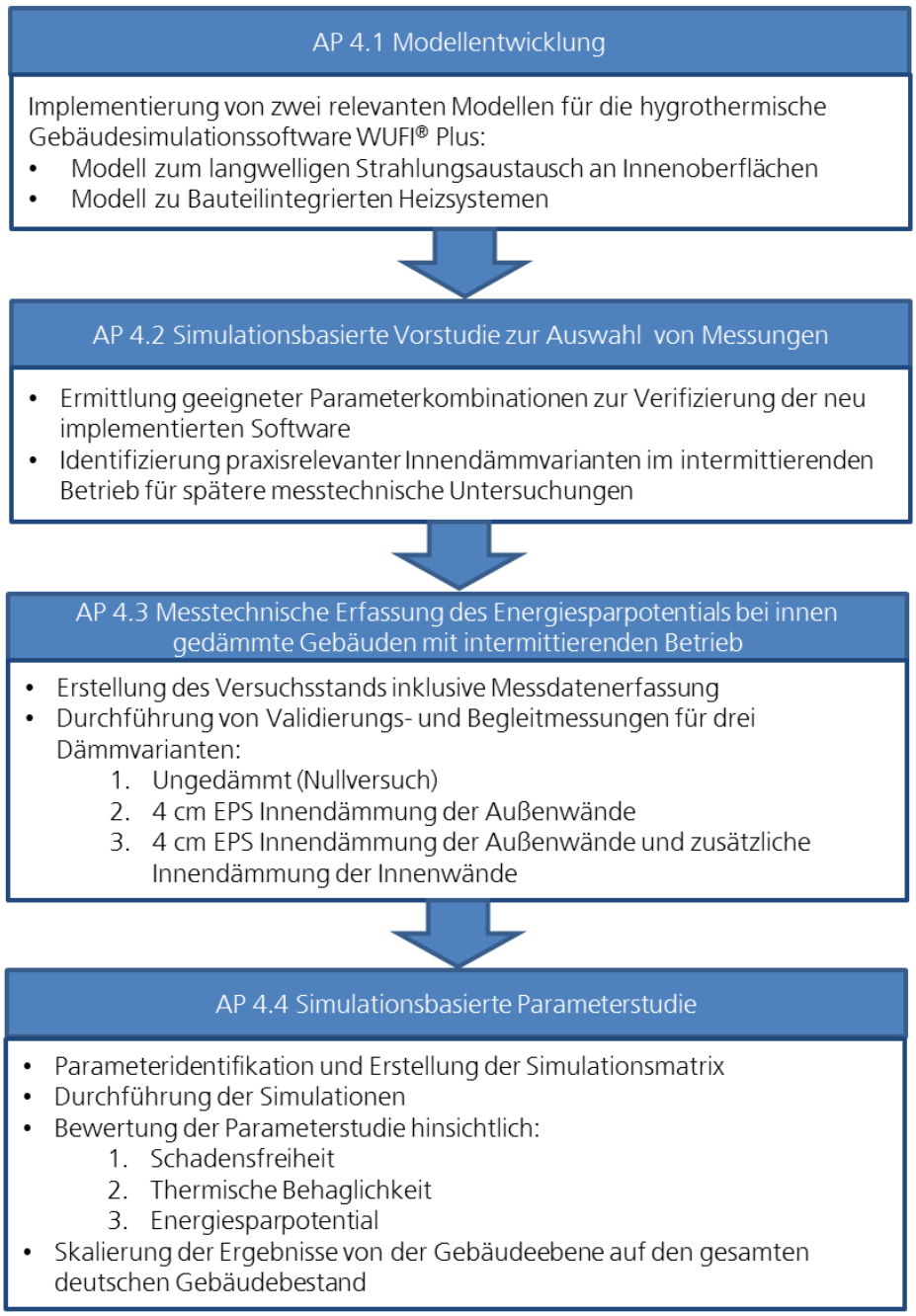


Abb. 5-1: Ablaufdiagramm der durchzuführenden Arbeitsschritte.

5.1 Modellentwicklung

Die Auswirkungen von Innendämmungen, niedrigemissiven Oberflächenbeschichtungen und Strahlungsheizungen auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit spielen eine zentrale Rolle in dieser Arbeit. Die optimale Kombination dieser Parameter ermöglicht ein schnelleres Aufheizen der Innenoberflächen, sodass ein merkliches Energiesparpotential sowie ein schnelleres Erreichen des Behaglichkeitskriteriums zu erwarten sind.
Im Vorfeld dieser Arbeit war es nicht möglich, diese Effekte in WUFI® Plus rechnerisch hinreichend zu bewerten. Dazu war es erst notwendig, neue Modelle in WUFI® Plus

hinzuzufügen bzw. bestehende Modelle weiter zu entwickeln. Dies umfasst insbesondere folgende Modelle:

- Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen
- Modell zu elektrischen bauteilintegrierten Heizsystemen

Die Entwicklung und Implementierung dieser beiden Modelle in WUFI® Plus soll im Folgenden genauer beleuchtet werden.

5.1.1 Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch

Bisher wurde der langwellige Strahlungsaustausch an Innenoberflächen in WUFI® Plus lediglich durch einen pauschalen Wärmeübergangswiderstand für Strahlung berücksichtigt. Bei ähnlichen Oberflächentemperaturen ist dies durchaus zulässig. Weichen die Oberflächentemperaturen stärker voneinander ab (z. B. durch Flächenheizsysteme), ist eine genaue Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs sinnvoll. Für WUFI® Plus wurde daher ein Modell entwickelt, das den langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen detailliert berücksichtigen kann.

5.1.1.1 Grundlagen

Die Wärmestrahlung ist neben der Konvektion und Wärmeleitung einer der drei grundlegenden Mechanismen für die Übertragung von Energie zwischen zwei Körpern mit verschiedenen Temperaturen. Wärmeaustausch durch langwellige Strahlung findet prinzipiell zwischen allen Flächen statt, deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt. Sie ist nicht an ein Medium gebunden. Die Übertragung thermischer Energie hängt stark von der Oberflächentemperatur sowie den Absorptions-, Emissions-, Reflexions- und Transmissionseigenschaften der Oberflächen ab. Diese sind wiederum eine Funktion von Temperatur, Wellenlänge und Richtungswinkel (Keller 1997).

Die Richtungswinkel der Flächen zueinander spielen somit eine wichtige Rolle in der geometriebasierten Strahlungsberechnung und werden über sogenannte Sichtfaktoren berücksichtigt. Sichtfaktoren beschreiben die anteilige Strahlung, welche von einer Oberfläche auf eine andere trifft. Da sie eine rein geometrische Größe sind, werden bei ihrer Berechnung Oberflächeneigenschaften wie Emissions- und Reflexionsvermögen nicht berücksichtigt. Um alle möglichen Strahlungswege (u. a. auch Reflexionen) mit einzubeziehen, können Gebhart-Faktoren angewandt werden. Diese ermitteln den Teil der von einer Oberfläche emittierten Strahlung, der an einer anderen auch absorbiert wird (Winkler et al. 2016). Prinzipiell gilt dabei, dass in einem geschlossenen Raum eine Beziehung zwischen jeder und jeder Fläche besteht (Keller 1997).
Aufgrund der genannten Abhängigkeiten können detaillierte Analysen zur Strahlungsübertragung schnell kompliziert werden. Trotzdem ist eine genauere Betrachtung des langwelligen Strahlungsaustausches auch im Niedrigtemperaturbereich häufig sinnvoll, vor allem, wenn größere Unterschiede zwischen den Oberflächentemperaturen innerhalb eines Raumes herrschen (Keller 1997).

Die Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs an Innenoberflächen erfolgt in WUFI® Plus in mehreren Schritten (Winkler et al. 2016; Siegel und Howell 2002):

Schritt 1: Berechnung der Sichtfaktoren

Die Mittelpunkte zweier Flächen A_i und A_j werden durch eine Linie r verbunden (siehe Abb. 5-2). Definiert man den Winkel θ_i als den Winkel zwischen r und dem Normalvektor n_i auf der Fläche A_i (analog dazu θ_j für den Normalvektor n_j auf der Fläche A_j), so lässt sich der Sichtfaktor zwischen den zwei Flächen wie folgt berechnen:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \iint A_i A_j \frac{cos\theta_i * cos\theta_j}{\pi * r^2} dA_i dA_j$$

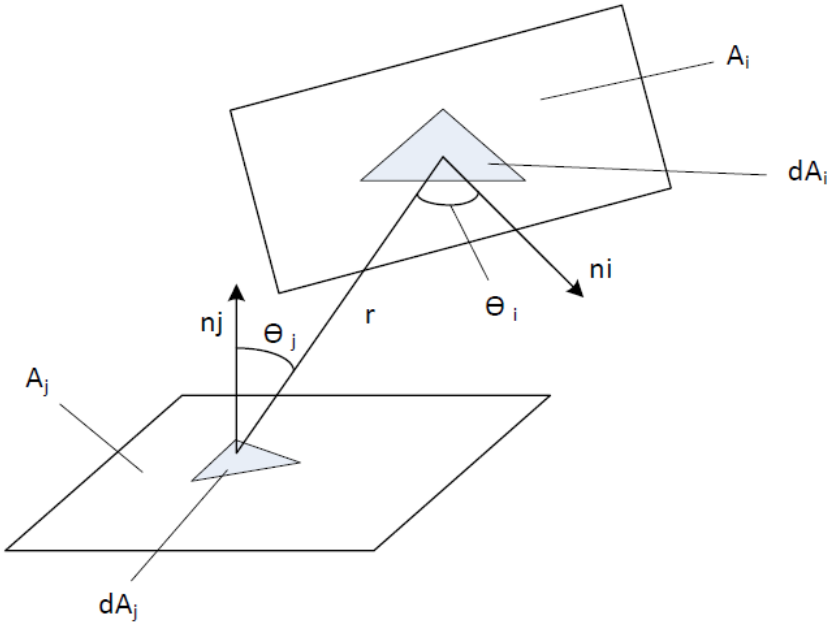


Abb. 5-2: Geometrische Skizze zur Definition des Sichtfaktors zwischen zwei Flächen i und j (Quelle: Winkler et al. 2016).

Eine analytische Lösung dieses Integrals ist nur für bestimmte Formen und gegenseitige Positionierungen möglich. Für alle anderen Fälle ist es notwendig, die Fläche i in n und die Fläche j in m Dreiecke zu unterteilen. Für jedes Paar von Dreiecken kann anschließend durch numerische Lösung der Sichtfaktor bestimmt werden:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \frac{cos\theta_i * cos\theta_j}{\pi * r^2} dA_i dA_j$$

Die Summe aller Sichtfaktoren sollte für jede Fläche genau 1,0 ergeben. Da dieses Ergebnis durch den numerischen Lösungsansatz jedoch nicht erreicht wird, werden die Teilergebnisse automatisch angepasst, indem der Fehler zur exakten Lösung (1,0) über die gesamte Innenoberfläche verteilt wird.

Schritt 2: Berechnung der Gebhart-Faktoren

Um auch die Oberflächeneigenschaften für die Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs zu berücksichtigen, ergibt sich der Gebhart-Faktor aus den Sichtfaktoren sowie dem langwelligen Emissionsvermögen ε und Reflexionsvermögen ρ:

$$G = (I - F * \rho)^{-1} * F * \varepsilon$$

Zur Vereinfachung werden die Gebhart-Faktoren für N Flächen innerhalb einer betrachteten Gebäudezone in Form einer N x N - Matrix geschrieben Diese setzte sich zusammen aus der Gebhart-Matrix G, der Identitäts-Matrix I, der Sichtfaktoren-Matrix F sowie der Emissivitäts-Matrix ε und der Reflektivitäts-Matrix ρ (siehe Abb. 5-3).

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1} & \cdots & G_{NN} \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} F_{11} & \cdots & F_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{N1} & \cdots & F_{NN} \end{bmatrix}$$

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \rho_N \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

Abb. 5-3: Bestandteile der Gebhart-Matrix (Quelle: Winkler et al. 2016).

Schritt 3: Berechnung der langwelligen Strahlung

Die langwellige Strahlung, die an einer Innenoberfläche $I_{1,i}$ absorbiert wird, kann nun wie folgt berechnet werden:

$$I_{1,i} = \varepsilon_i * \sum_{j=1}^{N} G_{ij} * \sigma * ({T_i}^4 - {T_j}^4)$$

5.1.1.2 Erste Validierungsschritte

Bevor im Rahmen des hier beschriebenen Projektes eine Validierung mit Messdaten erfolgte, wurden bereits folgende Validierungsschritte durchgeführt:

- Vergleich der von WUFI® Plus ermittelten Ergebnisse mit analytisch ermittelten Ergebnissen für die Sichtfaktorenberechnung
- Vergleich der von WUFI® Plus ermittelten Ergebnisse mit analytisch ermittelten Ergebnissen für den langwelligen Strahlungsaustausch
- Vergleich der WUFI® Plus Ergebnisse mit Testfällen aus der DIN EN 13791

Die Durchführung und Ergebnisse dieser Validierungsschritte soll hier kurz zusammengefasst werden.

Vergleich Sichtfaktoren

Die korrekte Bestimmung der Sichtfaktoren spielt eine zentrale Rolle bei der Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs an Innenoberflächen. Da für einige herkömmliche

geometrische Situationen analytisch berechnete Sichtfaktoren existieren, können diese mit den Simulationsergebnissen von WUFI® Plus verglichen werden. WUFI® Plus unterstützt verschiedene Einstellungen hinsichtlich der Rechengenauigkeit (die Dichte des Triangulationsnetzwerks steigt mit höherer Genauigkeit). Es wurde erwartet, dass eine höhere Zahl an Dreiecken mit einer genaueren Berechnung der Sichtfaktoren einhergeht. Beim Vergleich der Ergebnisse bei unterschiedlicher Genauigkeit konnte jedoch festgestellt werden, dass bereits bei niedriger Rechengenauigkeit die analytischen und simulierten Ergebnisse gut übereinstimmen (Abweichungen in der Kontrollsumme von 0,0264 bei geringer Rechengenauigkeit bis hin zu Abweichungen von 0,0013 bei sehr hoher Rechengenauigkeit) und die Validierung somit erfolgreich ist.

Vergleich langwelliger Strahlungsaustausch

Für einige geometrische Anordnungen (z.B. zwei gleichgroße parallele Platten) kann neben den Sichtfaktoren auch der Wärmestrom durch langwellige Strahlung analytisch berechnet werden. In WUFI® Plus wurden die Platten mit einer Kantenlänge von 12 m und einem Abstand von 0,2 m entworfen. Ein Vergleich der analytischen und simulierten Ergebnisse wird mit unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich der Temperatur und Emissivität der beiden Oberflächen durchgeführt. Vergleicht man die analytischen und simulierten Ergebnisse der vier Testfälle, ergibt sich eine maximale Abweichung von 0,3 % für die resultierenden Wärmeströme durch langwellige Strahlung. Für den untersuchten Testfall kann dieser Validierungsschritt also als erfolgreich betrachtet werden.

Testfälle DIN EN 13791

Die DIN EN ISO 13791:2012 gibt generelle Anforderungen und Validierungsverfahren für thermische Gebäudesimulationssoftware vor. Das schließt Testfälle für die relevanten Wärmeaustauschprozesse ein, also auch den langwelligen Strahlungsaustausch. Hier werden für vier Testräume mit ausschließlich opaken Bauteilen und variierenden Geometrien und Außentemperaturen die resultierenden Innenraumtemperaturen vorgegeben. Die Geometrien der Testfälle sind in Abb. 5-4 dargestellt. Die jeweils rot markierte Wand stellt eine Außenwand mit einer Außentemperatur von 30°C und einer Absorption von langwelliger Strahlung von 100 W/m² auf der Innenseite dar.

Um die Vorgaben der Norm zu erfüllen dürfen die simulierten Innenraumtemperaturen um maximal 0,5 K von den Werten der DIN EN ISO 13791:2012 abweichen. Die in WUFI® Plus resultierenden Innenraumtemperaturen sowie die Referenzwerte der Norm sind in Tab. 5-1 zusammengefasst. Die maximale Abweichung beträgt 0,5 K. Da die Vorgaben der Norm für alle vier Testfälle erfüllt werden, kann auch dieser Validierungsschritt als erfolgreich betrachtet werden.

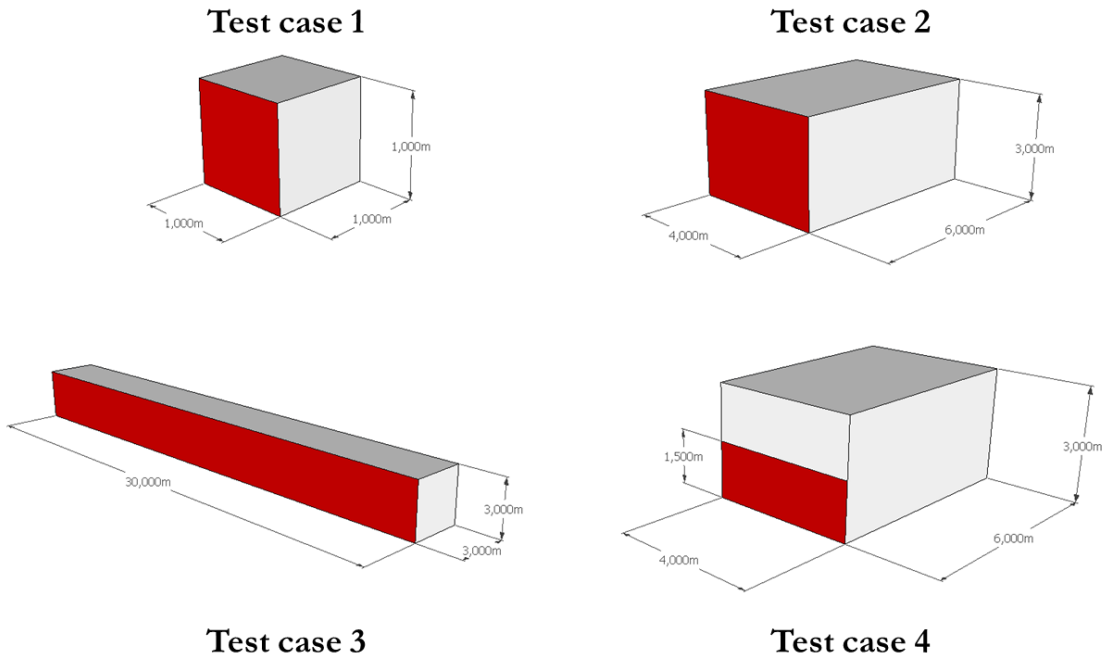


Abb. 5-4: Geometrien der DIN EN ISO 13791:2012 Testfälle. Außenwände sind in Rot hervorgehoben (Quelle: Winkler et al. 2016).

Tab. 5-1: Vergleich der simulierten Innenraumtemperaturen [°C] mit den Referenzwerten der DIN EN ISO 13791:2012

Ergebnis	Testfall 1	Testfall 2	Testfall 3	Testfall 3
DIN EN 13791	34,4°C	30,4°C	38,5°C	25,5°C
Wufi® Plus	34,3°C	30,1°C	38,3°C	25,0°C

5.1.1.3 Modellumsetzung

Das Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen in WUFI® Plus muss im Reiter „Building“ unter „Numerics“ zunächst durch die Auswahl des entsprechenden Kontrollkästchens („Longwave Exchange on interior surfaces“) für den gewünschten Case aktiviert werden, siehe Abb. 5-5.

Bevor die gewöhnliche WUFI® Plus Berechnung beginnt, findet zunächst die Sichtfaktorenberechnung in einem eigenen Vorprozess statt. Ein Infofenster gibt Aufschluss über den Berechnungsfortschritt (Abb. 5-6). Je nach Komplexität der Gebäudegeometrie kann die Sichtfaktorenberechnung einige Zeit in Anspruch nehmen. Um die Rechenzeiten so kurz wie möglich zu halten, werden die Sichtfaktoren nur beim ersten Simulationsdurchlauf oder bei Änderungen an der Gebäudegeometrie neu berechnet. Andernfalls verwendet WUFI® Plus die im vorigen Simulationsdurchlauf abgespeicherten Ergebnisse für die Sichtfaktoren.

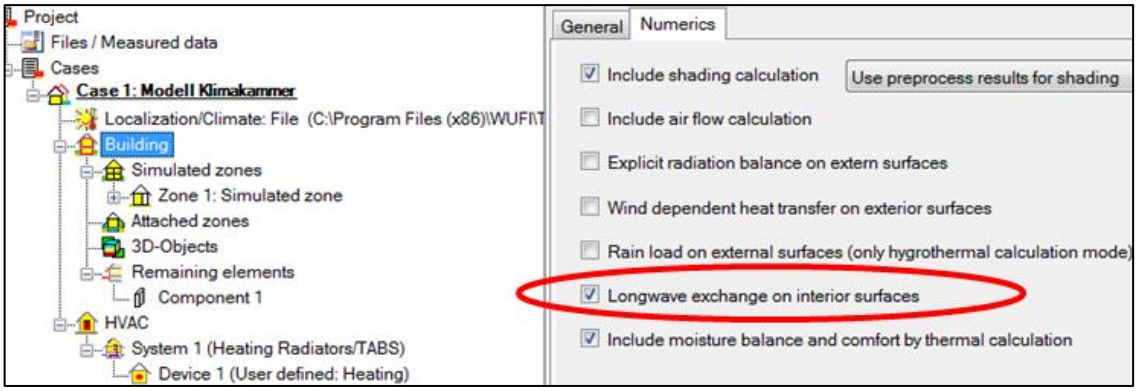


Abb. 5-5: Aktivierung des Modells zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen

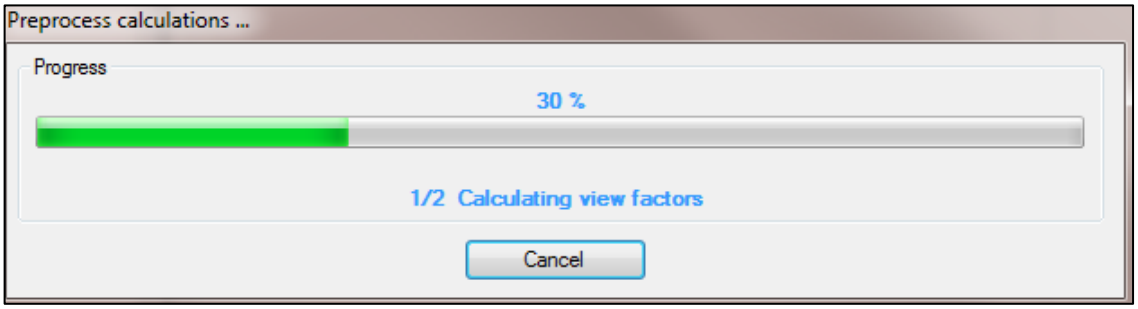


Abb. 5-6: Vorprozess der Sichtfaktorenberechnung in WUFI® Plus.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass der Nutzer nach wie vor für die jeweiligen Bauteile einen beliebigen (konstanten) Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung an den Innenoberflächen eingegeben kann (siehe Abb. 5-7, Standardwert von 4,5 W/m²K). Ist das Modell für den langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen aktiviert, ist diese Eingabe jedoch redundant. Für den Wärmübergang durch Strahlung werden stattdessen die vom Strahlungsmodell berechneten Werte verwendet.

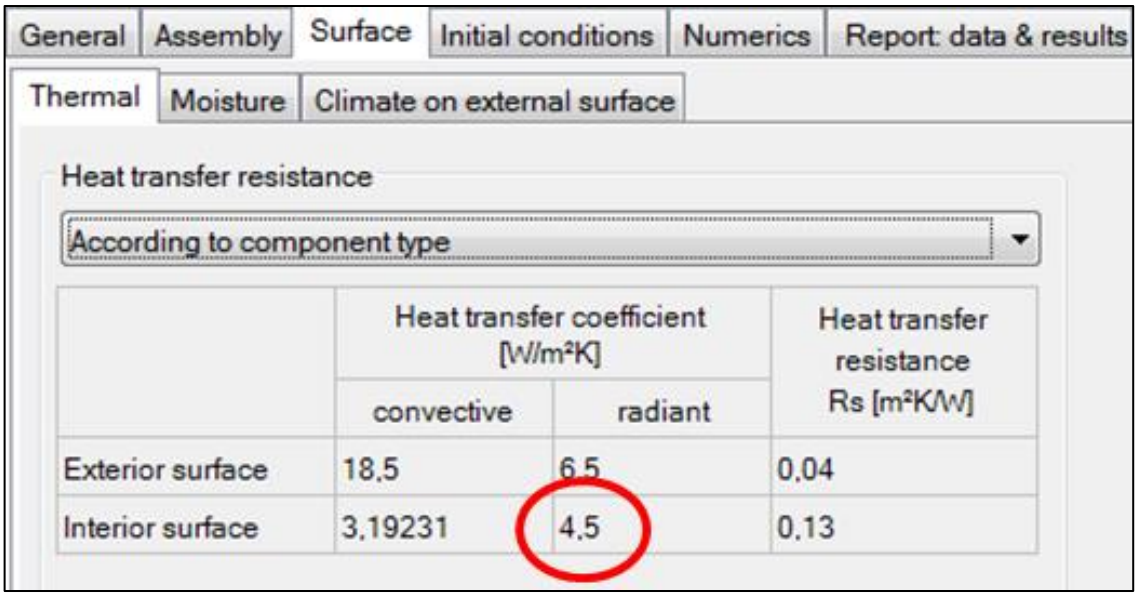


Abb. 5-7: Einstellung für den Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung an Innenoberflächen.

5.1.2 Modell zu Bauteilintegrierten Heizsystemen

Um bauteilintegrierte Heizungssysteme wie Fußboden- oder Wandheizungen darstellen zu können, wurde WUFI® Plus um ein Modell für elektrische TABS (Thermo-Aktive-Bauteil-Systeme) ergänzt. Dabei wird eine bestimmte Nennleistung an Heizenergie [kW] an eine bestimmte Ebene eines bestimmten Bauteiles übergeben, sodass diese zum Heizen des Raumes genutzt werden kann.

5.1.2.1 Grundlagen

Ein opakes Gebäudebauteil, d.h. eine Wand, ein Boden oder eine Decke, wird in WUFI® Plus in eine Vielzahl von finiten Volumen diskretisiert. Einzelne Materialschichten werden dabei definiert. WUFI (heißt Wärme und Feuchte Instationär) berechnet u.a. den Wärmetransport zwischen den einzelnen Schichten, bzw. zwischen den einzelnen finiten Volumina. Die Wärmekapazität des Materials wird hierbei berücksichtigt. Enthalpie- und Feuchte Differenzialgleichungen werden an den finiten Volumen diskretisiert und gelöst. Hier abgebildet ist die Differenzialgleichung der Bauteilsimulation in WUFI® Plus:

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right) + h_V \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x}\right)$$

Zur Lösung dieser Differenzialgleichung wird die Enthalpie-Bilanz aufgestellt. Hier kann den einzelnen finiten Volumen (bzw. einzelnen Bereichen im Bauteilquerschnitt) eine Wärmequelle hinzugefügt werden.

Das TABS-Modell arbeitet nach demselben Prinzip: Es setzt eine Wärmequelle in ein finites Volumen oder in einen bestimmten Bereich im eindimensionalen Bauteilquerschnitt ein. Somit hat diese Wärmequelle Auswirkungen auf das gesamte Bauteil. Abhängig von den

Wärmetransporteigenschaften der eingesetzten Materialien wird die Wärme im Bauteil weiterverteilt, aber auch über die Innen- und Außenoberflächen des Bauteiles mit dem Innenklima bzw. zum Teil auch mit dem Außenklima ausgetauscht. Entscheidend ist hierbei, in welcher Schicht das TABS eingebaut ist. Vorzugsweise sollte es Nahe der Innenoberfläche liegen, um den Wärmeaustausch mit dem Außenklima zu minimieren.

Der Wärmeaustausch mit dem Innenklima wird wie folgt berechnet:

$$\dot{Q}_{Comp,j} = A_c \cdot \frac{1}{R_{si}} \cdot (\vartheta_i - \vartheta_{si})$$

Mit:

A_c	Fläche des opaken Bauteils [m²]
R_{si}	Wärmeüberganswiderstand innen [(m²· K)/W]
ϑ_i	Raumlufttemperatur [°C]
ϑ_{si}	Oberflächentemperatur innen [°C]

Das bauteilintegrierte Heizsystem muss mit der eindimensionalen Simulation des Bauteils kompatibel sein und soll in einem finiten Volumen oder in einem Bereich des Bauteilquerschnitts in Form einer inneren Wärmequelle Wärme in das Bauteil einbringen können. Die zur Regulierung des Raumklimas auf Solltemperatur benötigte Wärmequelle wird in einem bestimmten Material (bzw. in einer bestimmten Schicht) im Bauteil eingefügt. Direktelektrisch wird kein Wirkungsgrad der Heizmatten angesetzt. Infolge der Wärmetransportgleichungen des WUFI® Plus Modells wird die Trägheit der Wärmeabgabe an den Raum je nach Schichtaufbau berücksichtigt.

Zur Regelung des Modelles wird der Simulationsalgorithmus von WUFI® Plus umgestellt von der impliziten Berechnung auf die explizite Berechnung. In einem implizit berechneten Zeitschritt (i.d.R. eine Stunde) wird die Raumtemperatur so lange iterativ angepasst, bis die Enthalpie-Bilanz der Zone ausgeglichen ist. Die Regelung der Heizsysteme ist dabei genau aufgelöst, sodass die Leistung während der Stunde je nach Ist-Wert und Sollwerteinstellungen ein- oder ausgeschaltet werden kann. Diese Methodik ist mit den elektrischen bauteilintegrierten Heizsystemen nicht ohne weiteres umsetzbar. Es besteht jedoch die Möglichkeit, die ideale Heizleistung vorab abzuschätzen und mit dieser einen Teilbetriebsfaktor für das Heizsystem zu berechnen. Dieser Teilbetriebsfaktor gibt an, wie lange pro Zeitschritt das Heizsystem anteilig ein- und ausgeschaltet ist.

WUFI® Plus unterstützt neben der iterativen Simulation des Raumklimas auch ein explizites Rechenverfahren. Hierbei wird die Zeitschrittweite deutlich reduziert (i.d.R. auf 30 Sekunden) und das Raumklima fortlaufend neu berechnet. Die Enthalpie-Bilanz dient hierbei zur Vorhersage bzw. Anpassung der Temperatur für den nächsten Zeitschritt. Mit dem expliziten Rechenverfahren ist es möglich, eine weitestgehend reale Regelung des Heizsystems zu erzielen. Geregelt wird abhängig von den Ist-Werten und den Sollwerteinstellungen für die Raumlufttemperatur (bzw. alternativ ebenfalls einstellbar für die Operativtemperatur). Die Leistung im Heizsystem kann im Bauteil dementsprechend ein- und ausgeschaltet werden. Eine

Hysterese oder eine Regelung in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur sind in diesem Projekt nicht umgesetzt. Weiterführende Regler können jedoch eingebunden werden.

5.1.2.2 Modellumsetzung

Im Menüpunkt „HVAC“ in WUFI® Plus erhält der Nutzer nun beim Hinzufügen eines neuen HVAC-Systems die zusätzliche Option „Heating Radiators/TABS“ auszuwählen. Tut er dies, kann er unter den Systemeinstellungen nun beliebig viele TABS Systeme hinzufügen. Für jedes TABS System müssen folgende Eingaben gemacht werden (siehe Abb. 5-8):

- **Zone**: Zone in der das TABS Modell angewendet werden soll
- **Component**: Bauteil, in der das TABS Modell angewendet werden soll
- **Layer**: Bauteilebene, in der das TABS Modell angewendet werden soll
- **Nominal heat power [kW]**: Nennleistung des TABS Systems in Kilowatt

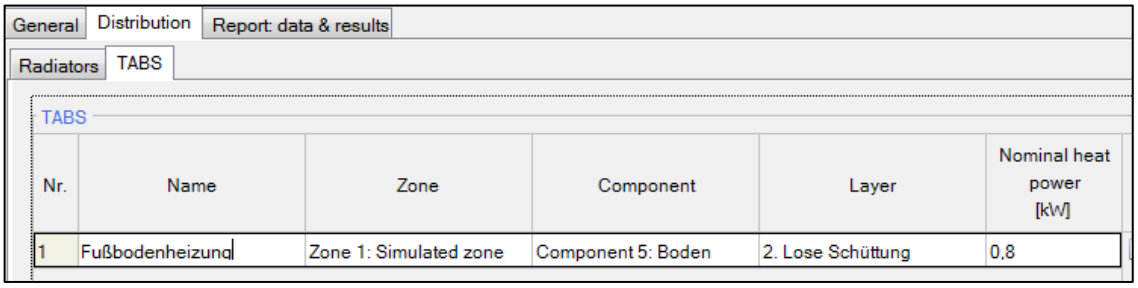


Abb. 5-8: Nutzereingaben zu TABS Systemen in WUFI® Plus.

5.1.2.3 Beispielhafte Modellauswirkung

In Abb. 5-9 ist beispielhaft dargestellt, wie sich der Einsatz eines bauteilintegrierten Heizsystems statt eines idealen Heizsystems auf die Temperaturverläufe eines Testraumes auswirken kann. Betrachtet wird ein Tagesverlauf, bei dem der Testraum von 6:00 bis 18:00 Uhr auf 22°C beheizt werden soll, während er über nach auf bis zu 18°C auskühlen darf.
Die linke Abbildung zeigt einen Vergleich der Lufttemperaturen im Innenraum des Testraumes. Das ideale System, dargestellt in Rot, erreicht die gewünschte Temperatur sehr schnell nach etwa einer Stunde. Das TABS System, dargestellt in Grün, wurde für dieses Beispiel als Fußbodenheizung entworfen. Es reagiert wesentlich träger als das ideale System und benötigt etwa 5h, um den Raum auf die gewünschte Temperatur von 22°C aufzuheizen. Betrachtet man statt der Lufttemperatur jedoch die Operativtemperatur (Abb. 5-9 rechts), werden die Vorteile des Flächenheizsystems deutlich: Durch die warme Fußbodenoberfläche steigt die Operativtemperatur beinahe genauso schnell an wie für die ideale Anlagentechnik und erreicht nach etwa 3h die gewünschte Temperatur von 22°C, während das Modell mit idealer Anlagentechnik maximal eine Operativtemperatur von rund 21°C erreicht.

Es lässt sich schlussfolgern, dass das neue Modell zu bauteilintegrierten Heizsystemen das reale Verhalten von Flächenheizungen deutlich realistischer nachstellen kann, als es in WUFI® Plus bisher möglich war: Sowohl das trägere Verhalten beim Aufheizen, als auch die positiven

Effekte auf die thermische Behaglichkeit durch erhöhte Oberflächentemperaturen im Raum können abgebildet werden.

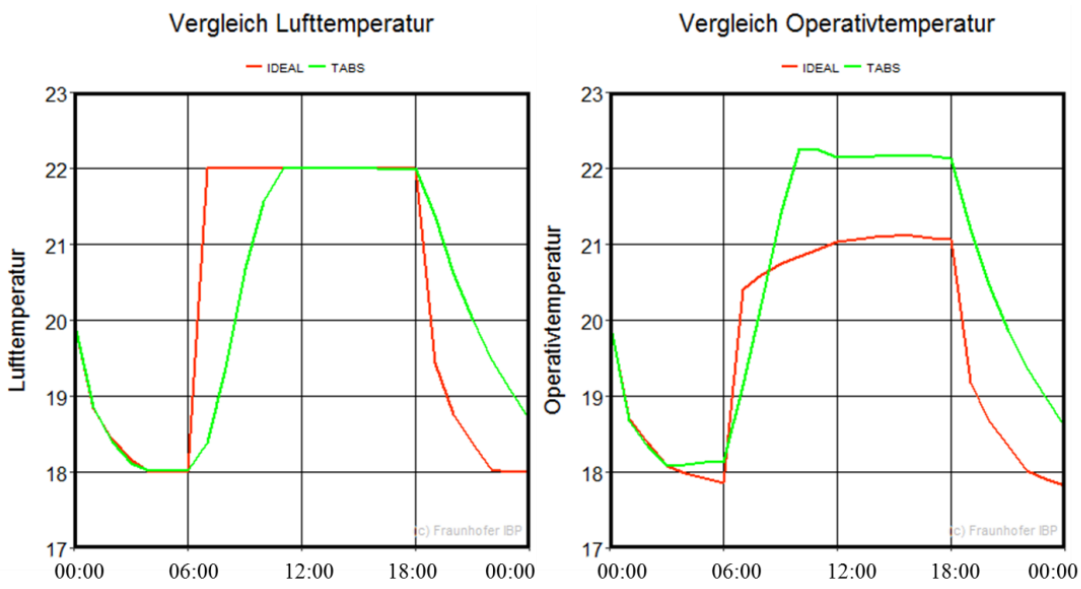


Abb. 5-9: Vergleich des Aufheizverhaltens (Lufttemperatur links, Operativtemperatur rechts) bei Verwendung idealer Anlagentechnik (rot) und des neuen Modells zu bauteilintegrierten Heizsystemen (grün).

5.2 Simulationsbasierte Vorstudie zur Auswahl der Messungen

Ziele dieses Kapitels war es, durch eine simulationsgestützte Vorstudie geeignete Parameterkombinationen für weitere Arbeitsschritte zu identifizieren. Zu diesen gehören die Verifizierung der in AP 4.1 beschriebenen Software sowie die Bewertung von Energiesparpotential und thermischer Behaglichkeit bestimmter Dämm- und Betriebsstrategien. Messversuche wurden hier jeweils so durchgeführt, dass sie möglichst relevant und aussagekräftig die Simulationsergebnisse unterstützen. Weniger relevante Parameter wurden schon vorab identifiziert und nicht messtechnisch untersucht.

Die Vorsimulationen wurden an einem WUFI® Plus Modell durchgeführt, das dem „Versuchsraum für Innendämmungen“ im großen Klimasimulator in Stuttgart nachempfunden wurde. So stimmen u.a. Form, Größe und Bauteilaufbauten des ungedämmten Ausgangszustands überein. Sowohl der Messraum als auch das Modell verfügen über zwei Außenwände und zwei von außen beheizte „Innenwände“. Es gibt keine Fenster und es fielen keine internen Lasten an. Eine genauere Beschreibung des Versuchsraums kann Kapitel 5.3.2 dieses Berichts entnommen werden.

5.2.1 Wahl der Dämmvarianten

In der simulationsbasierten Vorstudie wurden folgende Dämmvarianten untersucht:

- Variation der Dämmstoffdicke von 0cm (ungedämmter Ausgangszustand) bis zu 10cm; der verwendete Dämmstoff wurde den EPS-Dämmstoffplatten nachempfunden, die auch in den Messungen verwendet werden sollten ($\lambda = 0.034$)
- Variation der Oberflächeneigenschaften (mit oder ohne low-E-Beschichtung auf den Innenoberflächen)
- Innendämmung nur der Außenwände und Innendämmung der Außenwände mit zusätzlicher 2cm Innendämmung der Innenwände

In den Voruntersuchungen wurden verschiedene stationäre und instationäre Bedingungen mit verschiedenen Dämmvarianten untersucht und daraus Schlüsse auf das Energiesparpotential und das Aufheizverhalten gezogen. In Abb. 5-10 ist beispielhaft ein Aufheizvorgang des Testraums von 17°C auf 22°C dargestellt. Im linken Teil der Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Operativtemperatur im Innenraum dargestellt. Im rechten Teil ist die für den links dargestellten Aufheizvorgang benötigte Heizenergie für die verschiedenen Dämmvarianten zu sehen. Darunter sind die Ergebnisse für die Aufheizdauer und die benötigte Heizenergie bis zum Erreichen der gewünschten Operativtemperatur (22°C) noch einmal in Tab. 5-2 zusammengefasst.

Gegenüber dem ungedämmten Fall zeigen alle gedämmten Varianten deutliches Energiesparpotential und ein besseres Aufheizverhalten. Im instationären Beispiel in Abb. 5-10 kann gegenüber dem ungedämmten Fall (4h Aufheizzeit bei über 5kWh benötigter Heizenergie bis zum Erreichen der gewünschten Operativtemperatur von 22°C) bereits mit einer Innendämmung von 2cm die Aufheizzeit auf rund 2h verkürzt und die Heizenergiemenge auf 3kWh abgesenkt werden. Ab der Dämmstoffdicke von 4cm beginnen die zusätzlichen Energieeinsparungen bzw. die zusätzliche Verbesserung der Aufheizzeit mit zunehmender Dämmstoffdicke deutlich geringer zu werden. Ab einer Dämmstoffdicke von 8cm sind die positiven Effekte von zusätzlicher Dämmung so gering, dass sie als kaum noch relevant eingestuft werden können. Durch zusätzliche low-E-Beschichtungen konnten kaum oder keine Verbesserungen des Energiesparpotentials oder der thermischen Behaglichkeit gegenüber der Variante derselben Dämmstoffdicke ohne low-E-Beschichtung erzielt werden. Low-E-Beschichtungen werden somit als weniger relevanter Parameter eingestuft.

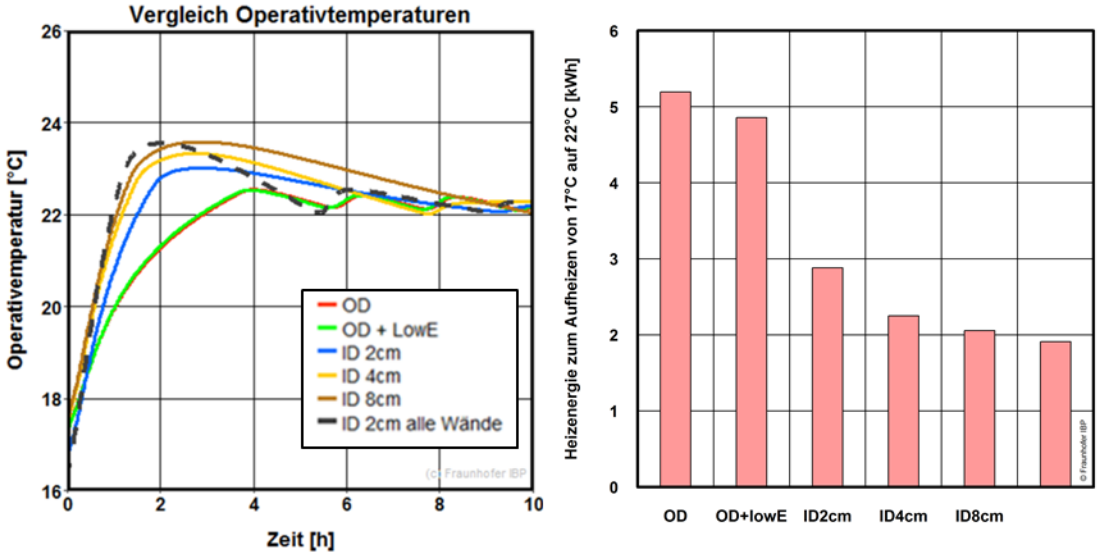


Abb. 5-10: Grafische Darstellung von Energiesparpotential und Aufheizverhalten verschiedener Dämmvarianten bei einem Aufheizvorgang von 17°C auf 22°C.

Tab. 5-2: Tabellarische Darstellung von Energiesparpotential und Aufheizverhalten verschiedener Dämmvarianten bei einem Aufheizvorgang von 17°C auf 22°C.

Variante	OD	OD + LowE	ID2cm (AW)	ID4cm (AW)	ID8cm (AW)	ID2cm (AW+IW)
Dauer [min]	177	173	92	72	65	60
Heizenergie [kWh]	5,19	4,86	2,88	2,25	2,06	1,91

Insbesondere für die instationären Fälle erwies sich eine zusätzliche Innendämmung der Innenwände (Dicke 2cm) als effektiv, da hier am wenigsten thermische Masse aufgeheizt werden muss. Während des abgebildeten Aufheizvorganges ist zu erkennen, dass die Variante mit 2cm Innendämmung auf allen vier Wänden sowohl bei der Aufheizzeit als auch beim Energieverbrauch leicht verbesserte Ergebnisse erzielt, als die Variante mit 8cm Innendämmung nur auf den Außenwänden. An dieser Stelle soll allerdings noch einmal erwähnt werden, dass dieser Effekt nur bei instationärer Beheizung während des Aufheizvorgangs auftritt. Im hier nicht dargestellten stationären Betrieb erzielt die Variante mit höherer Dämmstoffdicke auf den Außenwänden höheres energetisches Einsparpotential. Zusammenfassend können folgende Aussagen über die Relevanz der verschiedenen untersuchten Parameter gemacht werden: Eine Dämmstoffdicke von 4cm auf den Außenwänden wird als am besten repräsentativ eingeschätzt. Hier tritt eine deutliche Verbesserung gegenüber der ungedämmten Fall auf. Außerdem beginnen die zusätzlichen positiven Effekte von höherer Dämmstoffdicke oberhalb von 4cm deutlich abzunehmen. Low-E-Beschichtungen erwiesen sich in den Vorsimulationen als wenig effektiv und werden daher als weniger relevanter Parameter eingestuft. Eine zusätzliche Innendämmung von 2cm auf den Innenwänden wird hingegen insbesondere im Hinblick auf den intermittierenden Betrieb als

relevant eingestuft. Daraus ergab sich die folgende Wahl der Dämmvarianten für die messtechnische Erfassung:

- Ungedämmter Ausgangszustand als Referenzfall („Nullversuch“)
- Dämmvariante nur mit 4cm Innendämmung auf Außenwänden
- Dämmvariante mit 4cm Innendämmung sowohl auf den Außen- als auch auf den Innenwänden

5.2.2 Wahl der Heizsysteme

Der „Testraum für Innendämmungen“ verfügt über drei Beheizungsmöglichkeiten, nämlich Fußbodenheizung, Wandheizung oder Beheizung durch Heizkörper (Radiator/Konvektor). Nach Auswertung der Vorsimulationen wird die Vermutung angestellt, dass sich die Flächenheizsysteme (Wand und Fußboden) besser für die Validierung der neuen Software (Strahlungsmodell und detaillierte Anlagentechnik) eignen. Hier findet die Wärmeübertragung hauptsächlich durch Strahlung und weniger durch Konvektion statt, was eine bessere Abbildung der Oberflächentemperaturen im Raum möglich macht. Bei den Heizkörpern (Konvektor/Radiator) hingegen wird mehr Wärme durch Konvektion übertragen als bei den Flächenheizsystemen. Da in WUFI® Plus die genauere Abbildung von Konvektionsprozessen noch Bestandteil der Forschung ist, werden die Heizkörper als eher ungeeignet für die Validierungsversuche eingeschätzt.

Für die Betrachtungen hinsichtlich des Energiesparpotentials und der thermischen Behaglichkeit hingegen wird den Heizkörpern eine höhere Bedeutung zugeordnet. Die Vorsimulationen zeigen leicht verbesserte Energieverbräuche der Heizköper gegenüber den Flächenheizsystemen. Der Grund dafür wird in der Tatsache vermutet, dass bei den Flächenheizsystemen im WUFI® Plus Modell stets ein Teil der Wärme nach außen „verloren geht“ (bei der Fußbodenheizung an den Boden und bei der Wandheizung an die Außenluft). Beim Modell des Radiators hingegen wird die gesamte Heizenergiemenge direkt und ohne Verluste an die zu beheizende Zone abgegeben, was den besseren Energieverbrauch erklären kann. Weitere messtechnische Vergleiche werden als sinnvoll erachtet, weshalb alle drei möglichen Heizsysteme in den Messungen in Betracht gezogen werden sollen.

5.2.3 Wahl der Betriebsmodi

Für die verschiedenen in Kapitel 5.2.1 gewählten Dämmvarianten wurden folgende Profile für den Betriebsmodus entwickelt:

- **Kontinuierlicher Versuch**: Eine konstante Raumlufttemperatur von 26°C wird über den Zeitraum von 2 Tagen gehalten. Die hohe Raumlufttemperatur wird gewählt, da Voruntersuchungen zeigen, dass hier die Unterschiede in der Strahlungstemperatur auf den Wänden höher ausfallen, als bei geringeren Temperaturen. Dies macht die hohe Raumlufttemperatur gut geeignet für die Modellvalidierung.

- **Variierende Heiztemperaturen**: Um auch für den Wohnbereich realistischere Temperaturen in den Messungen abzudecken, wird die in Abb. 5-11 oben dargestellte Temperaturtreppe im Versuch „Variierende Heiztemperaturen“ nachgebildet. Dabei wird der Testraum ausgehend von 14°C jeweils für einen Tag auf 18°C, 20°C, 22°C und 24°C aufgeheizt.
- **Variierende Abkühlzeiten**: In diesem Versuch wird das in Abb. 5-11 unten dargestellte Temperaturprofil abgebildet. Hierbei wird, ausgehend von dem auf 22°C beheizten Raum (wird als übliche Wohnraumtemperatur eingeschätzt) das Heizsystem für variierend lange Zeiträume (12h, 8h, 4h, 2h, 1h) abgestellt, sodass der Raum auskühlt. Danach wird er wieder auf den Ausgangszustand von 22°C aufgeheizt. Dieses Profil soll einen ersten Ansatz dafür bieten, den intermittierenden Gebäudebetrieb nachzuempfinden.

Die drei Versuche sollen mit den drei oben genannten Dämmvarianten und nach Möglichkeit auch den drei unterschiedlichen Heizsystemen durchgeführt werden, sodass eine umfassende Datengrundlage gewonnen wird. Die o.g. Versuche sollen hauptsächlich der Validierung der neu in WUFI® Plus implementierten Modelle dienen, aber auch erste Vergleiche und Potentiale hinsichtlich Energiesparpotential und thermische Behaglichkeit möglich machen.

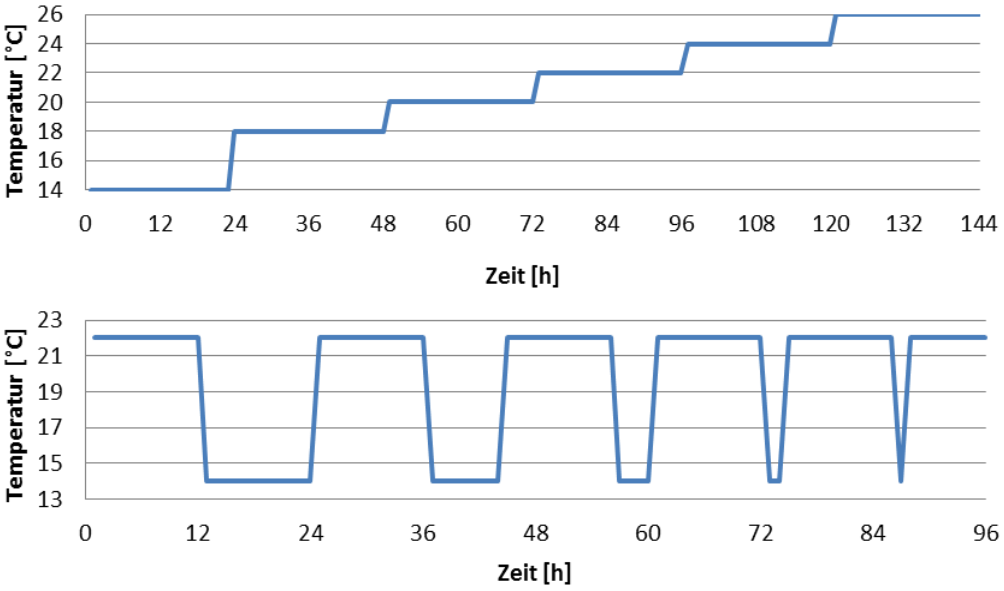


Abb. 5-11: Temperaturprofile der Validierungsversuche „variierende Heiztemperaturen“ (links) und „variierende Abkühlzeiten“ (rechts).

Der Fokus der hier beschriebenen Untersuchungen liegt auf den Potentialen von Innendämmsystemen im intermittierenden Betrieb. Aus diesem Grund wird zusätzlich zu den soeben beschriebenen drei Versuchsprofilen ein weiterer Versuch durchgeführt, der gezielt diese Fragestellung näher beleuchten soll. Dieser wird in der Dämmvariante und mit dem Heizsystem durchgeführt, die nach den Vorsimulationen vermuten lassen, das größte Energiesparpotential zu haben. Dabei handelt es sich um eine Beheizung mit Radiator in Verbindung mit dem an allen vier Wänden innengedämmten Versuchsraum.

Die Versuchsprofile werden so angelegt, dass sie die Unterschiede zwischen kontinuierlicher Beheizung und Beheizung nur bei Anwesenheit eines Nutzers möglichst realitätsnah aufzeigen. Dafür wird der Testraum für jeweils 2 Tage nach den in Abb. 5-12 dargestellten „realen“ Profilen beheizt.

Profil 1 (Abb. 5-12 oben) entspricht einer herkömmlichen, kontinuierlichen Beheizung auf eine Temperatur von 21°C. Diese Zieltemperatur wird für Wintermonate als üblich für viele Wohnräume eingeschätzt. Der kontinuierliche Fall soll als Referenzwert für die anderen beiden Versuchsprofile dienen. Das zweite Versuchsprofil (Abb. 5-12 Mitte) soll die Beheizung nur bei Anwesenheit in einem Raum darstellen, dessen Belegungsprofil von längeren Aufenthaltszeiten eines Nutzers pro Tag geprägt ist. Als Beispiel für solche Räume können ein Schlafzimmer oder ein werktags genutztes Büro angesehen werden. Profil 3 (Abb. 5-12 unten) auf der anderen Seite stellt einen Raum dar, dessen Belegungsprofil von mehreren, kürzeren „Peaks“ pro Tag geprägt ist (z.B. Küche, Badzimmer) und der ebenfalls nur bei Anwesenheit beheizt wird. Beide „intermittierenden“ Profile sollen dem Referenzfall entsprechend bis zu einer Zieltemperatur von 21°C aufgeheizt werden.

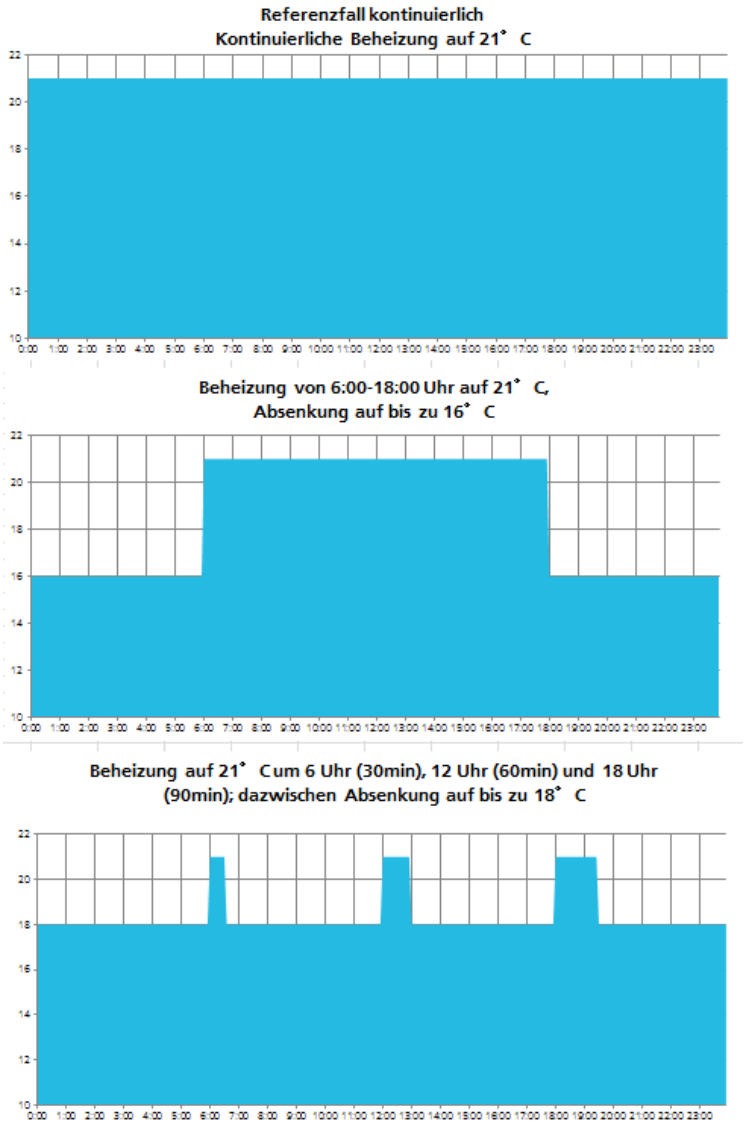


Abb. 5-12: „Reale“ Nutzungsszenarien für die Potentialabschätzung bei intermittierender Beheizung

5.3 Messtechnische Erfassung des Energieeinsparpotentials bei innen gedämmten Gebäuden mit intermittierendem Betrieb

5.3.1 Experimentelles Design – Versuchstraum für Innendämmungen

Das Fraunhofer IBP verfügt an seinem Standort in Stuttgart über einen Klimasimulator mit den Maßen 7,0 x 6,0 x 5,8 m (L x B x H), dessen Temperatur im Bereich von minus 15 °C bis plus 55 °C geregelt werden kann. Innerhalb dieser Klimakammer wurde ein Versuchsraum für Innendämmungen errichtet, der im Folgenden genauer beschrieben wird.

Der große Klimasimulator wurde für die durchzuführenden Versuche konstant auf 0 °C konditioniert. Innerhalb dieser Kammer wurde ein Testraum mit den Maßen 4,38 x 3,87 x 2,7 m (L x B x H) errichtet. Der Testraum verfügt über zwei ‚Außenwände’ (AW1 und AW2), auf

welche die 0 °C des großen Klimasimulators einwirken. Die anderen zwei Wände des Testraumes (IW1 und IW2) können mithilfe von Heizmatten, welche die Oberflächentemperatur außen auf ca. 20 °C anheben, als Innenwände zu angrenzenden, beheizten Räumen betrachtet werden. In der kleineren der beiden Innenwände (IW1) befindet sich der Eingang in den Testraum. Ein horizontaler Schnitt durch den Testraum inklusive der Innen- und Außenmaße, den Wandbezeichnungen und der Lage der Tür kann Abb. 5-13 entnommen werden. Weitere Ansichten der einzelnen Wände sowie von Decke und Boden können Anhang A.5.1entnommen werden.

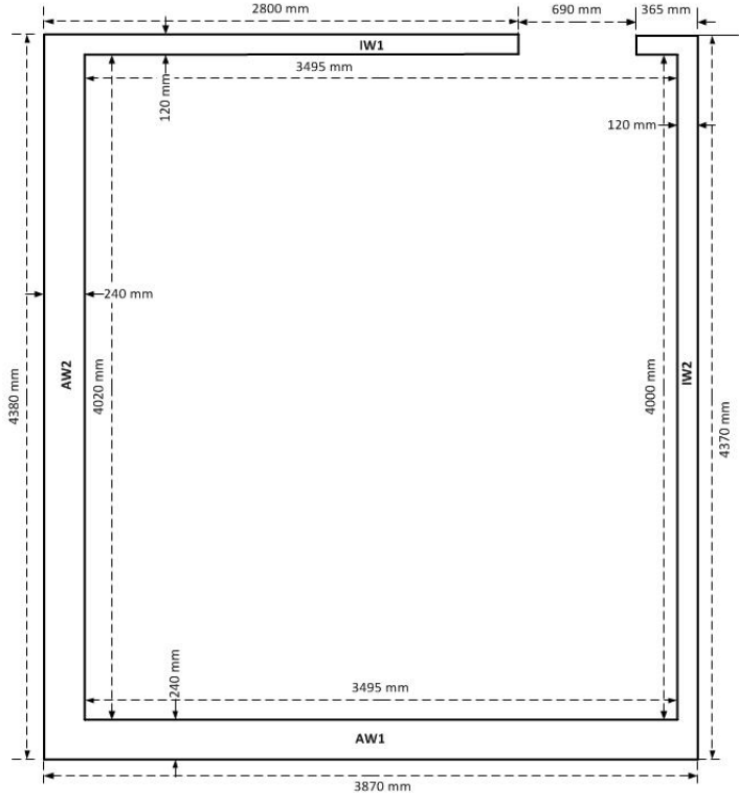


Abb. 5-13: Außenansicht des großen Klimasimulators in Stuttgart.

Die in Tab. 5-3 beschriebenen Bauteile werden an jeweils neun Messpositionen beobachtet. Exemplarisch für alle Wände ist die Innenansicht von Außenwand 1 in Abb. 5-14 zu sehen. Von den neun Messstellen werden im Folgenden die fünf Hauptmessstellen der Wände betrachtet. Diese sind wie folgt angeordnet (mit Blick aus dem Inneren des Messraums auf die jeweilige Wand):

- 1A: unten links
- 1E: unten rechts
- 3C:Mitte Mitte
- 5A:oben links
- 5E: oben rechts

Die Messpunkte in den Ecken (1A, 1E, 5A, 5E) sind jeweils etwa um 10 cm von der Innenkante der Wände bzw. der Decke zur Mitte hin verschoben. Der Abstand vom Fußboden zu Ebene 1 beträgt 15 cm. Die genauen Positionen der Messpunkte auf allen Wänden und auch von Fußboden und Decke können Anhang A.5.1 entnommen werden.

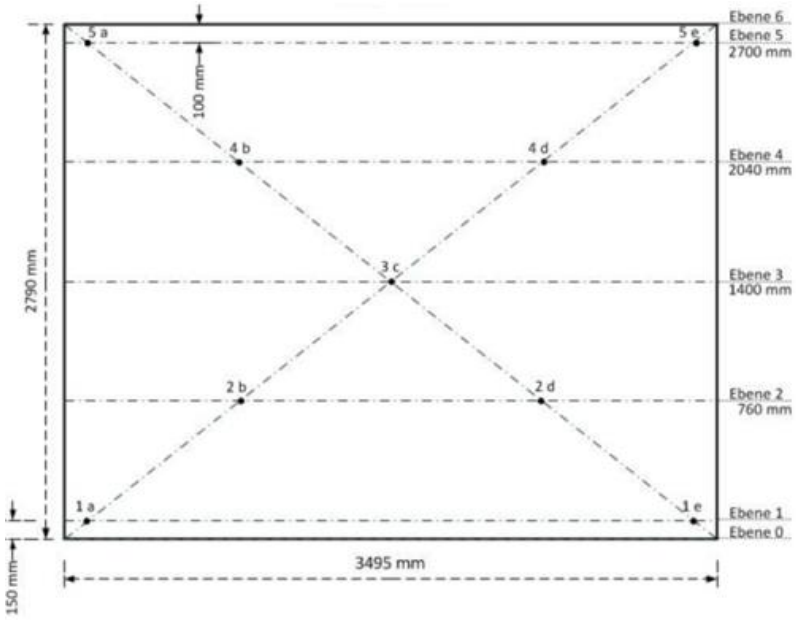


Abb. 5-14: Innenansicht von AW1 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen.

Es sind vier Sensortypen im Messraum verbaut: Temperatursensoren (außen insgesamt 60, innen insgesamt 107), Wärmestrom-Sensoren (insgesamt 12), Mayer-Sensoren zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten (insgesamt 20) sowie zwei Feuchtesensoren zur Bestimmung der relativen Feuchte innen und außen (genaueres siehe Tab. 5-4). Aus den einzelnen Messwerten können mittlere Oberflächentemperaturen für die verschiedenen Bauteile, mittlere Lufttemperaturen und Wärmestrommessungen sowie die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten berechnet werden.

Tab. 5-3: Beschreibung der Bauteilaufbauten im Messraum.

Bauteil	Beschreibung
Außenwände	Die beiden Außenwände haben im ungedämmten Zustand eine Dicke von 0,24 m. Sie bestehen aus drei Gips-Wandbauplatten (λ = 0,316) mit einer jeweiligen Dicke von 0,08 m. Daraus resultiert ein U-Wert von 1,076 W/m²K.
Innenwände	Die Innenwände bestehen aus zwei Gips-Wandbauplatte. Sie haben eine Dicke von 0,06 m und einen U-Wert von 1,561 W/m².
Decke	Die Decke des Testraums besteht aus zwei übereinander angeordneten XPS Hartschaumplatten (λ = 0,032) mit einer Dicke von je 0,04 m. Die untere Platte ist durchgängig, die obere wird alle 0,6 m von Holz-balken unterbrochen, auf denen eine Holzplatte aufliegt. Diese dient der sicheren Begehung der Decke. Der mittlere U-Wert der Decke liegt bei rund 0,38 W/m²K.
Boden	Im Boden ist eine Fußbodenheizung verlegt, deren Aufbau Kapitel 5.3.1 entnommen werden kann.

Tab. 5-4: Zusammenfassung der Messkanäle des Testraums.

Art	Positionen	#
Temperatursensoren außen [°C]		**60**
Oberflächentemperaturen	Alle 9 Messpositionen an IW1, IW2, AW1, AW2, Decke	**45**
Lufttemperaturen	Ebene 1-5 mittig (Position C) vor IW2, AW1, AW2	**15**
Temperatursensoren innen [°C]		**107**
Oberflächentemperaturen	Alle Messpositionen IW1, IW2, AW1, AW2, Fußboden, Decke Für jeden der drei Messwürfel jeweils alle sechs Seiten	**54** **18**
Lufttemperaturen	Jeweils für Ebene 1-5: Ecke IW1 und IW2, Raummitte, Ecke AW1 und AW2	**15**
Temperaturen in Bauteilschichten	IW1 und IW2 in Höhe von Ebene 3 und Tiefe von 30, 60 und 90 mm AW1 und AW2 in Höhe von Ebene 3 und Tiefe von 30, 90, 150, 210 mm Fußboden in Raummitte in Tiefe von 20, 40 und 60 mm Decke in Raummitte in Tiefe von 20, 35 und 50 mm	**6** **8** **3** **3**
Wärmestrom-Messungen [W/m²]		**12**
Wärmestrom	IW2, Positionen 1A, 1E, 3C, 5A, 5E AW1, Positionen 1A, 1E, 3C, 5A, 5E Fußboden und Decke, jeweils Position 3C	**5** **5** **2**
Mayer-Sensoren [V] zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten		**20**
Thermospannung	IW2, AW1 und AW2 jeweils an Position 1A, 1E, 3C, 5A, 5E Messwürfel Raummitte an fünf Seiten (alles außer Seite zu IW1)	**15** **5**
Feuchtesensoren [%]		**2**
Relative Feuchte	Luft außen Ebene 3 mittig (Position C) vor AW2 Luft innen in Raummitte	**1** **1**

In der Raummitte, in der Ecke zwischen IW1 und IW2 sowie in der Ecke zwischen AW1 und AW2 sind jeweils sogenannte Messwürfel angebracht, an denen u. a. Oberflächentemperaturen gemessen werden. Für die Messung wurde ein Zeitintervall von einer Minute gewählt. Im

Messraum sind acht Heizregister vorhanden (4x Innenseite der Wände, 2x Außenseite der Innenwände, 1x Fußboden, 1x Heizkörper). Die Decke ist nicht beheizbar. Somit lassen sich die gewünschten Raumlufttemperaturen über die Beheizung mit Heizkörper, Fußbodenheizung oder Wandheizung einstellen. Die beiden Innenwände werden auf der Außenseite über Heizmatten durch zwei weitere Heizregister auf möglichst konstant 20 °C konditioniert. Tab. 5-5 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche.

Tab. 5-5: Zeitplan der durchgeführten Versuche.

Zeitraum	Heizsystem	Betriebsmodus	Bemkerung
Dämmvariante 1: Ungedämmter Ausganszustand (18.03.2017 bis 15.06.2017)			
27.03.2017 bis 02.04.2017	Radiator	Kontinuierlicher Betrieb 26°C	Regelung auf Raumlufttemperatur
06.04.0217 bis 12.04.2017	Radiator	Variierende Heiztemperaturen	Regelung auf Raumlufttemperatur
18.04.2017 bis 23.03.2017	Radiator	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Raumlufttemperatur
13.05.2017 bis 18.05.201z	Fußbodenheizung	Variierende Heiztemperaturen	Regelung auf Oberflächentemperatur
19.05.2017 bis 22.05.2017	Fußbodenheizung	Kontinuierlicher Betrieb 26°C	Regelung auf Oberflächentemperatur
09.06.2017 bis 14.06.2017	Fußbodenheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Oberflächentemperatur
Dämmvariante 2: Innendämmung Außenwände 4cm EPS (03.07.2017 bis 18.07.2017)			
20.07.2017 bis 24.07.2017	Wandheizung	Variierende Heiztemperaturen	Regelung auf Wandtemperatur
24.07.2017 bis 26.07.2017	Wandheizung	Kontinuierlicher Betrieb 26°C	Regelung auf Wandtemperatur
26.07.2017 bis 29.07.2017	Wandheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Wandtemperatur
30.07.2017 bis 02.08.2017	Fußbodenheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Raumlufttemperatur
02.08.2017 bis 05.08.2017	Fußbodenheizung	Variierende Heiztemperaturen	Regelung auf Raumlufttemperatur
06.08.2017 bis 08.08.2017	Fußbodenheizung	kontinuierlicher Betrieb 26 °C	Regelung auf Raumlufttemperatur
08.08.2017 bis 12.08.2017	Fußbodenheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Oberflächentemperatur
25.08.2017 bis 28.08.2017	Fußbodenheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Raumlufttemperatur
28.08.2017 bis 01.09.2017	Wandheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Oberflächentemperatur

Dämmvariante 3: Innendämmung der Außenwände 4cm EPS und Innendämmung der Innenwände 2cm EPS (08.09.2017 bis 7.10.2017)			
10.09.2017 bis 13.09.2017	Wandheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Raumlufttemperatur
19.09.2017 bis 16.09.2017	Fußbodenheizung	Variierende Abkühlzeiten	Regelung auf Raumlufttemperatur
18.09.2017 bis 21.09.2017	Fußbodenheizung	Variierende Heiztemperaturen	Regelung auf Raumlufttemperatur
21.09.2017 bis 23.09.2017	Fußbodenheizung	kontinuierlicher Betrieb 26 °C	Regelung auf Raumlufttemperatur
01.10.2017 bis 05.10.2017	Wandheizung	Variierende Heiztemperaturen	Regelung auf Raumlufttemperatur
05.10..2017 bis 06.10.2017	Wandheizung	kontinuierlicher Betrieb 26 °C	Regelung auf Raumlufttemperatur
„Reale“ Nutzungsszenarien (08.12.2017 bis 20.12.2017)			
09.12.2017 bis 11.12.2017	Radiator	06:00-18:00 heizen auf 21 °C; 18:00-06:00 Absenkung auf 16 °C	
11.12.2017 bis 14.12.2017	Radiator	06:00-06:30 & 12:00-13:00 & 18:00-19:30 heizen auf 21 °C; Absenkung in den Pausenzeiten auf 18 °C	
14.12.2017 bis 16.12.2017	Radiator	Kontinuierliche Beheizung 21°C	

5.3.2 Modellbeschreibung WUFI® Plus

Wufi® ist eine Software-Familie des Fraunhofer Instituts für Bauphysik. Der Name steht für ‚Wärme und Feuchte instationär'. Mit Hilfe der Software können realitätsnahe und instationäre Berechnungen zum gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransport in mehrschichten Bauteilen durchgeführt werden. Das wohl umfangreichste Mitglied der WUFI® Familie stellt WUFI® Plus dar. Neben den hygrothermischen Bedingungen in verschiedenen Bauteilen wird hier auch das Raumklima simuliert. Damit eignet sich WUFI® Plus auch zu Betrachtungen hinsichtlich Komfort und Energiebedarf (Antretter et al. 2017).

Der oben beschriebene Versuchsraum für Innendämmungen wurde mit einer Testversion von WUFI® Plus 3.1 so genau wie möglich nachgebildet (Abmessungen, Bauteilaufbauten, Messpositionen etc., siehe Abb. 5-15). Die Testversion enthält die bisher noch nicht vollständig validierten Modelle zum langwelligen Strahlungsaustausch innen und zu bauteilintegrierten Heizungssystemen. Die Richtigkeit dieser Modelle soll verifiziert werden, indem Messdaten aus den „Validierungsversuchen“ mit WUFI® Plus Simulationsergebnissen verglichen werden. Einige relevante Eingangsparameter, die für alle nachfolgenden Simulationen übereinstimmen, sind in Tab. 5-6 zusammengefasst. Die thermischen Eigenschaften, insbesondere die der Gips-Wandbauplatten und des XPS-Dämmstoffes, waren gegeben. Die hygrischen Eigenschaften der Baustoffe mussten allerdings zum Teil mit Hilfe der WUFI® Plus Datenbank anhand ähnlicher Materialen abgeschätzt werden.

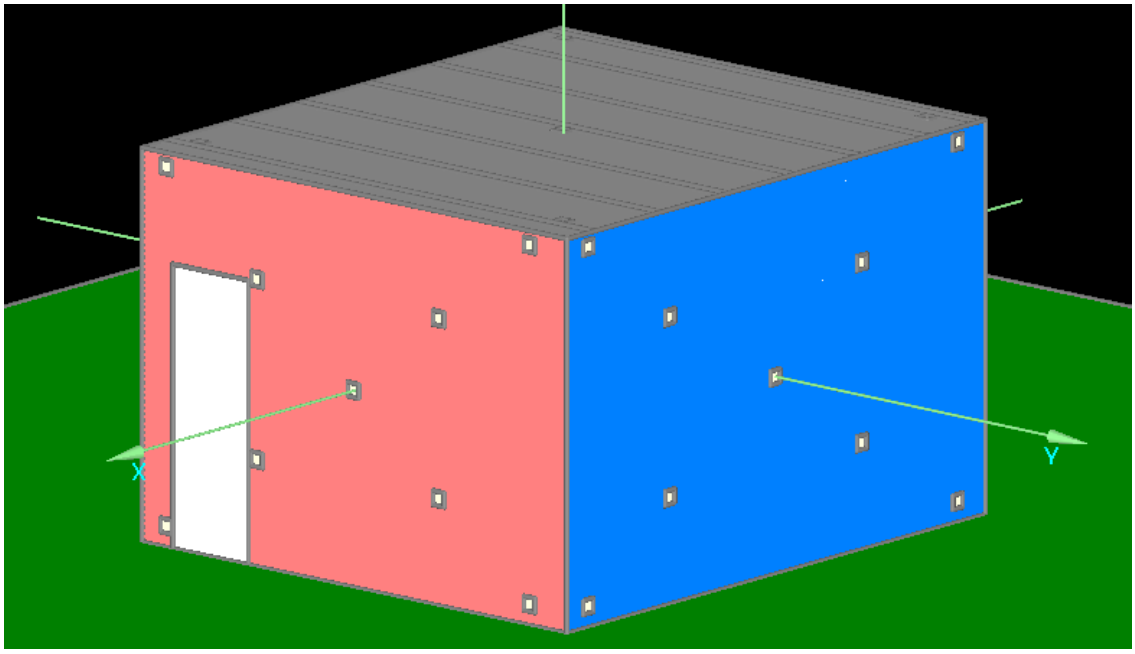


Abb. 5-15: Basismodell Versuchsraum für Innendämmungen in WUFI® Plus 3.1

Tab. 5-6: Zusammenfassung einiger wichtiger Eingangsparameter für die Simulationen in WUFI® Plus

Bauteil	Beschreibung
Berechnungsmodus	Hygrothermisch
Maximaler Zeitschritt	1 Minute
Rechengenauigkeit	Mittel
Außenklima	Lufttemperatur 0 °C, relative Feuchte 50 %, keine Solarstrahlung
Oberflächentemperaturen außen	Genaue Übernahme der Messwerte an den jeweiligen Messpositionen an allen vier Wänden und der Decke
Wärmebrücken	Nicht berücksichtigt
Interne Lasten/ Belegung	Nicht berücksichtigt
Luftwechsel	Konstant 0,0 h^{-1} (sehr gute Abdichtung des Testraumes)

5.3.3 Limitationen beim Vergleich von WUFI® Plus Modell und Messungen

Für die Validierung der zwei neuen Modelle in WUFI® Plus ist es notwendig, gemessene Raumluft- bzw. Oberflächentemperaturen mit simulierten Werten zu vergleichen. Hierbei gelten folgende Einschränkungen und Annahmen:

- In WUFI® Plus wird von vollständig durchmischter Raumluft ausgegangen, d. h. die Lufttemperatur bleibt (unabhängig von der Art der Beheizung) über den gesamten Raum hinweg homogen. Sie entspricht an jedem Ort der Temperatur im Raummittelpunkt. In der Realität zeigt sich, dass die Messergebnisse der Raumlufttemperatur an verschiedenen Positionen innerhalb einer Zone erheblich

voneinander abweichen. Diese Unterschiede in der Lufttemperatur müssen in der Simulation vernachlässigt werden.

- Wärmebrückeneffekte können in der herkömmlichen Simulation in WUFI® Plus nicht berücksichtigt werden. Es muss allerdings angenommen werden, dass sie vor allem im ungedämmten Fall im Bereich der Außenecken einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur haben. Der Umgang mit Wärmebrücken wird daher in Kapitel 5.3.5.1 beim Vorgehen zur Validierung des Modells zum langwelligen Strahlungsaustausch genauer beschrieben.
- Flächenheizsysteme in WUFI® Plus temperieren das gesamte Bauteil auf eine konstante Temperatur. In den realen Aufbauten konnten sich jedoch erhebliche Temperaturunterschiede innerhalb der Flächenheizsysteme einstellen. Dies war vor allem in Randbereichen und in der Nähe der Tür der Fall, wo die verlegten elektrischen Heizdrähte nicht genügend Wärme abgeben konnten. So ergab z. B. die Temperierung einer Wand als Innenwand (Sollwert von 20 °C) eine Temperaturverteilung von rund 16 °C am kältesten bis hin zu 28 °C am wärmsten Punkt. Solche Temperaturverteilungen innerhalb von Flächenheizsystemen können in der Simulation nicht berücksichtigt werden.

5.3.4 Validierung des Modells zu bauteilintegrierten Heizsystemen

Um bauteilintegrierte Heizungssysteme wie Fußboden- oder Wandheizungen darstellen zu können, wurde WUFI® Plus um ein Modell für elektrische TABS (Thermo-Aktive-Bauteil-Systeme) ergänzt. Dabei wird eine bestimmte Nennleistung an Heizenergie [kW] an eine bestimmte Ebene eines bestimmten Bauteiles übergeben, sodass diese zum Heizen des Raumes genutzt werden kann.

Das neue Modell wurde anhand von zwei Flächenheizsystemen (Wand- und Fußbodenheizung) für den beschriebenen Testraum validiert. Hierbei wurden sowohl im stationären Betrieb (ca. 26 °C Raumlufttemperatur) als auch im instationären Betrieb (22 °C Raumlufttemperatur mit verschieden langen, unbeheizten Zeitintervallen) folgende Ergebnisse verglichen:

- **Messergebnisse** aus dem Testraum für den Verlauf der Raumlufttemperatur innen und die dafür benötigte elektrische Leistung [kW] zur Beheizung des Raumes.
- **Simulationsergebnisse mit TABS System**: WUFI® Plus soll als Zielwert möglichst den Verlauf der Raumlufttemperatur aus der Messung nachstellen. Die Nennleistung des TABS-Systems wurde so dimensioniert, dass sie dem maximal benötigten Messwert des Heizregisters im Testraum entspricht [kW]. Anschließend wurde verglichen, ob für die eingestellte Raumlufttemperatur dieselbe Heizenergie benötigt wird wie in den Messungen.
- **Simulationsergebnisse mit interner Wärmequelle:** In einer weiteren Simulation wurde das TABS System durch eine interne Wärmequelle in derselben Bauteilebene ersetzt. Dabei wurde genau dieselbe Menge an elektrischer Energie [W/m²] in das Bauteil geleitet, die in den Messungen benötigt wurde. Anschließend wurde

verglichen, ob der entstehende Temperaturverlauf im Raum mit dem der Messung und des TABS-Modells übereinstimmt.

Ziel war es, eine möglichst genaue Übereinstimmung für die benötigte Heizenergie und dem sich einstellenden Temperaturverlauf für alle drei Varianten zu erhalten.

5.3.4.1 Validierungsfall 1 – Ungedämmt mit Fußbodenheizung

Als erster Validierungsfall wurde der ungedämmte Versuchsraum (Wandaufbauten wie beschrieben in Tab. 5-3) mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Die Fußbodenheizung wurde oberhalb von XPS Platten verlegt, darüber folgen eine Perlitschüttung sowie Trockenestrichplatten (18 mm). An allen Rändern wurde ein unbeheizter Randdämmstreifen von 10 cm angebracht. Dieser soll dazu dienen, dass zu einem späteren Zeitpunkt noch Innendämmungen bzw. Wandheizungen eingebaut werden können. In WUFI® Plus wurde die Fußbodenheizung sowohl mit Hilfe eines TABS als auch mit einer internen Wärmequelle nachgestellt (Schichtaufbau siehe Tab. 5-7).



Abb. 5-16: Aufbau des Fußbodens mit Fertigteilestrich, Fußbodenheizung, Perlitschüttung, XPS-Platten und Randdämmstreifen

Tab. 5-7: Schichtaufbau des Fußbodens im WUFI® Plus Modell. Das TABS System bzw. die interne Wärmequelle werden in der Perlitschüttung angesetzt.

Material/Ebene	λ [W/mK]	d [m]
1. XPS Klimakammer	0,032	0,16
2. Perlitschüttung	1,3	0,002
3. Brio 18 Trockenestrich	0,3	0,018

Für diesen Validierungsfall wurden zwei Versuche durchgeführt: Der erste unter stationären Bedingungen (konstante Beheizung des Raums auf 26 °C, Fall 1A), der zweite unter instationären Bedingungen. Im zweiten Fall wird der Testraum für jeweils 10 h auf 22 °C

Betriebstemperatur beheizt, dazwischen wird die Fußbodenheizung für variierend lange Zeiten (12 h, 8 h, 4 h, 2 h, 1 h) abgestellt, sodass der Raum auskühlt (Fall 1B).

Die Ergebnisse für Validierungsfall 1A sind in Abb. 5-17 links zu sehen. In Grün dargestellt sind die ursprünglichen Messwerte, in Rot dargestellt die Ergebnisse der Simulation mit elektrischen TABS und in Blau die Simulation mit interner Wärmequelle. Für alle drei Fälle wurde über die Dauer des dreitägigen Versuchs eine Herzenergiemenge von 67,9 kWh aufgebracht. In beiden WUFI® Plus Modellen wurde als Sollwert für die Innenraumtemperatur der genaue Temperaturverlauf der Messungen angesetzt. Dieser schwankt zwischen rund 26,6 °C und 26,8 °C. Mit der gleichen Heizenergie ergab sich über die Dauer des Versuchs eine Innenraumtemperatur, die im Mittel etwas geringer war als der gemessene Wert (-0,04 K). Dieser Wert liegt innerhalb der Messungenauigkeit der Temperatursensoren (0,11 K), weshalb der Versuch als erfolgreich angesehen wird.

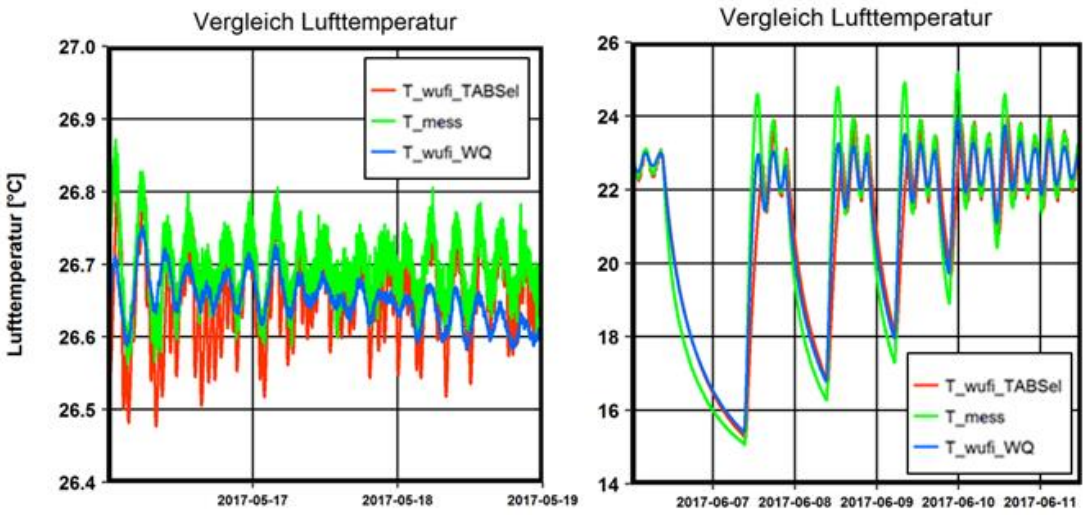


Abb. 5-17: 1A (links) und 1B (rechts).Vergleich der Lufttemperaturen von Messdaten (grün), elektrischem TABS System in Wufi® Plus(rot) und interner Wärmequelle in Wufi® Plus(blau) bei gleicher aufgebrachter Heizenergie.

Bei der genaueren Betrachtung der Kurven kann festgestellt werden, dass die Lufttemperatur mit elektrischem TABS schneller abzufallen scheint als bei den Messwerten. Dies kann auf den Heizregler zurückgeführt werden. Es kann in WUFI® Plus nur auf 0, 50 oder 100 % der maximalen Nennleistung des TABS (bei Versuch 1A 1,1 kW) geregelt werden. Wird der Sollwert für die Temperatur in einem Zeitschritt (1 Minute) vorübergehend erreicht, wird das TABS System für den nächsten Zeitschritt auf 0 % seiner Nennleistung geregelt, bis die Temperatur wieder unter den Sollwert fällt. Im realen Testraum kann zum Erreichen des Sollwerts die Nennleistung genauer geregelt werden, was den schnelleren Temperaturabfall nach Erreichen des Sollwerts in WUFI® Plus erklären kann. Beim Temperaturverlauf mit interner Wärmequelle ist zu erkennen, dass das Modell sich insgesamt etwas träger verhält, sich aber ebenfalls auf eine Temperatur zwischen 26,6 °C und 26,7 °C einpendelt.

Die Ergebnisse von Validierungsfall 1B im instationären Betrieb sind in Abb. 5-17 rechts zu sehen. In allen drei Versuchen wurde die gleiche Menge an Heizenergie benötigt, nämlich 68 kWh in rund fünf Tagen. Dem Verlauf der Temperaturregelung im Messraum kann der Simulationsfall mit TABS insbesondere während der Heizintervalle gut folgen. Die Spitzentemperaturen werden mit Ausnahme des ersten Peaks nach Einschalten der Heizung weitestgehend erreicht. Wie im stationären Fall verhält sich das Modell mit Wärmequelle etwas träger und die Temperaturspitzen fallen flacher aus. Mit Ausnahme der Peaks wird der Temperaturverlauf aber zufriedenstellend dargestellt.

Nach Abschalten der Heizung zeigt sich zunächst ein beinahe identischer Temperaturabfall in allen drei Fällen. Unterhalb einer Raumtemperatur von 20 °C ist jedoch zu erkennen, dass beide Modelle etwas langsamer auskühlen als der Messraum. Es wird vermutet, dass dies mit der unzureichenden Darstellung instationärer Konvektionsvorgänge zusammenhängt. Zusätzlich ist der Vergleichswert der gemessenen Raumlufttemperatur lediglich ein Mittelwert aus Temperatursensoren, die sich in der Mitte und in zwei Ecken des Messraumes auf jeweils verschiedenen Höhen befinden. Wie bereits erwähnt kommt es in der Realität zu einer Temperaturverteilung im Raum. Beispielsweise kühlt die Luft nach Ausschalten der Fußbodenheizung in Fußbodennähe schneller und weiter ab als in Deckennähe.

Nach zwölf Stunden Abkühlzeit betrug der Lufttemperaturunterschied zwischen oberster und unterster Messebene bereits über 1 K. In WUFI® Plus wird hingegen von vollkommen durchmischter Luft ausgegangen, sodass solche Effekte nicht dargestellt werden können. Dies kann ebenfalls die geringen Abweichungen im Abkühlverhalten erklären. Da die Abweichungen sich im Bereich der Messungenauigkeit der Temperatursensoren bewegen wird auch Validierungsfall 1B als erfolgreich betrachtet.

5.3.4.2 Validierungsfall 2 – Innendämmung 4cm und Wandheizung

Für den zweiten Validierungsfall wurden die in Tab. 5-3 beschriebenen Außenwände sowohl mit einer Innendämmung als auch mit Wandheizungssystemen ausgestattet. Für die Innendämmung wurden 40 mm dicke EPS-WDV Dämmplätten (λ = 0,035) auf den Außenwänden verklebt. Auf der Dämmung wurde eine elektrische Wandheizung verlegt und anschließend verkleidet. Auch die Wandheizungen werden mithilfe von zwei TABS Systemen abgebildet. Für diesen Validierungsfall wurde dasselbe instationäre Temperaturprofil angesetzt wie für Validierungsfall 1B. Das Vorgehen entspricht dem von Validierungsfall 1.

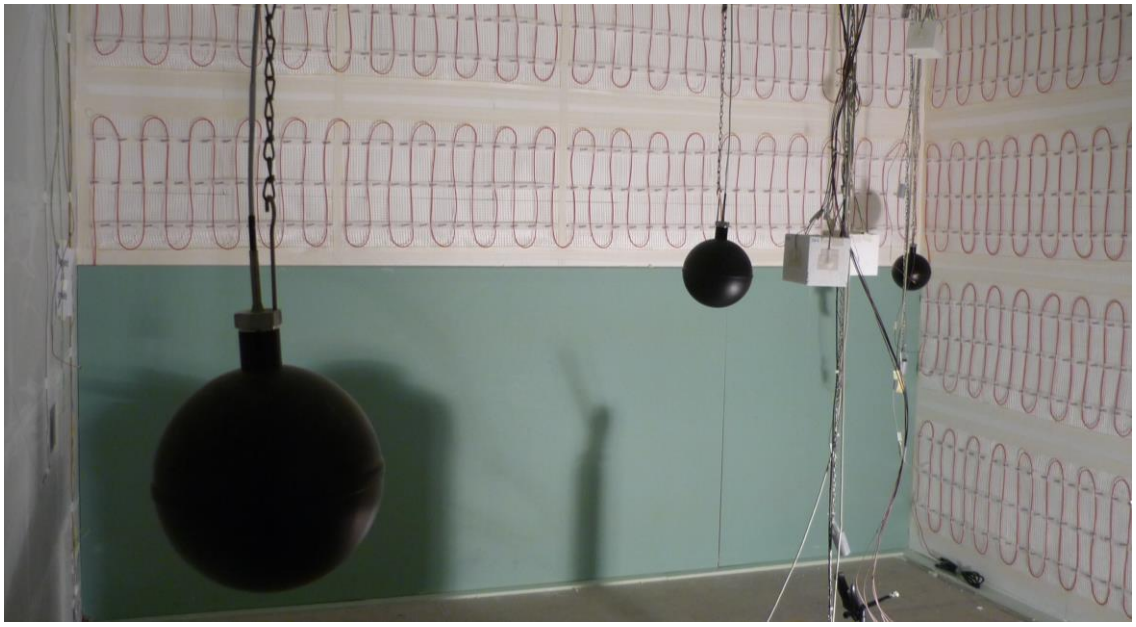


Abb. 5-18: Aufbau der Wandheizung mit 40mm EPS-Platten, Wandheizung und Verkleidung.

Für die Gesamtdauer des Versuchs wurde in allen drei Fällen eine Heizenergie von rund 29,7 kWh aufgebracht. Der Vergleich der Lufttemperaturverläufe kann Abb. 5-19 entnommen werden (Messergebnisse grün, WUFI® Plus elektrisches TABS System rot und WUFI® Plus interne Wärmequelle blau). Sowohl in den beheizten Phasen als auch während der Abkühlung stimmen die drei Kurven gut überein. Die Abweichungen liegen zum Großteil im Bereich der Messungenauigkeit der Temperatursensoren. Daher wird der zweite Validierungsfall ebenfalls als erfolgreich betrachtet. Wie in Validierungsfall 1B kann auch in Validierungsfall 2 festgestellt werden, dass die Abkühlung im Bereich unter 20 °C Lufttemperatur in beiden WUFI® Plus Modellen langsamer vonstattengeht als in den Messungen. An dieser Stelle soll auf die gleichen Probleme verwiesen werden, die bereits für Validierungsfall 1B erwähnt wurden: Die Unterschiede im Auskühlverhalten können vermutlich darauf zurückgeführt werden, dass die Darstellung der instationären Konvektionsvorgänge nicht ausreichend ist und in WUFI® Plus von vollständig durchmischter Raumluft ausgegangen wird. In der Realität kommt es dagegen zu sowohl horizontalen als auch vertikalen Temperaturschichtungen.

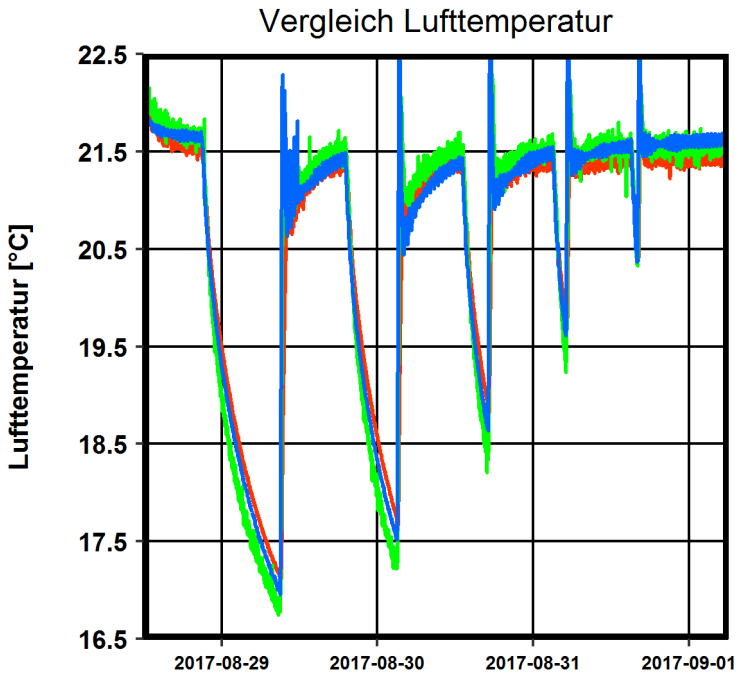


Abb. 5-19: Validierungsfall 2 - Vergleich der Lufttemperaturen von Messdaten (grün), elektrischem TABS System in WUFI® Plus (rot) und interner Wärmequelle in WUFI® Plus (blau) bei gleicher aufgebrachter Heizenergie.

5.3.5 Validierung des Modells zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen

Das Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch wurde wie in Kapitel 5.1.1 in WUFI® Plus implementiert und erste Validierungsschritte erfolgreich durchgeführt. Eine weitere Verifizierung des Modells soll nun durch den Vergleich von Messungen aus dem Klimasimulator und Simulationsergebnissen stattfinden. Hierbei gelten die unter 5.3.3 beschriebenen Einschränkungen, auf die im folgenden Kapitel genauer eingegangen wird.

Zum Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse wurden wiederum zwei Validierungsfälle betrachtet. Der erste Fall wurde im ungedämmten Testraum bei einer Beheizung mit Fußbodenheizung durchgeführt. Betrachtet wurden hierbei die Messpunkte auf Außenwand 1 (AW1). Der zweite Validierungsfall wurde mit einer 4 cm EPS-Dämmung auf den beiden Außenwänden durchgeführt. Hierbei wurde der Raum durch eine Wandheizung temperiert und die Messpunkte auf Innenwand 2 (IW2) betrachtet.

5.3.5.1 Vorgehen

Es wurden die Oberflächentemperaturen an fünf Punkten einer Wand miteinander verglichen. Diese Messpunkte haben die Bezeichnungen 1A (unten links), 1E (unten rechts), 3C (Mitte Mitte), 5A (oben links) und 5E (oben rechts). Aufgrund der Lage von vier Messpunkten in den Ecken der Wand kam es zu zwei wesentlichen Einschränkungen beim Vergleich von Mess- und Simulationsergebnissen. Erstens traten im Bereich der Ecken v.a. im ungedämmten Fall Wärmebrückeneffekte auf, die in WUFI® Plus nicht berücksichtigt werden. Zweitens wird in WUFI® Plus nur eine Temperatur in Raummitte berechnet und für den gesamten Raum

angenommen, während es in der Realität vor allem im instationären Betrieb zur deutlichen Temperaturschichtung kommen kann. Der Umgang mit diesen zwei Einschränkungen wird nun im Vorfeld kurz beschrieben.

Wärmebrückeneffekte

Wärmebrückeneffekte werden in der herkömmlichen WUFI® Plus Simulation nicht berücksichtigt. Sie können allerdings als sogenannte 3D-Objekte gesondert konstruiert und betrachtet werden. Allerdings ist es hier nur möglich, den Wärmeübergangswiderstand für Konvektion und Strahlung kombiniert zu definieren, sodass er konstant bei 0,13 m²K/W liegt. Folglich ist im Gegensatz zur gewöhnlichen Simulation auch eine Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung oder Konvektion nicht möglich. Das Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch innen oder instationäre Konvektionsvorgänge können für die 3D-Objekte nicht berücksichtigt werden.

Dennoch wurden die vier Ecken inklusive der Messpunkte der jeweils betrachteten Wand als 3D-Objekte entworfen und die daraus resultierenden Oberflächentemperaturen berechnet. Anschließend wurde für die verschiedenen stationären und instationären Bedingungen gegenübergestellt, wie hoch der prozentual zusätzliche Wärmeverlust an den Wärmebrücken verglichen mit der Oberflächentemperatur der ungestörten Wand ist. Um diesen prozentualen Wärmebrücken Korrekturfaktor f_{WB} wurde das Ergebnis der Simulation inkl. des langwelligen Strahlungsaustauschs beim Vergleich mit den Messdaten berichtigt. Hat die Simulation an der Außenwandecke in Deckennähe beispielweise ergeben, dass es im stationären Betrieb zu einem zusätzlichen Wärmeverlust von rund 3 % kommt, entspricht f_{WB} an dieser Stelle 0,97.

Lufttemperaturunterschiede

Die Berücksichtigung der Lufttemperaturunterschiede erfolgte über eine Anpassung des gemessenen h_c-Wertes. Das Vorgehen hierzu ist wie folgt:

- Durch die in den h_c-Sensoren verwendeten Thermoelemente ist es möglich, von der gemessenen Oberflächentemperatur und der Thermospannung [µV] auf die Raumlufttemperatur in 2 cm Abstand zum Sensor zurückzuschließen. Es ist für die verwendeten Thermoelemente bekannt, dass 1 µV einem Temperaturunterschied von 0,023 K entspricht. Somit gilt:

$$T_{ai,mess} = T_{si,mess} - (U(T_{si,mess} - T_{ai,mess}) * \frac{0{,}023K}{1\mu V}$$

- Mithilfe der gemessen Oberflächen- und Raumlufttemperaturen sowie dem konvektiven Wärmeüberganskoeffizienten kann der Wärmestrom durch Konvektion an der Innenseite für die Messung berechnet werden:

$$q_{c,mess} = h_{c,mess} * (T_{si,mess} - T_{ai,mess})$$

- Ziel ist es, dass der durch Konvektion übertragene Wärmestrom in der Messung und in WUFI® Plus gleich groß ist, auch wenn es Unterschiede in der Raumlufttemperatur gibt. Es soll gelten:

$$q_{c,mess} = \ q_{c,wufi}$$

- Wie oben beschrieben werden Wärmebrücken in WUFI® Plus durch einen so genannten Wärmebrücken Korrekturfaktor nachtäglich prozentual berücksichtigt. Daher soll für die Oberflächentemperaturen innen gelten:

$$T_{si,mess} = T_{si,wufi} * f_{WB}$$

- Für WUFI® Plus kann durch Umstellung der drei oben genannten Annahmen ein angepasster Wert für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt werden. Dieser bezieht die Unterschiede in der Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Raumluft sowie Wärmebrückeneffekte mit ein:

$$h_{c,wufi} = \frac{q_{c,mess}}{\frac{T_{si,mess}}{f_{WB}} - T.ai,wufi}$$

5.3.5.2 Definition des Erfolgskriteriums

Die Unsicherheiten im Bereich der Messung sind im Wesentlichen abhängig von der Messgenauigkeit zweier Sensortypen. Dies sind die für die Oberflächen- und Raumlufttemperaturmessungen verwendeten PT100 Temperatursensoren sowie die Mayer-Sensoren zur Messung des konvektiven Übergangskoeffizienten innen. Die Messunsicherheit der Temperatursensoren wurde zu ±0,11 K ermittelt. Bei den verwendeten h_c-Sensoren muss aufgrund ihres Entwicklungsstandes laut Hersteller eine Messunsicherheit von ±10 % angesetzt werden. In einer Sensitivitätsanalyse wurde festgestellt, welchen maximalen Temperaturunterschied in den Ergebnissen eine Veränderung des h_c-Wertes um ±10 % hervorruft. Sowohl für den stationären als auch den instationären Beheizungsfall beeinflusste die Messunsicherheit des h_c-Sensors die Ergebnisse um maximal ±0,16 K. Das Erfolgskriterium für die Validierung setzt sich aus der Messunsicherheit der zwei relevanten Sensoren zusammen: **0,11 K + 0,16 K = ± 0,27 K**

5.3.5.3 Validierungsfall 1- Ungedämmt mit Fußbodenheizung

Auch für die Validierung des Strahlungsmodells wurde zunächst der ungedämmte Messraum mit Fußbodenheizung betrachtet. Deren Aufbau kann dem Kapitel 5.3.4.1 zur Validierung der bauteilintegrierten Anlagentechnik entnommen werden. Wiederum wurden zwei Versuche, nämlich Fall 1A bei stationärem und Fall 1B bei instationärem Betrieb, durchgeführt. Es wurde Außenwand 1 (AW1) betrachtet, bei der die Messpunkte 1A und 5A an die beheizte Innenwand 2 anschließen, während sich die Messpunkte 1E und 5E nahe dem Anschluss an die kalte Ecke der beiden Außenwände befinden.

Validierungsfall 1A – stationärer Betrieb

Der erste Validierungsversuch wurde bei konstanter Lufttemperatur von 26 °C durchgeführt. Die Ergebnisse des in Kapitel 5.3.5.1 beschriebenen Berechnungsvorgehens sind in Tab. 5-8 zusammengefasst. Der Wärmebrücken Korrekturfaktor fWB entspricht sowohl für Messposition 1A als auch 3C einem Wert von 1,0. Hier kommt es zu keinen zusätzlichen Wärmeverlusten. Dies ist schlüssig, da sich Position 1A im Anschlussbereich an die beheizte Innenwand und den

beheizten Boden befindet und 3C genau in Wandmitte liegt. Der höchste zusätzliche Wärmeverlust (rund 5 %) liegt an der Ecke von Außenwand 1 und Außenwand 2 in Deckennähe (Messposition 5E) vor. Zusätzlich wurden die berechneten Wärmeströme durch Konvektion an den verschiedenen Messpositionen verglichen. Ziel hierbei war es, dass der Fehler zwischen ihnen entsprechend der Messunsicherheit des h_c-Sensors nicht mehr als ±10 % betrug. Dies ist für die Sensoren 1A, 1E, 3C und 5A der Fall. Im Punkt 5E liegt die Abweichung mit 12 % leicht über dem Zielwert. Dies ist damit zu erklären, dass in diesem Punkt sowohl der Wärmebrückeneinfluss als auch die Anpassung des h_c-Wertes mit am größten ausfallen. Ein Problem hierbei könnte darstellen, dass bei der Berechnung von f_{WB} die Anpassung des h_c-Wertes nicht mit einbezogen werden kann und die zusätzlichen Wärmeverluste daher nicht korrekt berechnet wurden. Auch kam an den Wärmebrücken (3D-Objekte) das detaillierte Berechnungsmodell zum langwelligen Strahlungsaustausch nicht zum Einsatz. Hier wird eine weitere Fehlerquelle vermutet.

Tab. 5-8: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 1A.

Pos.	$h_{c,mess}$ [W/m²K]	$T_{surf,mess}$ [°C]	$T_{Air,mess}$ [°C]	$q_{c,mess}$ [W/m²]	$T_{Air,wufi}$ [°C]	f_{WB} [-]	$h_{c,wufi}$ [W/m²K]	$q_{c,wufi}$ [W/m²]	Δq_c [%]
1A	4,6	23,1	25,4	-10,5	25,6	1.00	4,3	-10,4	-1%
1E	4,0	21,6	23,3	-6,6	25,6	0.97	2,1	-6,7	+2%
3C	4,2	24,1	26,7	-10.9	25,6	1.00	7,7	-11,9	+9%
5A	4,5	22,2	25,1	-13.1	25,6	0.98	4,9	-12,7	-3%
5E	4,3	21,5	24,4	-12.5	25,6	0.95	3,5	-11,0	-12%

Vergleicht man die Oberflächentemperaturen von Messungen und Simulation (korrigiert um fWB), ergeben sich die in Tab. 5-9 und Abb. 5-20 dargestellten Temperaturverteilungen. In Tab. 5-9 ist in tabellarischer Form der Mittelwert über den Betrachtungszeitraum für die gemessenen und simulierten Oberflächentemperaturen sowie deren Abweichung voneinander dargestellt. Darunter ist in Abb. 5-20 ein grafischer Vergleich der Temperaturverteilungen zu sehen, wobei die jeweils helleren Linien einer Farbe den Messwert und die dunkleren Linien den simulierten Wert für einen Beobachtungspunkt darstellen.

Sowohl für die Messung als auch die Simulation lag die Temperatur für den Messpunkt in der Mitte der Wand (3C) mit ca. 24 °C am höchsten. Hier ist nicht mit Wärmebrückeneinflüssen zu rechnen und der Punkt steht im direkten Strahlungsaustausch mit der beheizten Innenwand gegenüber, was die hohe Oberflächentemperatur erklärt. Die Oberflächentemperaturen an allen vier Eckpunkten lagen unterhalb der Temperatur in Wandmitte. Dabei waren die Temperaturen an der Innenwand zugewandten Ecke (1A und 5A) deutlich höher als die an der Außenwand zugewandten Ecke (1E und 5E). Für beide Ecken lag die Temperatur am Messpunkt in Fußbodennähe (Ebene 1) etwas höher verglichen mit der Temperatur knapp unter der Raumdecke (Ebene 5).

Tab. 5-9: Validierungsfall 1A – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei 26°C und stationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Messpunkt	1A	1E	3C	5A	5E
WUFI® Plus [°C]	23,17	21,59	23,94	22,40	21,29
Messung [°C]	23,07	21,62	24,10	22,41	21,55
Abweichung [K]	0,10	-0,03	-0,16	-0,01	-0,26

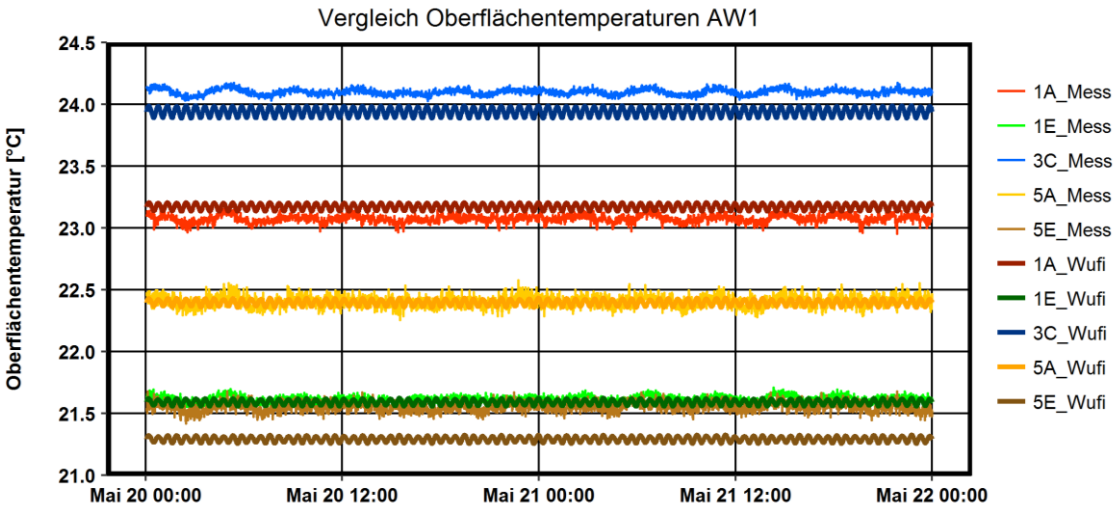


Abb. 5-20: Validierungsfall 1A – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei 26°C und stationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Die Abweichung von gemessenen und simulierten Werten liegt für alle fünf Messpositionen unterhalb der als Erfolgskriterium definierten Maximaldifferenz von ± 0,27 K. Die ermittelten Oberflächentemperaturen zwischen Simulation und Messung sind in den Punkten am höchsten, in denen auch die Abweichungen der berechneten konvektiven Wärmeströme am höchsten sind. Daraus wird geschlossen, dass die korrekte Darstellung von Konvektionsvorgängen bereits im stationären Fall eines der Hauptprobleme bei der Darstellung der durchgeführten Messversuche in WUFI® Plus ist.

Trotz dieser Abweichungen lagen alle Ergebnisse innerhalb des definierten Erfolgskriteriums. Es kann außerdem angenommen werden, dass die Abweichungen eher aus der ungenauen Darstellung von Konvektionsprozessen und Wärmebrückeneffekten und nicht aus einem Fehler im Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch rühren. Aus diesen Gründen wird der stationäre Validierungsfall 1A als erfolgreich betrachtet.

Validierungsfall 1B – instationärer Betrieb

Für Validierungsfall 1B wurde der mit Fußbodenheizung ausgestattete Testraum noch einmal instationär beheizt. Zwischen rund zehnstündigen beheizten Perioden (22 °C) lagen verschieden lange Intervalle, in denen der Raum auskühlt (12 h, 8 h, 4 h, 2 h, 1 h). Da es sich um einen instationären Versuch handelt, sind die berechneten Werte in Tab. 5-10 lediglich als Mittelwerte über den gesamten Versuchszeitraum zu verstehen. Wie zuvor war es da Ziel, den konvektiven Wärmestrom durch Umrechnung des h_c-Wertes in WUFI® Plus so anzupassen, dass die Abweichung zwischen Mess- und Simulationsergebnis nicht höher als 10 % ist. Dies gelang unter instationären Bedingungen nur bedingt, denn für die Messpunkte 1E, und 5A lagen die Abweichungen im Mittel knapp darüber.

Die Abweichungen in der konvektiven Wärmeübertragung spiegeln sich auch beim Vergleich der Oberflächentemperaturen wieder, welche in Abb. 5-21 und Tab. 5-11 dargestellt sind. In Anhang A.5.2dieser Arbeit ist zur besseren Übersicht eine Darstellung der Oberflächentemperaturen einzeln für jede Messposition zu finden. Auch der Verlauf der konvektiven Wärmeströme von Messung und Simulation ist an dieser Stelle für jede Messposition zu finden.

Tab. 5-10: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 1B.

Pos.	$h_{c,mess}$ [W/m²K]	$T_{surf,mess}$ [°C]	$T_{Air,mess}$ [°C]	$q_{c,mess}$ [W/m²]	$T_{Air,wufi}$ [°C]	f_{WB} [-]	$h_{c,wufi}$ [W/m²K]	$q_{c,wufi}$ [W/m²]	Δq_c [%]
1A	4,5	18,1	20,0	-8,6	19,7	1,00	5,5	-9,1	+ 6%
1E	3,9	16,5	18,4	-7,4	19,7	0,97	2,9	-6,5	- 12%
3C	4,1	18,6	21,7	-12,9	19,7	1,00	10,6	-12,1	- 6%
5A	4,2	17,3	20,4	-13,0	19,7	0,98	7,1	-11,4	- 13%
5E	4,0	16,5	17,1	-2,6	19,7	0,97	1,0	-2,8	+ 8%

Die Temperaturverteilung auf der Außenwand stimmt sowohl für die Messung als auch die Simulation mit der des stationären Falles überein. Punkt 3C in Wandmitte ist am wärmsten, gefolgt von den beiden Messpunkten am Innenwandanschluss (1A und 5A). An der Ecke Außenwand-Außenwand (1E und 5E) sind die Temperaturen wieder am kältesten. Der Verlauf der Oberflächentemperatur in Punkt 1A stimmt sowohl in den Spitzen als auch während des Abkühlungsprozesses sehr gut überein. Die mittlere Abweichung liegt bei 0,12 K. Dasselbe gilt für Punkt 3C in Wandmitte (Abweichung 0,11 K). In diesen beiden Punkten korreliert auch der Verlauf der konvektiven Wärmeströme von Messung und Simulation ebenso gut. In Punkt 5E ist die mittlere Oberflächentemperatur der Simulation leicht zu kalt (Abweichung -0,21 K), liegt aber noch innerhalb des definierten Erfolgskriteriums. Hier kommt es v.a. in den beheizten Phasen zu Oberflächentemperaturen, die etwas zu niedrig sind. In der ersten (und längsten) Abkühlphase fällt die simulierte Temperatur etwas zu weit, während sie für die übrigen gut übereinstimmt.

Tab. 5-11: Validierungsfall 1B – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei instationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Messpunkt	1A	1E	3C	5A	5E
WUFI® Plus [°C]	18,20	17,06	18,74	17,90	16,30
Messung [°C]	18,08	16,53	18,63	17,33	16,51
Abweichung [K]	0,12	0,52	0,11	0,57	-0,21

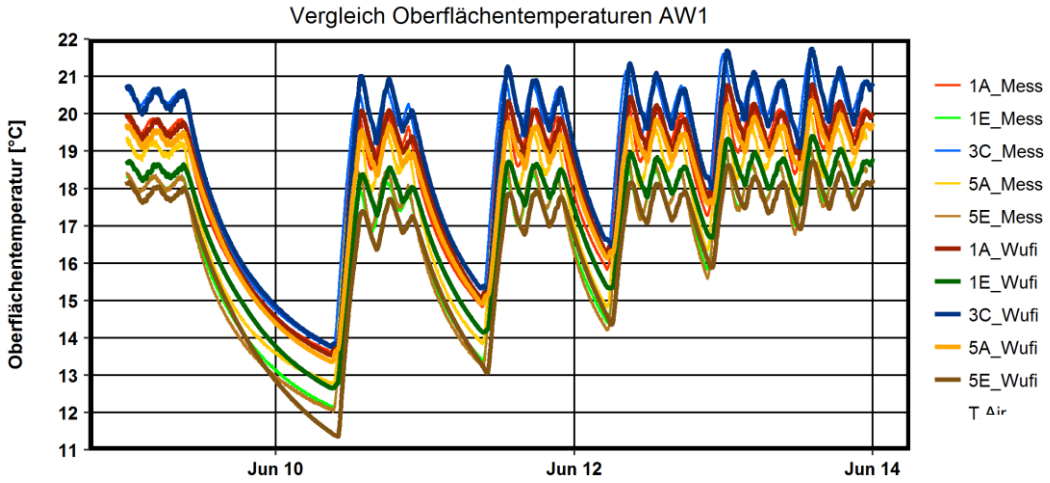


Abb. 5-21: Validierungsfall 1B – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei instationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Das Erfolgskriterium von maximal ±0,27 K Abweichung der Oberflächentemperaturen wird für die Beobachtungspunkte 1E (0,52 K) und 5A (0,57 K) nicht erfüllt. Die Temperaturen sind in den beheizten Phasen nur leicht zu hoch, während der Abkühlphase fallen die simulierten Oberflächentemperaturen an diesen Sensoren aber deutlich zu langsam ab. Diese beiden Messwerte erfüllten schon beim Vergleich der konvektiven Wärmeströme das Kriterium von maximal 10 % Abweichung nicht. Auch hier sind die Diskrepanzen, vor allem für Punkt 5A, hauptsächlich in den Abkühlphasen zu finden.

Obwohl das Ergebnis für zwei der fünf Messpunkte über dem Erfolgskriterium liegt, können die Fehler hauptsächlich über die unzureichende Darstellung von Konvektion und Wärmebrückeneffekten während der Abkühlphasen des Versuchs erklärt werden. Während der beheizten Phasen stimmen die Oberflächentemperaturen hingegen hinreichend gut überein. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass das zu validierende Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch innen auch unter instationären Bedingungen korrekt arbeitet. Die Ergebnisse werden jedoch vor allem durch instationäre Effekte an Wärmebrücken und durch Konvektion negativ beeinflusst.

5.3.5.4 Validierungsfall 2- Innendämmung 4cm und Wandheizung

Für den zweiten Validierungsfall wurden die Außenwände sowohl mit Innendämmungen als auch mit Wandheizungssystemen ausgestattet. Die Wandheizungen wurden in WUFI® Plus mithilfe von zwei TABS Systemen nachgestellt. Es wurden die 5 Messpositionen an Innenwand 2 (IW2) betrachtet: Punkt 3C liegt hier in Wandmitte, 1A und 5A in der Ecke Innenwand-Innenwand und die Punkte 1E und 5E an der Ecke von Innenwand und beheizter Außenwand. Es wurden dieselben Versuche durchgeführt wie für den ersten Validierungsfall: Zuerst wurden die Oberflächentemperaturen bei konstanten Bedingungen (ca. 25 °C Raumlufttemperatur) und anschließend im instationären Fall für unterschiedlich lange Abkühlzeiten zwischen den beheizten Intervallen von 22 °C betrachtet.

Das Rechenverfahren für die Angleichung des h_c-Wertes wurde wiederum analog zum im Kapitel 5.3.5.1 beschriebenen Vorgehen durchgeführt. Der Einfluss von Wärmebrücken erwies sich für den gedämmten Fall und die Betrachtung der Innenwand in Vorsimulationen als sehr gering (< 1 %), sodass f_{WB} für alle Positionen gleich 1 gesetzt wurde.



Abb. 5-22: Verlegung der Heizdrähte in Türnähe und in der Ecke Innenwand-Innenwand.

Validierungsfall 2A - Stationärer Betrieb

Der innengedämmte und mit Wandheizung betriebene Testraum wurde im stationären Zustand auf rund 25 °C konditioniert. Die Ergebnisse der Berechnungen zur Anpassung des hc-Wertes sind in Tab. 5-12 zusammengefasst. Insgesamt ist auffällig, dass die gemessenen Luft- und Oberflächentemperaturen in Fußbodennähe (1A und 1E) bzw. in der warmen Ecke Innenwand-Innenwand (1A und 5A) in den Messungen unerwartet niedrig ausfallen. Dies lässt sich mit der Verlegung der Heizdrähte erklären. Die Drähte der Wandheizungen, die auf der Innenseite der Außenwände verlegt wurden, wurden erst ab einer Höhe von ca. 20 cm über dem Boden

angebracht. Die warme Luft der Heizung steigt hauptsächlich nach oben Richtung Decke, die unterste Ebene des Raumes in Fußbodennähe bleibt kühler.

Dieser Umstand wurde im Modell nachgebildet, indem in Fußbodennähe ein rund 20 cm breiter Streifen nicht mit einer Wandheizung auf der Innenseite der Außenwände ausgestattet wurde. Die unterste Raumebene wurde somit weniger beheizt. Ein weiterer großer Temperaturabfall in der Ecke der beiden Innenwände wird vermutlich durch den Einfluss der Tür hervorgerufen, die sich in rund 30 cm Abstand zur Ecke in Innenwand 1 befindet. Die Oberflächentemperatur in Fußbodennähe neben der Tür (Punkt 1E von Innenwand 1) liegt mit rund 18 °C sehr deutlich unter der Oberflächentemperatur in Wandmitte (29 °C). Dasselbe gilt für die direkt anschließende Innenwand 2. Auch hier sinkt die Oberflächentemperatur außen in dieser Ecke (Punkt 1A ca. 19 °C und Punkt 5A rund 15 °C) deutlich unter die in Wandmitte (23,5 °C).

Tab. 5-12: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 2A.

Pos.	$h_{c,mess}$ [W/m²K]	$T_{surf,mess}$ [°C]	$T_{Air,mess}$ [°C]	$q_{c,mess}$ [W/m²]	$T_{Air,wufi}$ [°C]	f_{WB} [-]	$h_{c,wufi}$ [W/m²K]	$q_{c,wufi}$ [W/m²]	Δq_c [%]
1A	3,6	22,5	23,03	-1,7	24,8	1,0	0,9	-2,0	+15 %
1E	6,3	23,3	23,75	-2,8	24,8	1,0	2,2	-2,7	-4 %
3C	4,2	24,7	25,02	-1,6	24,8	1,0	18,4	-1,5	-6 %
5A	3,3	21,3	23,05	-5,0	24,8	1,0	1,7	-5,8	+16 %
5E	3,6	23,4	25,52	-7,3	24,8	1,0	5,6	-7,8	+7 %

Die inhomogene Temperaturverteilung an der Oberfläche der realen Flächenheizsysteme wurde bereits in Kapitel 5.3.3 zu den Limitationen beim Vergleich von Messdaten und WUFI® Plus Modell erwähnt. In dem Versuch, die kühleren Bedingungen an der Ecke Innenwand-Innenwand besser nachzubilden, wurden daher die Innenwände im WUFI® Plus Modell noch einmal in drei Komponenten unterteilt. An deren Außenseite wurden jeweils die gemessenen Temperaturen der hier befindlichen Sensoren angesetzt. Dadurch konnten die Temperaturen auch an der Innenoberfläche der Innenwände im Bereich der Ecke deutlich gesenkt werden. Der Vergleich der konvektiven Wärmeströme von Messung und Simulation ergibt gute Übereinstimmungen für die Punkte 1E, 3C und 5E. Für die Punkte 1A und 5A hingegen (Innenwandecke) liegen die Abweichungen deutlich über 10 %. Auch für den Vergleich der Oberflächentemperaturen in Abb. 5-23 und Tab. 5-13 ergeben sich im Bereich der Innenwandecke für die Simulation deutlich höhere Werte als für die Messung. Es wird vermutet, dass diese Abweichungen hauptsächlich aus der ungenügenden Kenntnis über die inhomogene Temperaturverteilung auf der Außenseite der Innenwand herrühren. Daraus wird geschlossen, dass sich die Messpunkte 1A und 5A nur bedingt für die Validierung eignen. Für die Messpunkte 1E, 3C und 5E hingegen konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Oberflächentemperatur erzielt werden.

Mit rund 24,5 °C ist die Oberflächentemperatur in Wandmitte auch für diesen Validierungsfall am höchsten. Die Temperaturen in der Ecke von Innenwand und beheizter Außenwand sind in

Fußbodennähe (1E) und Deckennähe (5E) mit rund 23,5 °C sowohl in der Messung als auch in der Simulation in etwa gleich hoch. Für die Punkte 3C, 1E und 5E wird der Validierungsfall 2A als erfolgreich betrachtet.

Deutlich unterhalb der Temperaturen in den Punkten 3C, 1E und 5E folgen die Temperaturen an der Innenwandecke, wobei die simulierten Temperaturen hier etwas über den gemessenen liegen. Es wurde bereits erwähnt, dass der Fehler beim Vergleich der Oberflächentemperaturen an diesen Punkten deutlich über dem gewünschten Wert von ±0,27 K liegt. Dennoch kann die Temperaturverteilung auf der Innenwand mit den unerwartet niedrigen Temperaturen für die Punkte 1A und 5A gut nachgestellt werden. Daraus wird geschlossen, dass die Validierung für den quantitativen Vergleich der Oberflächentemperaturen in diesen Punkten zwar nicht ausreichend ist, qualitative Vergleiche der Oberflächentemperaturverteilung über die gesamte Innenwand hinweg aber dennoch nachgebildet werden können.

Tab. 5-13: Validierungsfall 2A –gedämmte Variante mit Wandheizung bei 25°C stationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Messpunkt	1A	1E	3C	5A	5E
WUFI® Plus [°C]	22,84	22,49	24,66	21,78	24,46
Messung [°C]	22,48	23,33	24,66	21,29	23,36
Abweichung [K]	0,36	0,16	0,00	0,49	0,10

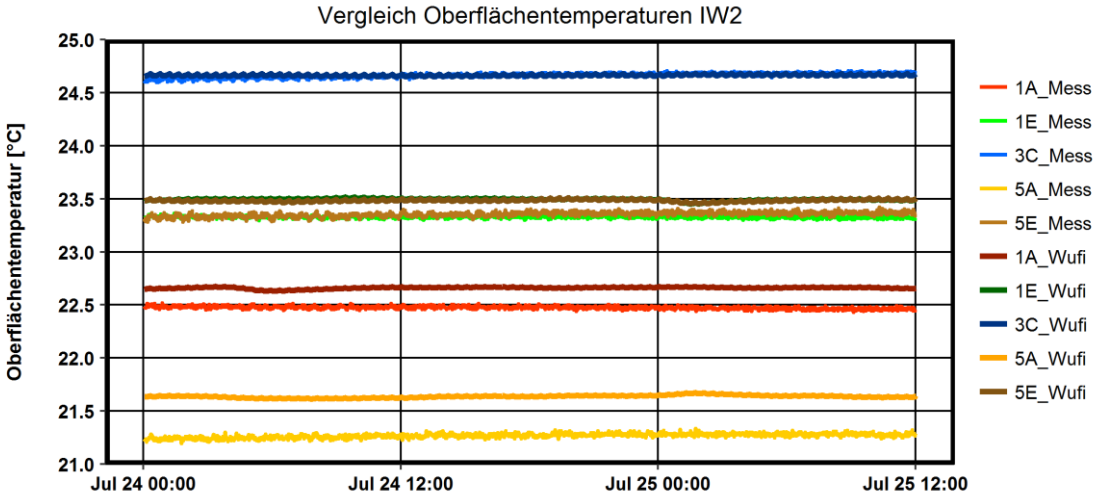


Abb. 5-23: Validierungsfall 2A – gedämmte Variante mit Wandheizung bei 25°C stationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Validierungsfall 2B - Instationärer Betrieb

Wieder wurde das instationäre Temperaturprofil im Testraum angesetzt, das bereits in den vorigen Validierungsversuchen für den instationären Fall verwendet wurde. Im Fall von Innendämmung und Betrieb mit Wandheizung ergeben sich die in Tab. 5-14 dargestellten, über den Zeitraum der Simulation gemittelten Berechnungsergebnisse.

Wie schon im stationären Fall erwies es sich auch im instationären Fall als schwierig, das Temperaturverhalten in der Nähe der Tür an der Ecke Innenwand-Innenwand nachzustellen. An den Messpositionen 1A und 5A war es nicht möglich, einen ähnlich hohen Wärmestrom durch Konvektion zu erzielen. Insbesondere in Punkt 1A liegt die Abweichung bei 45 %. Der Vergleich von gemessenen und simulierten Oberflächentemperaturen ist für die Dauer des rund dreitägigen Versuchs in Abb. 5-24 und Tab. 5-15 zu sehen. Für einen besseren Überblick ist der Vergleich der Oberflächentemperaturen und der konvektiven Wärmeströme für jede Messposition einzeln in Anhang A.5.3 zu finden.

Tab. 5-14: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 2B.

Pos.	$h_{c,mess}$ [W/m²K]	$T_{surf,mess}$ [°C]	$T_{Air,mess}$ [°C]	$q_{c,mess}$ [W/m²]	$T_{Air,wufi}$ [°C]	f_{WB} [-]	$h_{c,wufi}$ [W/m²K]	$q_{c,wufi}$ [W/m²]	Δq_c [%]
1A	4,4	19,6	20,28	-2,4	20,85	1,0	2,0	-1,5	-45 %
1E	1,2	20,1	19,92	0,2	20,85	1,0	2,6	-0,2	+0 %
3C	4,0	21,4	20,90	1,8	20,85	1,0	3,7	1,9	-6 %
5A	3,8	18,9	20,73	-6,9	20,85	1,0	4,1	-5,8	-16 %
5E	2,9	19,3	19,74	-1,5	20,85	1,0	1,2	-1,6	+7 %

Wie schon im stationären Fall ließen sich für drei der Messpositionen auch im instationären Fall zufriedenstellende Übereinstimmungen zwischen Mess- und Simulationsergebnis erzielen. Insbesondere der Temperaturverlauf in Wandmitte kann im gesamten Versuchsverlauf sehr gut nachgestellt werden, während er in Punkt 1E ein wenig darüber (0,17 K) und in Punkt 5E ein wenig darunter (- 0.22 K) liegt. Die sehr gute Übereinstimmung in Punkt 3C spiegelt sich auch im Verlauf der konvektiven Wärmeströme in diesem Punkt wieder. Die Abkühlung fand in Punkt 1E in der Simulation ein wenig langsamer statt, während die beheizten Phasen gut übereinstimmten. Hier kommt es bei der Messung des h_c-Wertes vermutlich aufgrund der sehr geringen Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Raumluft (lediglich 0,2 K) zu recht großen Schwankungen des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Diese spiegeln sich auch in der Berechnung der konvektiven Wärmeströme und in den Oberflächentemperaturen wieder.

Für Punkt 5E konnte sowohl für die Oberflächentemperauren als auch für die konvektiven Wärmeströme eine sehr gute Übereinstimmung der Werte während der Abkühlphasen erzielt werden. Während der beheizten Phasen lagen die simulierte Temperatur und der simulierte Wärmestrom ein wenig unterhalb der gemessenen Werte. Da die Abweichungen an allen drei Messpositionen innerhalb des gewünschten Zielwertes von maximal ±0,27 K Abweichung liegen, wird der instationäre Validierungsversuch hier als erfolgreich eingestuft.

Für die Positionen 1A und 5A liegen die simulierten Oberflächentemperaturen deutlich zu hoch, genau wie auch die simulierten konvektiven Wärmeströme durchweg zu hoch liegen. Wieder wird die Vermutung angestellt, dass die Temperaturen an der Außenseite der Innenwand hier aufgrund mangelnder Kenntnisse über die vorherrschenden Bedingungen bereits zu hoch

angesetzt wurden, sodass auch die Abweichungen der Oberflächentemperaturen innen zu hoch sind. Dennoch zeigt der Verlauf der Kurven in beiden Punkten ein sehr ähnliches Verhalten sowohl während den beheizten Phasen als auch während den Abkühlphasen. Ebenso liegen die Werte für die konvektive Wärmeübertragung in der Simulation um einen recht konstanten Wert zu hoch. Daraus wird geschlossen, dass mit einer besseren Kenntnis über die Auskühlung der Innenwandecke und die daraus resultierenden veränderten Oberflächentemperaturen auf deren Außenseite auch ein zufriedenstellendes Ergebnis für diesen Validierungsversuch erzielt werden könnte. Nach dem derzeitigen Stand lassen die Ergebnisse an Punkt 1A und 5A nur einen qualitativen Vergleich über das Aufheiz- und Abkühlverhalten an dem jeweiligen Punkt zu. Da die gemessenen und simulierten Kurven in beiden Fällen weitestgehend parallel verlaufen, wird zumindest diese Art von Vergleich als erfolgreich eingestuft.

Tab. 5-15: Validierungsfall 2B –gedämmte Variante mit Wandheizung bei instationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

Messpunkt	1A	1E	3C	5A	5E
WUFI® Plus [°C]	20,31	20,26	21,41	19,19	19,03
Messung [°C]	19,56	20,09	21,39	18,87	19,25
Abweichung [K]	0,75	0,17	0,02	0,33	-0,22

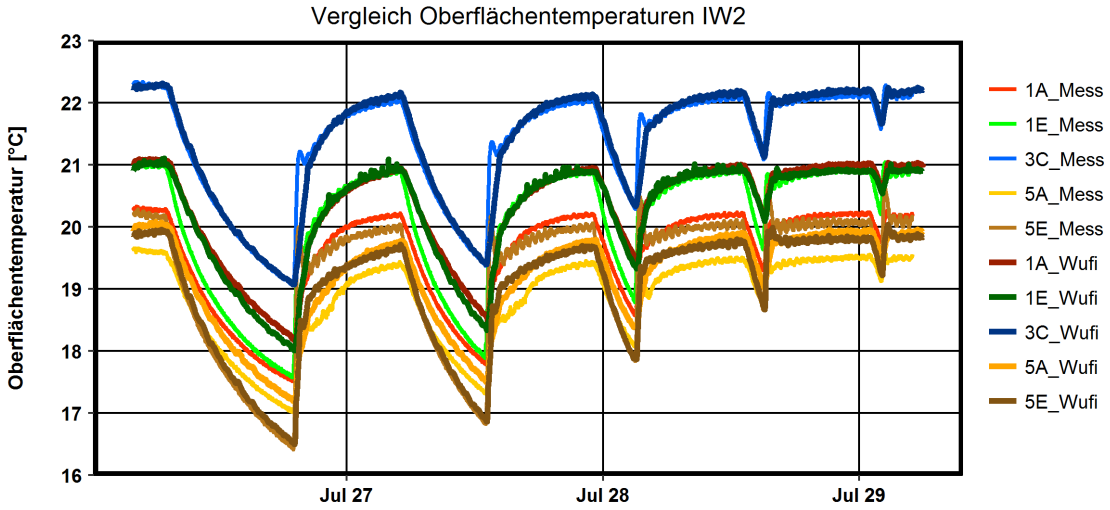


Abb. 5-24: Validierungsfall 2B –gedämmte Variante mit Wandheizung bei instationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen.

5.3.6 Zusammenfassung und Diskussion

Zusammenfassend lassen sich für die Validierung der zwei hier betrachteten Modelle folgende Aussagen treffen: Für das TABS Modell zu bauteilintegrierten Heizsystemen konnten alle drei Validierungsfälle erfolgreich durchgeführt werden. Es konnte daher für die Validierung des zweiten Modells bereits angewandt werden. Bei dem zweiten Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch spielten einige Limitationen beim Vergleich von Messdaten und dem WUFI® Plus Modell eine Rolle. Dazu zählten der Umgang mit Wärmebrückeneffekten, die Darstellung von Konvektionsvorgängen und horizontalen und vertikalen

Lufttemperaturunterschieden sowie die unregelmäßige Temperaturverteilung in realen Flächenheizsystemen.

Trotz dieser Limitationen konnte für alle vier betrachteten Validierungsfälle die qualitative Temperaturverteilung auf der Wand gut nachgebildet werden. In Wandmitte (Punkt 3C) stimmte die simulierte Oberflächentemperatur stets sehr gut mit der gemessenen überein. Dass hier die besten Ergebnisse erzielt werden, rührt vermutlich daher, dass keine Wärmebrückeneffekte auftreten, die simulierte Lufttemperatur (Raummitte) gut mit der hier gemessenen übereinstimmt und daher auch die daraus resultierende konvektive Wärmeübertragung sehr ähnlich ist. Hingegen vergrößern sich die Fehler beim Vergleich der Oberflächentemperaturen stets, je größer der Wärmebrückeneinfluss und die Unterschiede zwischen gemessener und simulierter Lufttemperatur werden. Für den Großteil der betrachteten Messpositionen lagen die resultierenden Abweichungen noch innerhalb des Bereichs der Messungenauigkeit der relevanten Sensoren (±0,27 K). Für diejenigen Sensoren, an denen die Abweichungen größer waren, ist das Validierungskriterium nicht erfüllt. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass der Fehler aus der inkorrekten Darstellung von Konvektions- und nicht von Strahlungsprozessen herrührt: Es kann festgestellt werden, dass die Abweichungen der resultierenden konvektiven Wärmeströme aus Simulation und Messung proportional größer werden, je höher auch die Abweichungen zwischen den Oberflächentemperaturen sind. So konnte für alle Positionen, an den die Abweichung der konvektiven Wärmeströme weniger als 10 % betrug, das Validierungskriterium für die Oberflächentemperatur (weniger als ±0,27 K Abweichung) erfüllt werden. Für alle Positionen, an denen die Abweichung der konvektiven Wärmeströme mehr als 10 % betrug, wurde es hingegen nicht erfüllt. Die einzige Ausnahme von dieser Regel stellt die Messposition 5E in Validierungsfall 1A dar. Hier kommt es zu Abweichungen von 12 % zwischen den konvektiven Wärmeströmen. Mit einer Abweichung der Oberflächentemperaturen von 0,26 K wird das Erfolgskriterium hingegen gerade noch erfüllt.

Alles in allem lassen die auftretenden Fehler sich vor allem durch die fehlerhafte Darstellung von Konvektionsvorgängen und Lufttemperaturunterschieden erklären. Deren bessere Modellierung sollte Bestandteil weiterführender Forschung sein. Schon vor dieser Arbeit wurden für das Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen andere Validierungsverfahren (Sichtfaktorenberechnung, Testfälle der DIN EN 13791) erfolgreich durchgeführt. Auch die hier durchgeführte Validierung war für einen Großteil der Messpositionen und insbesondere in Wandmitte zufriedenstellend. Die simulierte Temperaturverteilung auf der Wand stimmte im qualitativen Vergleich stets gut mit der gemessenen überein. So waren z. B. die höchsten und niedrigsten Oberflächentemperaturen in allen Validierungsfällen für Simulation und Messung stets an derselben Position zu finden. Dies alles spricht dafür, dass das Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen die Strahlungsprozesse korrekt in WUFI® Plus abbilden kann. Es wird daher als erfolgreich validiert betrachtet und, genau wie das Modell zu bauteilintegrierten Heizsystemen, für die in Kapitel 5.4 folgende Parameterstudie verwendet.

5.4 Simulationsbasierte Parameterstudie

5.4.1 Definition der Parameter

Ein Überblick über die zu variierenden Parameter der Simulationsstudie ist in Tab. 5-16 gegeben. Es handelt sich hierbei um Variationen des Nutzungstyps, des Dämmstandards, des Heizsystems, des Heizbetriebs und der Anzahl der Außenwände. Somit ergibt sich insgesamt eine Betrachtung von 1440 verschiedenen Parameterkombinationen. Relevante Informationen zu den jeweiligen Parametern sind in den folgenden Kapiteln zusammengetragen. Außerdem soll ein Überblick über die wesentlichen Simulations-Parameter gegeben werden, die in der nachfolgenden Studie als konstant angesetzt werden.

Tab. 5-16: Überblick über die variablen Parameter.

Parameter	Variationen	Abkürzung	#
Nutzungs-typen	1. Nutzungsszenario 1 (Küche) 2. Nutzungsszenario 2 (Schlafen) 3. Nutzungsszenario 3 (Bad) 4. Nutzungsszenario 4 (Wohnen) 5. Nutzungsszenario 5 (Arbeiten)	NZ1 NZ2 NZ3 NZ4 NZ4	5
Dämm-varianten	1. Ungedämmt (Referenzfall) 2. Innendämmung Außenwände (2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm) 3. Innendämmung Außenwände (2 cm, 4 cm, 6 cm, 8cm) mit zusätzlicher Innendämmung der Innenwände (2 cm) 4. Außendämmung (2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm) 5. Zusätzliche Low-E-Beschichtung für den ungedämmten Fall, für ID8 und für ID8+IW	OD ID2,ID4,ID6,ID8 ID2+IW,ID4+IW, ID6+IW,ID8+IW AD2,AD4,AD6,AD8 OD+Low-E,ID8+Low-E, ID8+IW+LowE	16
Heiz-systeme	1. Radiator 2. Fußbodenheizung 3. Außenwand-Wandheizung	RAD FB WAND	3
Betriebs-varianten	1. Kontinuierlicher Betrieb 2. Nachtabsenkung auf 16 °C 3. Instationäre Beheizung nur bei Anwesenheit	Kontin. Nachtabs. Anwesenh.	3
Zahl Außenwände	1. Eine Außenwand 2. Zwei Außenwände	1 AW 2 AW	2

5.4.1.1 Konstante Parameter

Um die Anzahl der betrachteten Parameterkombinationen zu begrenzen, mussten einige Parameter für die gesamte Parameterstudie als konstant betrachtet werden. Diese sind Tab. 5-17 zusammengefasst.

Tab. 5-17: Überblick über die konstanten Parameter.

Parameter	Beschreibung
Raumdesign	Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Nutzungsszenarien zu gewährleisten, wurden folgende Parameter beim Entwurf des simulierten Raumes als konstant angesetzt: - Quadratische Form des Raumes - Abmessungen des Raumes (4 m x 4 m x 2,8 m)
Bestandkonstruktion Außenwand	Laut Diefenbach et al. 2011 stammen 42 % und damit ein Großteil der Wohnungen im Deutschen Gebäudebestand aus den Jahren 1958-1983. Einige der typischen Außenwandkonstruktionen dieser Zeitspanne wurden daher mit einer ersten Auswahl an Parametern in Vorsimulationen untersucht: - Vollziegel-Mauerwerk (d = 0,265 m, U-Wert = 1,52 W/m²K) - Hochlochziegel-Mauerwerk (d = 0,265 m, U-Wert = 1,32 W/m²K) - Betonhohlblock-Mauerwerk (d =0,265 m, U-Wert = 1,31 W/m²K) - Zweischaliges Vollziegel-Mauerwerk (zwei Schichten Mauerwerk mit jeweils d = 0,12 m und Luftschicht von d = 0,06 m; U-Wert = 1,30 W/m²K) Vergleicht man den energetisch ungünstigsten Fall (ungedämmte Variante) und den in den Voruntersuchungen energetisch günstigsten Fall (Innendämmung von 8 cm), erhält man für alle vier Bestandkonstruktionen ein Energieeinsparpotential von 51 % ±2 % sowie ähnliche Behaglichkeitsbewertungen. Daraus wird geschlossen, dass die Ausgangs-Bestandkonstruktion nur geringen Einfluss auf die Höhe der möglichen Energieeinsparungen bzw. auf die thermische Behaglichkeit hat. Für die nachfolgende Parameterstudie wird daher nur von einer Bestandkonstruktion ausgegangen. Gewählt wird hierfür das Hochlochziegel-Mauerwerk, dessen Energieeinsparpotential sich genau im Mittelfeld der betrachteten Varianten bewegte. Eine grafische Darstellung der Außenwand im Bestand ist in Anhang A.5.4 zu finden.
Dämmstoff Außenwand	Analog zu den durchgeführten Messversuchen werden in den Simulationen EPS Dämmstoffplatten als Dämmmaterial verwendet (λ = 0.034 W/mK, μ = 20).
Übrige Bauteile	Die Bauteilaufbauten der übrigen Bestandkonstruktionen, nämlich Boden, Decke und Innenwand, sind wie auch die Außenwand in Anhang A.5.4 abgebildet.
Luftwechsel	Für die Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes werden die drei Lüftungsvarianten nach DIN 4108-2:2012-02 angesetzt. Diese sind Grundluftwechsel, erhöhter Tagluftwechsel und erhöhter Nachtluftwechsel (näheres siehe Kapitel 5.4.2.2). Während der Heizperiode wird eine konstante Luftwechselrate von 0,5 h-1 festgesetzt. Dies entspricht dem Grundluftwechsel nach DIN 4108-2:2013 bzw. dem hygienischen Mindestluftwechsel nach DIN 1946-6. Aufgrund der wachsenden Zahl möglicher Parameterkombinationen wurde darauf verzichtet, die Höhe der konstanten Luftwechselrate zu variieren. In der Realität ist davon auszugehen, dass durch das Aufbringen einer Innendämmung in einem Bestandsgebäude die Luftdichtigkeit verbessert und ein guter technischer Standard erreicht wird. Der hygienische Mindestluftwechsel von 0,5 h-1 kann also als realistisch eingestuft werden. Ebenfalls verzichtet wurde auf die Entwicklung nutzerspezifischer Lüftungsprofile. Zwar hätte das nutzerspezifische Verhalten ohne Zweifel großen Einfluss sowohl auf potentielle Energieeinsparungen als auch auf die Behaglichkeit, doch es konnte kein zufriedenstellender Ansatz entwickelt werden, um es mit einzubeziehen. Daher wurde mit dem konstanten Luftwechsel gearbeitet. Dies gewährleistet auch, dass die Ergebnisse nicht durch mangelhafte Annahmen zum nutzerspezifischen Lüftungsverhalten verfälscht werden und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bestehen bleibt.

Fenster	Pro Außenwand soll ein Fenster (1,2 m x 1,5 m) betrachtet werden, das genau in der Außenwandmitte liegt. Es wird eine unbeschichtete Zweischeiben-Isolierverglasung mit U_{Window} = 2,73 W/m²K gewählt, was einem typischen Wert für den betrachteten Zeitraum entspricht (Verband Fenster + Fassade & Bundesverband Flachglas 2014).
Ausrichtung	Bei Betrachtungen einer Außenwand wird diese stets nach Westen ausgerichtet (bei zwei Außenwänden nach Süden und Westen). Diese Orientierung wurde gewählt, da hier sowohl die solaren Gewinne im Winter als auch die Überhitzung im Sommer verglichen mit anderen Orientierungen als durchschnittlich hoch erwartet wurde. Diese Vermutung wurde in Vorsimulationen untersucht: - Eine Orientierung Richtung Osten ergab nur sehr geringe Unterschiede in der benötigten jährlichen Heizenergie. Diese lagen zwischen 1 % (ungünstigster Fall, ungedämmt) und 2 % (günstigster untersuchter Fall, 8 cm ID). - Eine Orientierung Richtung Süden zeigte gegenüber der Orientierung Richtung Westen, dass 10 % (ungünstigster Fall) bis 15 % (günstigster Fall) weniger Heizenergie über das Jahr hinweg benötigt werden. - Richtung Norden wurden 9 % (ungünstigster Fall) bis 14 % (günstigster Fall) mehr Heizenergie als bei einer westlichen Orientierung benötigt. - Die maximale Energieeinsparung (Vergleich des günstigsten und ungünstigsten Falles der jeweiligen Ausrichtung) lag für die westliche und östliche Orientierung bei rund 51 %, für die südliche Ausrichtung bei 48 % und für die nördliche Ausrichtung bei 54 %. Die Annahme, dass die Orientierung Richtung Westen einen durchschnittlichen Heizenergiebedarf hervorruft, hat sich demnach in den Vorsimulationen bestätigt. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die Ausrichtung nur einen geringen Einfluss auf das prozentuale Energieeinsparpotential hat. Dieses liegt in allen Fällen im Bereich von 51 % ±3 %. Die Orientierung Richtung Westen ist außerdem aufgrund von Schlagregenbeanspruchung i. d. R. die kritischste Ausrichtung hinsichtlich von Feuchteproblemen bzw. Bauschäden. Daher soll auch die Westwand für die später folgende Schadensanalyse verwendet werden.
Verfügbare Heizleistung	Die Dimensionierung der verfügbaren Heizleistung ist ein weiterer Parameter, der die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen kann und dessen Dimensionierung sich im Vorfeld als nicht unproblematisch erwies. Laut Jagnow et al. 2002 kann bei Gebäuden, die nach der Wärmeschutzverordnung von 1977 gebaut wurden, von einer Heizlast von 70-130 W/m² am kältesten Tag ausgegangen werden. Dies stimmt mit weiteren Recherchen überein, die sich auf sogenannte Erfahrungswerte bzw. Faustformeln beziehen. Zum Beispiel werden laut Viessmann 2005 für einen Mehrfamilienhaus mit über acht Wohneinheiten (Altbau von 1969-1973) 100 Watt pro Quadratmeter Wohnfläche als spezifischer Leistungsbedarf angesetzt. Dies ist ein häufig wiederkehrender Wert für die überschlägige Dimensionierung von Altbauten. Die Heizleistung, die für die unterschiedlichen Beheizungssysteme in der Parameterstudie zur Verfügung steht, wird gewählt zu: **100 W/m² x 16 m² = 1600 W** Da in Badezimmern i. d. R. eine höhere Operativtemperatur gefordert wird, als in den anderen Nutzungsszenarios, ist es hier üblich, einen Aufschlag von rund 10 % auf die herkömmliche Heizleistung zu geben: **100 W/m² x 16 m² x 1.1 = 1800 W** Werden in der Simulation zwei Außenwände betrachtet, wird der spezifische Leistungsbedarf für ein Mehrfamilienhaus mit weniger als acht Wohneinheiten gewählt. Dieser liegt laut Viessmann 2005 bei 110 W/m². Daraus ergibt sich: **110 W/m² x 16 m² = 1800 W** Entsprechend ergibt sich für das Nutzungsszenario Badezimmer: **110 W/m² x 16 m² x 1.1 = 2000 W**

Angrenzende Zonen	Für alle Innenwände wird die Option ‚Raum mit denselben Raumklimabedingungen' für die nach außen angrenzende Zone gewählt.
Außenklima	Das Außenklima wird für den Standort Holzkirchen aus den Wetterdaten des Fraunhofer IBP gewählt. Da Holzkirchen im deutschen Vergleich sowohl recht kühle Winter als auch recht warme Sommer aufweist, liegen Abschätzungen hinsichtlich des Energiebedarfs durch diese Wahl i. d. R. auf der sicheren Seite.

5.4.1.2 Nutzungsszenarien

Nachfolgend sollen fünf Nutzungsszenarien (NZ) entwickelt werden, deren spezifische Eigenschaften sich hinsichtlich Nutzungsdauer, interner Lasten und gewünschter Operativtemperatur unterscheiden. Die fünf Nutzungstypen und einige ihrer Hauptcharakteristika sind in Tab. 5-18 dargestellt.

Tab. 5-18: Beschreibung der Nutzungsszenarien und ihrer Hauptcharakteristika.

NZ	Hauptcharakteristika
NZ1: Küche	- Nutzungsprofil geprägt von drei kurzen Peaks pro Tag (morgens, mittags, abends) - Hohe innere Wärmelasten - Mäßig hohe geforderte Operativtemperaturen
NZ2: Schlafen	- Kontinuierliche Belegung in der Nacht, keine Belegung tagsüber - Geringe innere Lasten - Niedrige geforderte Operativtemperaturen
NZ3: Bad	- Nutzungsprofil geprägt von zwei kurzen Peaks pro Tag (morgens, abends) - Hohe innere Feuchtelasten - Hohe geforderte Operativtemperaturen
NZ4: Wohnen	- Annahme zwei etwas längerer Nutzungszeiträume über den Tag verteilt (mittags, abends) - Normale innere Lasten - Normale geforderte Operativtemperaturen
NZ5: Arbeiten	- Kontinuierliche Nutzung tagsüber (Bürozeiten eines Werktags) - Normale innere Lasten - Normale geforderte Operativtemperaturen

5.4.1.3 Entwicklung der Belegungsprofile

Für die Entwicklung der Belegungsprofile werden die Nutzungsszenarien 1-4 im Folgenden als die Räume einer Wohnung eines Einpersonenhaushaltes betrachtet. NZ5 entspricht unabhängig davon einem Einmann-Büro (werktags). Laut Brasche und Bischof 2005 befinden sich Deutsche im Schnitt 15,7 h am Tag in den Innenräumen ihres zu Hauses. Da für Deutschland keine detaillierteren Aussagen zu Belegungszeiten der unterschiedlichen Räume vorlagen, wurde der „Britain at Home Report" (Hamilton et al. 2013) zu Rate gezogen (Tab. 5-19). Die tägliche Gesamtaufenthaltsdauer von rund 15,8 h aus diesem Bericht deckt sich annähernd mit den Ergebnissen aus Deutschland. Daher wird angenommen, dass die Übertragung der Werte von Großbritannien auf Deutschland für die Zwecke dieser Arbeit zulässig ist. Der „Britain at Home Report" betrachtet neben den täglichen Gesamtaufenthaltsdauern in Schlaf-, Ess- und Wohnzimmer sowie Küche und Bad auch noch das Vorhandensein eines Arbeitszimmers in der Wohnung mit einer Aufenthaltszeit von rund 45

Minuten. Dieser Fall wurde in der Parameterstudie nicht betrachtet. Daher sinkt die tägliche Gesamtaufenthaltsdauer in der Wohnung von 15,8 h auf 15,1 h.

Tab. 5-19: Aufenthaltszeiten in den verschiedenen Räumen einer Wohnung (Hamilton et al. 2013) sowie in einem Büro (werktags).

Zimmer	Aufenthaltsdauer pro Tag [min]
Schlafen	480
Wohnen	225
Küche (+Esszimmer)	150
Bad	50
Büro (werktags)	600

Mithilfe der in Tab. 5-19 angenommenen Aufenthaltszeiten in den verschiedenen Räumen konnte ein beispielhaftes Belegungsprofil für die einzelnen Räume (bzw. Nutzungsszenarien) entworfen werden. Dieses ist dargestellt in Abb. 5-25 (oben). Im Testfall wacht der Nutzer um 6:00 Uhr morgens im Schlafzimmer auf, verbringt 25 min im Badezimmer und frühstückt eine halbe Stunde in der Küche, bevor er die Wohnung bis zur Mittagszeit verlässt. Um 12 Uhr verbringt er 45 min in der Küche und anschließend 1,5 h im Wohnzimmer, bevor er die Wohnung noch einmal verlässt. Für die Zubereitung und den Verzehr des Abendessens hält er sich ab 18:00 Uhr 1,25 h in der Küche auf. Am Abend verbringt er noch einmal etwa 2 h im Wohnzimmer, bevor er sich nach weiteren 25 min im Badezimmer und ab 22 Uhr im Schlafzimmer aufhält. Die Betrachtung des Büros erfolgt unabhängig von der Nutzung der Wohnung, sodass die Nutzung einem Arbeitstag entsprechend von 08:00 bis 18:00 Uhr angesetzt wird, Abb. 5-25 (unten).

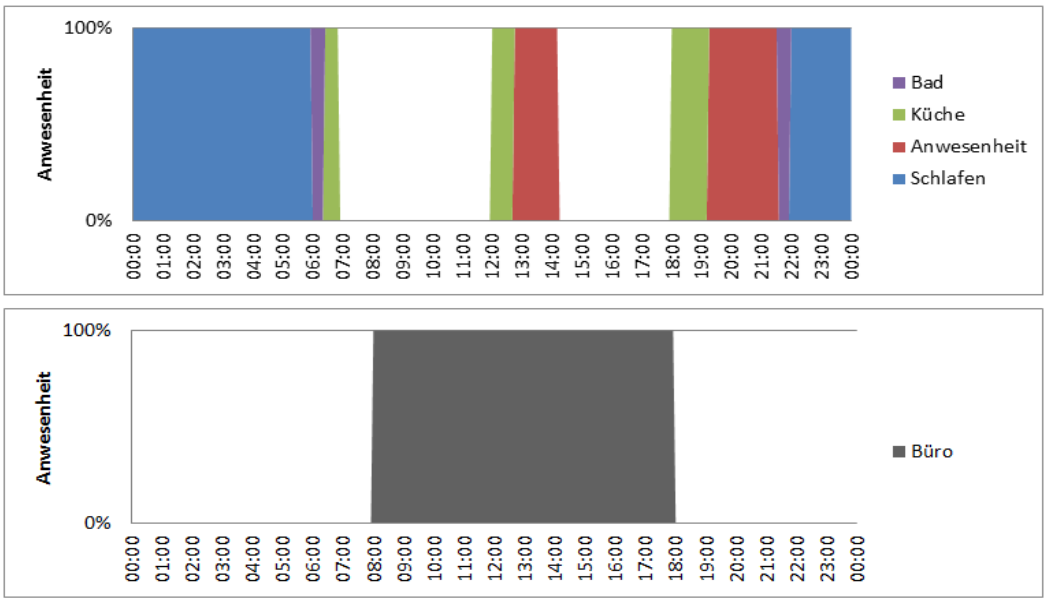


Abb. 5-25: Beispielhafte Belegungsprofile für die verschiedenen Räume in einem Einpersonenhaushalt (oben) sowie in einem Einmann-Büro werktags (unten).

5.4.1.4 Entwicklung der inneren Wärmelastprofile

Für die beispielhaften Räume der Wohnung sind in der nachfolgenden Tab. 5-20 mittlere interne Wärmeleistungen von verschiedenen typischen Wärmequellen je Raum angegeben. Dies beinhaltet die Wärmeabgabe durch den Nutzer, verschiedene elektrische Geräte sowie durch Beleuchtung (Nipkow 2013).

Für Personen wird laut VDI 2078 ausgehend von Aktivitätsgrad I (körperlich nicht tätig) bis II (leichte Arbeit im Stehen) eine Wärmeabgabe von rund 70 Watt pro Person angesetzt. Bei der Wärmeabgabe von elektronischen Geräten werden nur solche Geräte berücksichtigt, deren Betrieb entweder im Dauerbetrieb erfolgt (z. B. Kühlschrank) oder deren Anwendung mit gewisser täglicher Regelmäßigkeit zu erwarten ist (z. B. Anschalten des Computers im Büro oder des Fernsehers im Wohnzimmer). Damit wurden Geräte wie z. B. Waschmaschinen oder Wäschetrockner, die nur unregelmäßig und in einem Einpersonenhaushalt nur 1 bis 2-mal pro Woche verwendet werden, hier nicht berücksichtigt.

Tab. 5-20: Mittlere interne Wärmeleistung verschiedener Wärmequellen in Gebäuden.

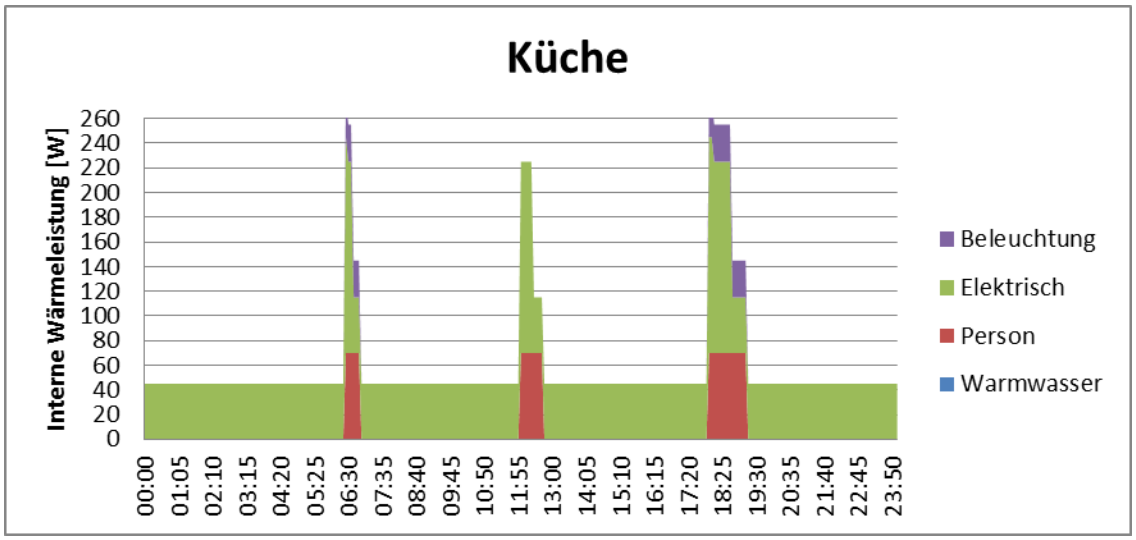
Zimmer	Q_{Nutzer}	$Q_{Elekrtisch}$		$Q_{Beleuchtung}$
NZ1 Küche	70 W	Kühlschrank Wasserkocher Kochen Standby	40 W 20 W 120 W 5 W	30 W
NZ2 Schlafen	70 W	Standby	2 W	30 W
NZ3 Bad	70 W	Haartrockner Warmwasser Standby	40 W 40 W 2 W	30 W
NZ4 Wohnen	70 W	Fernseher Standby	35 W 8W	30 W
NZ5 Büro	70 W	Computer Standby	35W 7W	30 W

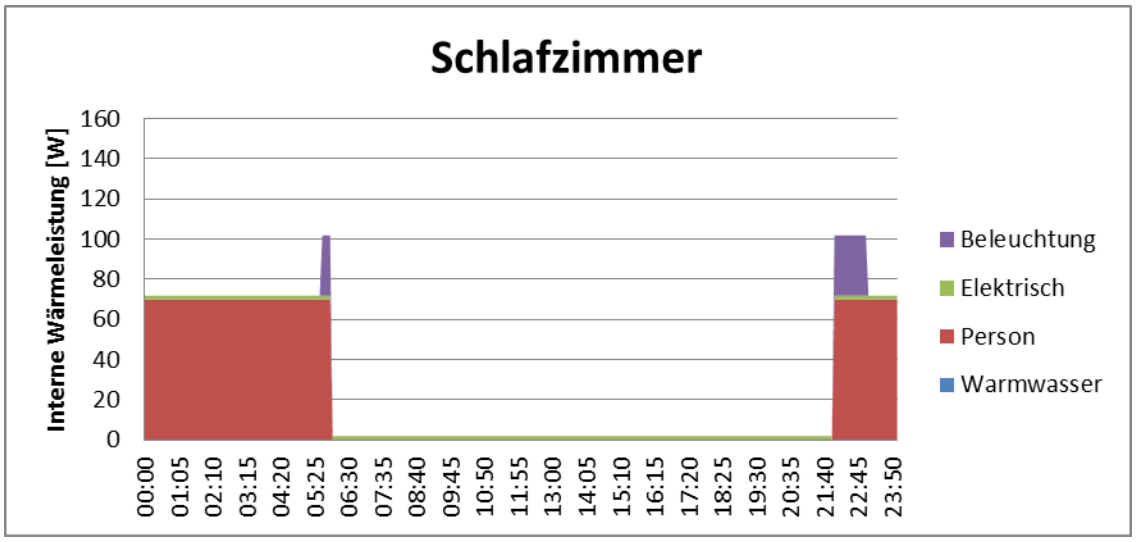
Der Wert Standby bei der Wärmeabgabe elektrischer Geräte wurde abgeschätzt aus der Anzahl der zu erwartenden, im Dauerbetrieb laufenden Geräte des jeweiligen Raumes. Für deren Wärmeabgabe wurde die „Europäische Stand-by-Richtlinie“ (Ökodesign Richtlinie 2008) als Maßstab angesetzt. Diese fordert seit Januar 2010 eine maximale Leistungsaufnahme von 1,0 W für Geräte im Ruhezustand bzw. von 2,0 W für Geräte im Ruhezustand mit zusätzlicher Informations- oder Statusanzeige. Die Annahmen über die Standby-Geräte in den einzelnen Räumen setzen sich wie folgt zusammen:

- Schlafzimmer: Radiowecker (2 W)
- Wohnzimmer: Telefon (2 W), Fernseher (2 W), Stereoanlage (2 W), DVD-Player (1 W)
- Küche: Elektrische Uhr Herd (2 W), Elektrische Uhr Mikrowelle (2 W), Kaffee-Vollautomat (1 W)
- Bad: Kleingeräte wie elektrische Zahnbürsten oder Rasierer (2 W)
- Arbeitszimmer: Computer (2 W), DSL-Router (2 W), Drucker (1 W), Telefon (2 W)

Die Werte für die Beleuchtung wurden mithilfe der typischen Wärmeleistung von 30 W für Wohneinheiten von 50 m² bis 100 m² abgeschätzt. In Kombination mit dem Belegungsprofil aus Abb. 5-25 ergeben sich für die einzelnen Raumtypen in Abb. 5-26 nachfolgende Profile für innere Wärmelasten. Zusätzlich wurde in WUFI® Plus die Annahme getroffen, dass die Wärmeabgabe zu 1/3 radiativ und zu 2/3 konvektiv erfolgt.

Nach Tabelle 2 in DIN V 4108-6 wird ein überschlägiger flächenbezogener Wert der internen Wärmeleistung von 5 W/m² für Wohngebäude bei einer Nutzung von 24 h täglich angegeben. Die Abschätzung der internen Wärmelasten in den oben dargestellten Profilen wurde überprüft, indem der flächenbezogene Durchschnitt für 24 h in der gesamten Wohnung berechnet wurde. Er liegt bei rund 5,4 W/m² und damit nur ein wenig über dem überschlägigen Wert der Norm. Daraus kann geschlossen werden, dass die Annahmen über die internen Wärmelasten in oben dargestellten Profilen sich in einem realistischen Rahmen bewegen.


Küche
Interne Wärmeleistung [W]
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
00:00
01:05
02:10
03:15
04:20
05:25
06:30
07:35
08:40
09:45
10:50
11:55
13:00
14:05
15:10
16:15
17:20
18:25
19:30
20:35
21:40
22:45
23:50
Beleuchtung
Elektrisch
Person
Warmwasser


Schlafzimmer
Interne Wärmeleistung [W]
160
140
120
100
80
60
40
20
0
00:00
01:05
02:10
03:15
04:20
05:25
06:30
07:35
08:40
09:45
10:50
11:55
13:00
14:05
15:10
16:15
17:20
18:25
19:30
20:35
21:40
22:45
23:50
Beleuchtung
Elektrisch
Person
Warmwasser

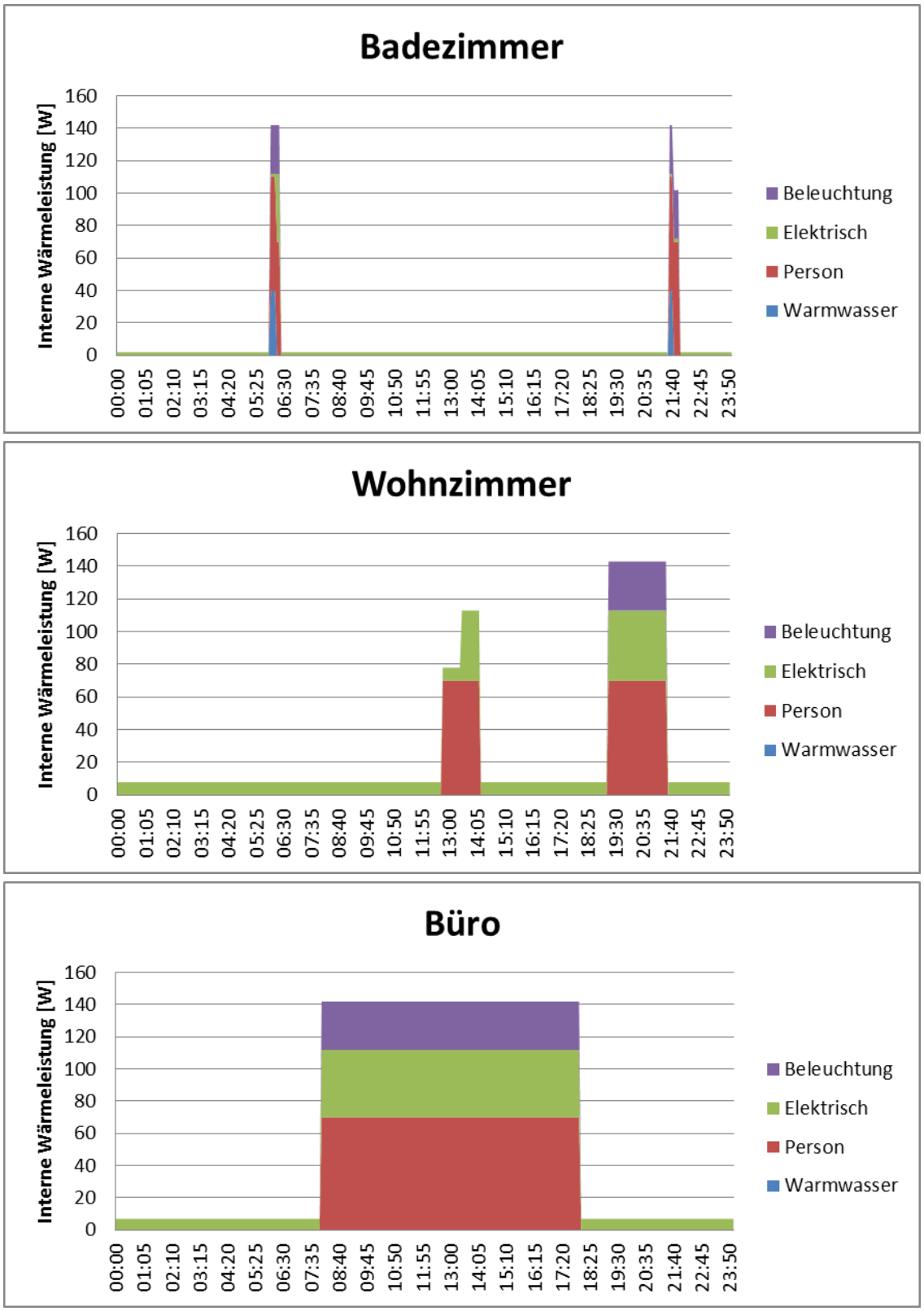


Abb. 5-26: Beispielhafte Profile für die inneren Wärmelasten in verschiedenen Räumen einer Wohnung.

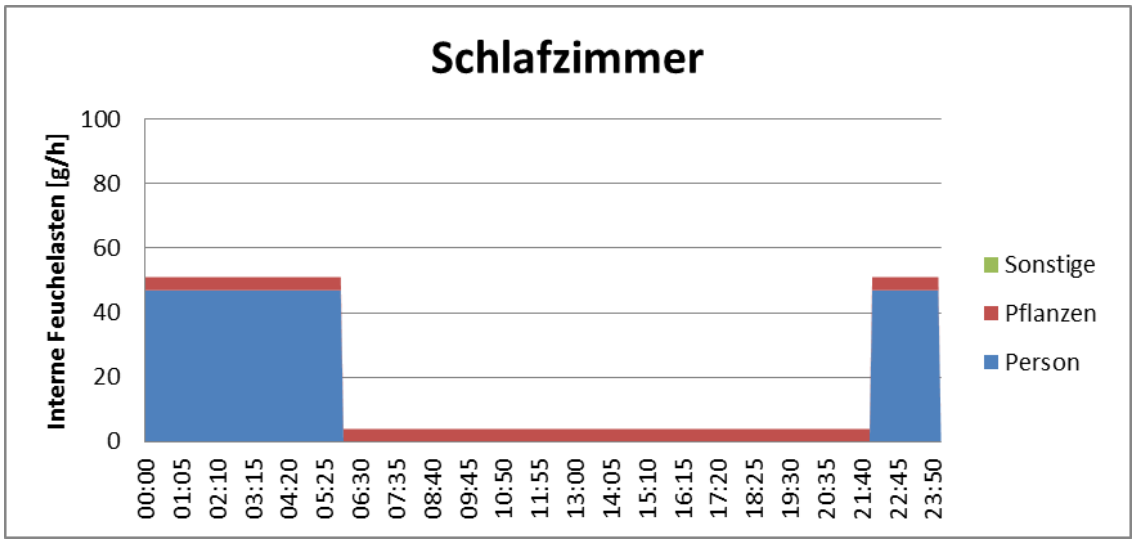
5.4.1.5 Entwicklung der inneren Feuchtelastprofile

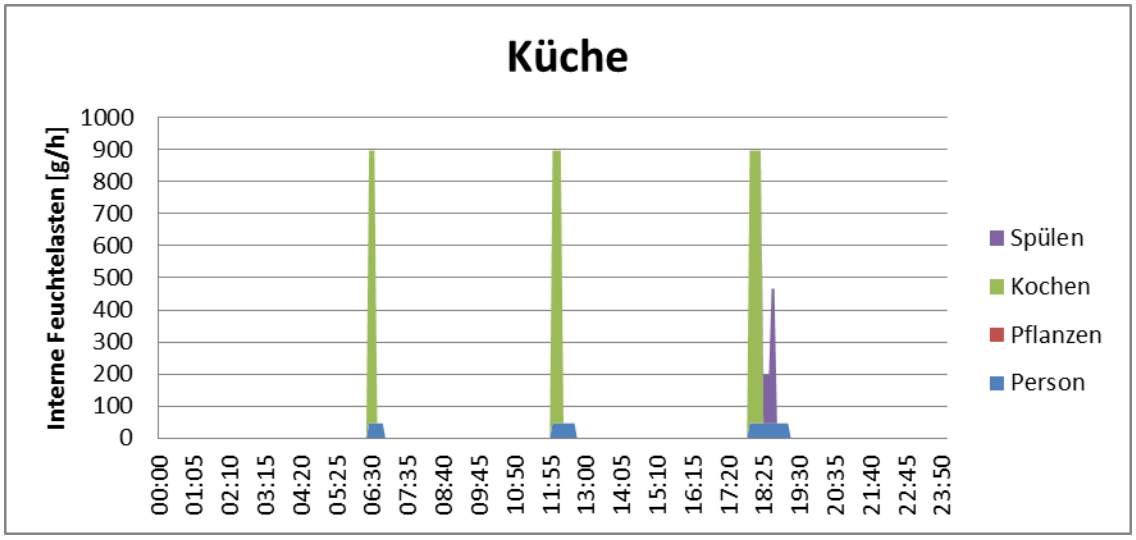
Für die Entwicklung der inneren Feuchtelastprofile wurden die in Tab. 5-21 zusammengefassten Werte für die Feuchteabgabe von Personen, Pflanzen und anderen Vorgängen in Gebäuden verwendet (Willems 2008). Wieder wurden die typischen Feuchtequellen mit dem beispielhaften Belegungsprofil kombiniert, sodass daraus die in Abb. 5-27 dargestellten Profile für die Feuchtelasten entstanden. Auch hier wurden aufgrund ihrer Unregelmäßigkeit Vorgänge wie Wäschewaschen und - trocknen nicht berücksichtigt.

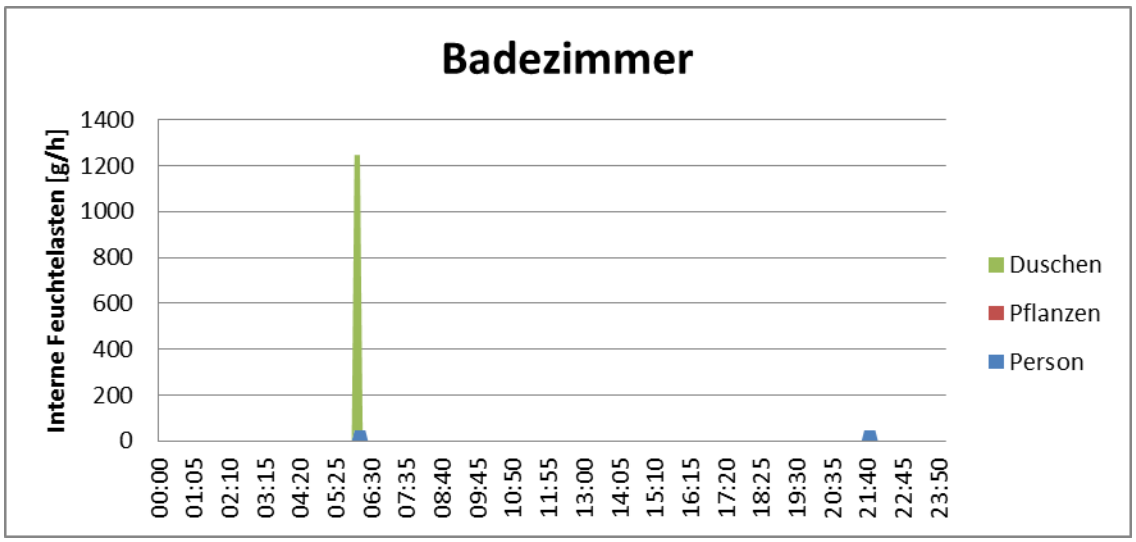
Um zu überprüfen, ob die erstellten Profile sich wiederum in einem realistischen Rahmen bewegen, wurden Vergleichswerte von Bischof et al. 2009 zu Rate gezogen. Demnach liegt die Feuchteabgabe in einem Einpersonenhaushalt täglich bei 2,1 l/d (bei Annahme von Berufstätigkeit und 12 h Anwesenheit) bzw. bei 3,1 l/d bei ganztätiger Anwesenheit. Im Fall der oben dargestellten Wohnung, die von einer Anwesenheit von 15,1 h/d ausgeht, kommt es zu einer täglichen Feuchteproduktion von rund 2,4 l, was gut mit den Vergleichswerten übereinstimmt.

Tab. 5-21: Typische Feuchtequellen für verschiedene Räume eines Gebäudes(Werte nach Willems 2008).

Zimmer	**$Q_{Elekrtisch}$**	
NZ1 Küche	Person Kochen (Mittelwert) Spülen (Mittelwert) Abtrocknen	47 g/h 850 g/h 150 g/h 420 g/h
NZ2 Schlafen	Person Pflanzen (2 Stück)	47 g/h 4 g/h
NZ3 Bad	Person Baden/Duschen	47 g/h 1200 g/h
NZ4 Wohnen	Person Pflanzen (4 Stück)	47 g/h 8 g/h
NZ5 Büro	Person Pflanzen (2 Stück)	47 g/h 4 g/h


Schlafzimmer
Interne Feuchtelasten [g/h]
100
80
60
40
20
0
00:00
01:05
02:10
03:15
04:20
05:25
06:30
07:35
08:40
09:45
10:50
11:55
13:00
14:05
15:10
16:15
17:20
18:25
19:30
20:35
21:40
22:45
23:50
Sonstige
Pflanzen
Person


Küche
Interne Feuchtelasten [g/h]
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
00:00
01:05
02:10
03:15
04:20
05:25
06:30
07:35
08:40
09:45
10:50
11:55
13:00
14:05
15:10
16:15
17:20
18:25
19:30
20:35
21:40
22:45
23:50
Spülen
Kochen
Pflanzen
Person


Badezimmer
Interne Feuchtelasten [g/h]
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
00:00
01:05
02:10
03:15
04:20
05:25
06:30
07:35
08:40
09:45
10:50
11:55
13:00
14:05
15:10
16:15
17:20
18:25
19:30
20:35
21:40
22:45
23:50
Duschen
Pflanzen
Person

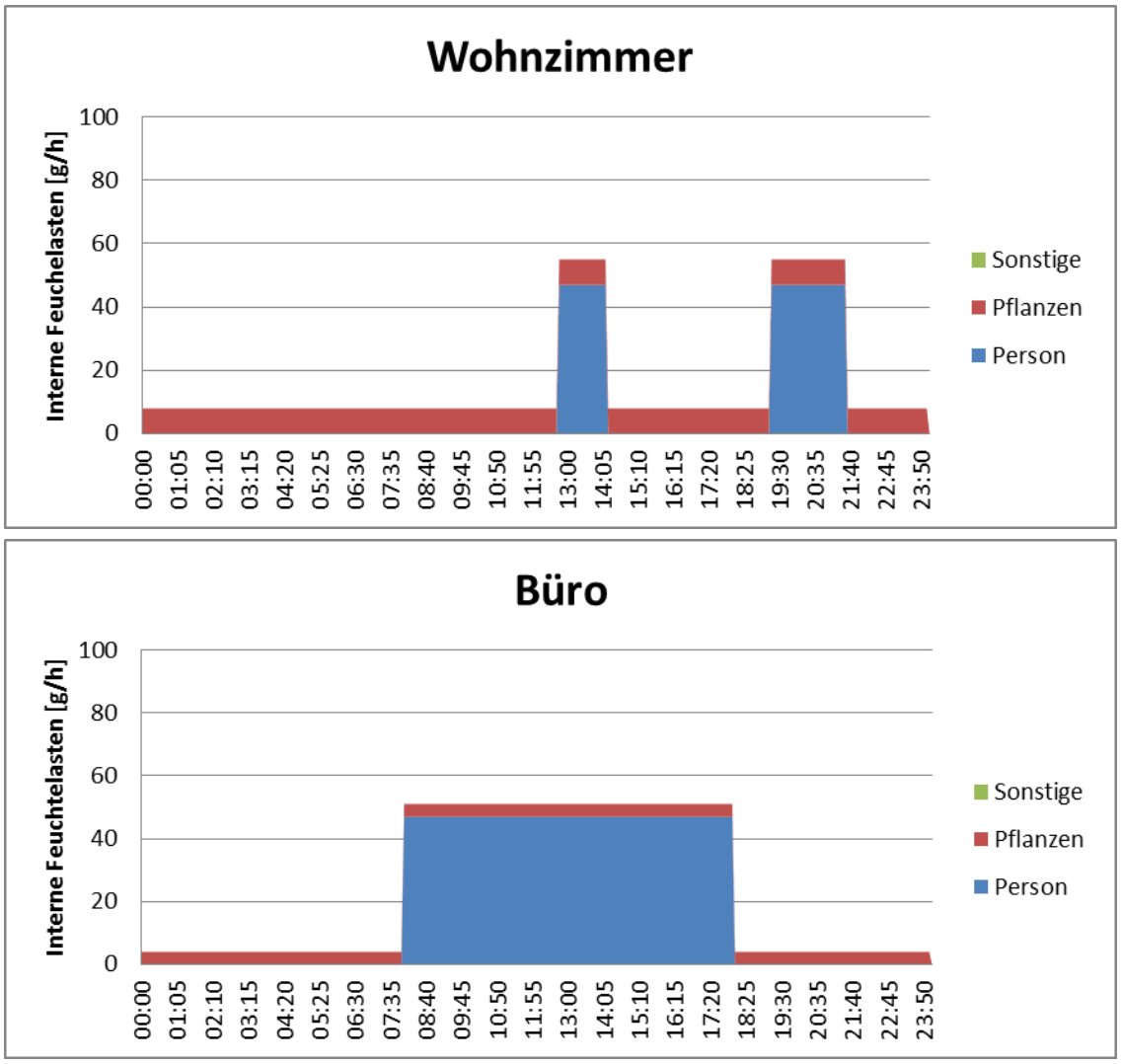


Abb. 5-27: Beispielhafte Profile für die inneren Feuchtelasten in verschiedenen Räumen einer Wohnung.

5.4.1.6 Dämmvarianten

Ausgehend von den in Tab. 5-3 und Anhang A.5.4 beschriebenen Bestandskonstruktionen wurden folgende Variationen des baulichen Standards vorgenommen:

- **Außendämmung der Außenwände:** Die Außendämmung der Außenwände wird im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich zu Vergleichszwecken betrachtet. Hierzu wurden EPS-WDV Dämmplatten (λ = 0,035) in den Dicken 2, 4, 6 und 8 cm auf der Außenseite des Hochlochziegel Mauerwerks aufgebracht.
- **Innendämmung der Außenwände:** Für die Innendämmung wird derselbe Dämmstoff verwendet, wie für die Außendämmung. Auch die betrachteten Schichtdicken (2, 4, 6, 8 cm) bleiben dieselben. Für Innendämmungen wird häufig eine Dicke von maximal 8 cm empfohlen, da ab noch höheren Dämmstoffdicken die zusätzlichen Energiegewinne nur noch marginal sind. Dies hat sich für die hier getesteten Parameter bereits in Vorsimulationen bestätigt (die zusätzlichen Energiegewinne lagen unter 1 % bei einer Innendämmung von 10 cm gegenüber einer Innendämmung

von 8 cm). Daher wurde die hier untersuchte maximale Dämmstoffdicke auf 8 cm festgelegt.

- **Innendämmung der Außenwände mit zusätzlicher Innendämmung der Innenwände:** Zusätzlich wurde für die innengedämmten Fälle betrachtet, welchen Einfluss die zusätzliche Aufbringung von 2 cm EPS-Dämmstoff auf der Innenseite der Innenwände hat.
- **Aufbringung von Low-E-Beschichtungen:** Neben der Veränderung des Dämmstandards wurde untersucht, welchen Einfluss die Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Bauteile auf Energieverbrauch und Komfort haben kann. Die Aufbringung einer Low-E-Beschichtung wird nachgestellt, indem der Emissionsgrad auf der Innenseite von Decke, Innen- und Außenwänden von 0,9 (Standard in Wufi® Plus) auf 0,3 herabgesetzt wird. Dieser Fall wurde für die ungedämmte Variante sowie für die Variante mit 8 cm Innendämmung (sowohl mit als auch ohne zusätzliche Dämmung der Innenwände) betrachtet.

5.4.1.7 Heizsysteme

Die in Tab. 5-17 beschriebene Heizleistung soll durch drei verschiedene elektrische Heizsysteme an den Raum übergeben werden können. Alle drei Heizsysteme wurden als sogenannte TABS mit dem validierten Modell für elektrische Flächenheizsysteme modelliert:

- **Fußbodenheizung** (beheizte Fläche von 16 m²)
- **Wandheizung** auf der Außenwand (beheizte Fläche von 9,4 m²) bzw. auf den Außenwänden (beheizte Fläche von 18,8 m²)
- **Radiator**, eingebaut unterhalb des Fensters. Der Heizkörper wurde durch ein 0,7 m² großes Bauteil aus Metall innerhalb der simulierten Zone modelliert.

5.4.1.8 Betriebsvarianten

Die drei betrachteten Betriebsvarianten sind:

- **Kontinuierlicher Betrieb**: Die Anlagentechnik soll die gewünschte Soll-Operativtemperatur des jeweiligen Nutzungsszenarios dauerhaft halten.
- **Nachtabsenkung**: Für die Nutzungsszenarien 1 (Küche), 3 (Bad) und 4 (Wohnen) wird von 5:30 Uhr bis 23:00 Uhr beheizt. Nachts darf die Temperatur auf minimal 16 °C fallen. In NZ2 (Schlafen) hingegen wird von 21:00 Uhr bis 8:00 Uhr beheizt und die erlaubte Abkühlung des Raumes findet tagsüber statt. Das Büro (NZ5) wird von 6:30 Uhr bis 18:30 Uhr beheizt.
- **Beheizung bei Anwesenheit**: Die Räume werden, ihren Nutzungsprofilen entsprechend, genau zu den Zeiten aufgeheizt, zu denen sich auch ein Nutzer in ihnen befindet. Die genauen Beheizungszeiträume können also dem Nutzungsprofil in Abb. 5-25 entnommen werden. Außerhalb der Nutzungszeiten darf die Operativtemperatur nicht unter 16 °C fallen.

5.4.2 Definition der Bewertungskriterien

Für die Bewertung der verschiedenen Parameterkombinationen stehen zwei Bewertungskriterien im Fokus. Dies sind zum einen die thermische Behaglichkeit und zum anderen die Höhe des energetischen Einsparpotentials. Auch eine Kombination der beiden Bewertungskriterien wurde in Betracht gezogen, um die verschiedenen Parameterkombinationen miteinander vergleichen zu können. Bevor es zu einer Bewertung dieser beiden Kriterien kommt, soll aber zunächst die Schadensfreiheit der jeweiligen Konstruktionen sichergestellt werden. Erfüllt eine Konstruktion die Kriterien für Schadensfreiheit nicht, so wird sie für die nachfolgenden Betrachtungen von Energie und Behaglichkeit nicht mehr berücksichtigt.

Auf eine Auswertung von Spitzenheizlasten wird an dieser Stelle verzichtet, da sie für die vorliegenden Fälle als nicht aussagekräftig angesehen werden muss. Die simulierten Anlagensysteme wurden einheitlich so dimensioniert, dass ihre maximale Heizleistung einem für Altbauten typischen Wert entspricht (z.B. 1600 W für die Fälle mit einer Außenwand und 1800 W für die Fälle mit zwei Außenwänden). Diese maximale Heizleistung wird im intermittierenden Betrieb während der Aufheizvorgänge stets erreicht, weshalb ein Vergleich von Spitzenheizlasten nicht zielführend ist. Unterschiede in den jeweiligen Varianten ergeben sich stattdessen in der benötigten Aufheizzeit, um bei gleicher verfügbarer Heizleistung möglichst schnell Komfortbedingungen zu erreichen.

5.4.2.1 Schadensfreiheit

Das Aufbringen von Innendämmungen kann das Verhalten von Bestandkonstruktionen drastisch verändern und birgt bei nicht fachgerechter Planung, Ausführung oder Nutzung Risiken. Neben der Bewertung von Komfort und Behaglichkeit ist es also auch immer vonnöten im Einzelfall zu prüfen, ob die notwendigen Kriterien für Schadensfreiheit gewährleistet sind. Auch hier kann die hygrothermische Gebäudesimulation, beispielsweise durch WUFI® Plus, Abhilfe und Sicherheit schaffen.

In Kapitel 3 dieses Projektes wurde die Schadensfreiheit von verschiedensten Innendämmsystemen bereits eingängig betrachtet. An dieser Stelle soll nur noch einmal anhand dergleichen Bewertungslogik überprüft werden, ob die Ergebnisse auch auf die hier verwendeten Szenarien und insbesondere für den intermittierenden Betrieb angesetzt werden können. Es soll hierbei betrachtet werden, ob es gewisse zulässige Schwankungsbreiten im intermittierenden Betrieb gibt, innerhalb derer sich das Raumklima bewegen muss, um Schadensfreiheit zu gewährleisten.

Analog zum Vorgehen in AP 2.2 werden die hier betrachteten Parameterkombinationen also hinsichtlich des Schimmelpilzrisikos auf der Innenoberfläche, dem Tauwasser in der Grenzschicht, dem Frostschadensrisiko in der Grenzschicht sowie dem Gesamtwassergehalt verglichen. Die genauen Erfolgskriterien für die jeweiligen Bewertungsgrößen sind in Tab. 5-22 zusammengefasst.

Tab. 5-22: Bewertungsgrößen und Erfolgskriterien für die Sicherstellung der Schadensfreiheit.

Bewertungsgröße	Erfolgskriterium
Schimmel auf der Innenoberfläche	Relative Feuchte auf der Innenoberfläche max. 75% (sollte dieser Grenzwert überschritten werden, muss eine zusätzliche Berechnung des Schimmelpilzwachstums vorgenommen werden)
Tauwasser in der Grenzschicht	Tauwasser in der Grenzschicht maximal 200 g/m² (nach EN 13788)
Frostschadenrisiko in der Grenzschicht	Durchfeuchtungsgrad Grenzschicht maximal 30% (nach WTA 6-4) Relative Feuchte Grenzschicht maximal 95% (nach WTA 6-4)
Gesamtwassergehalt	(Nur indirektes Maß für die Schadenanfälligkeit und den Wärmeschutz gegenüber der Ausgangskonstruktion)

5.4.2.2 Thermische Behaglichkeit im Sommer

Die thermische Behaglichkeit während der Heizperiode soll nur bedingt im Fokus dieses Projektes stehen. Da mit erhöhter (Innen-)Dämmung jedoch auch mit einer Erhöhung der Innenraumtemperaturen im Sommer gerechnet werden muss, soll eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit im Sommer nicht außer Acht gelassen werden.
Für die verschiedenen Dämmvarianten soll deshalb der Nachweis über den sommerlichen Wärmeschutz durch thermische Gebäudesimulation wie beschrieben in der DIN 4108-2:2012-02 erbracht werden. WUFI® Plus verfügt über einen speziellen Berechnungsmodus, der die in der Norm beschriebenen Randbedingungen erfüllt. Dazu zählen u.a.:

- Nur thermische Simulationen in einem festgelegten, einjährigen Berechnungszeitraum sind möglich.
- Für das Außenklima können nur drei deutsche Test-Reference-Years gewählt werden. Für den Standort Holzkirchen wird Klimaregion B gewählt.
- Die inneren Lasten und Sollwerte für das Innenraumklima (20°C Raumlufttemperatur für Wohngebäude während der Heizperiode) sind ebenfalls von der Norm vorgegeben. Da dadurch sowohl das Nutzungsszenario als auch die Betriebs-/Heizvariante vorgeben sind, muss die Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes nur für die verschiedenen Dämmvarianten durchgeführt werden.

Das für die Bewertung der Behaglichkeit im Winter gewählte Lüftungsverhalten (konstanter Luftwechsel 0,5 h-1) wird für die Betrachtung des sommerlichen Wärmeschutzes als nur bedingt realistisch eingeschätzt. Daher werden die drei nach DIN 4108-2:2012-02 definierten Lüftungsvarianten für jede Dämmvariante untersucht. Diese sind:

- **Grundluftwechsel**: Entspricht dem für die Betrachtung der Heizperiode gewählten hygienischen Mindestluftwechsel 0,5 h^{-1}
- **Erhöhter Tagluftwechsel**: Darf während der Anwesenheit (für Wohngebäude zwischen 6:00 und 23:00 Uhr) angesetzt werden, wenn die Raumlufttemperatur über 23°C liegt und über der Außenlufttemperatur liegt. Der Luftwechsel darf dann auf 3 h^{-1} erhöht werden.

- **Erhöhter Nachtluftwechsel**: Da in den betrachteten Räumen die Möglichkeit der Fensterlüftung besteht, darf davon ausgegangen werden, dass eine Nachtlüftung prinzipiell möglich ist. Außerhalb der Aufenthaltszeit (in Wohngebäuden 23:00 Uhr bis 06:00 Uhr) darf der Luftwechsel auf 2 h^{-1} erhöht werden.

Der Nachweis über den sommerlichen Wärmeschutz wird über die sogenannten Übertemperaturgradstunden erbracht. Für Holzkirchen wird die Sommerklimaregion B gewählt, sodass der Bezugswert für die Operativtemperatur bei 26°C liegt. Dieser darf für höchstens 1200 Kh/a (Anforderungswert Übertemperaturgradstunden) überschritten werden.

5.4.2.3 Thermische Behaglichkeit im Winter

Es stellt sich nach derzeitigem Stand der Forschung als schwierig heraus, ein anerkanntes Bewertungskriterium für thermische Behaglichkeit bei instationären Umgebungsbedingungen zu definieren. Daher wird in Anlehnung an die Forschung von Mayer 1995 vereinfacht folgende Annahme getroffen: „Thermische Behaglichkeit ist dann gegeben, wenn weder die Hauttemperaturschwelle von ca. 34 °C unterschritten noch die Stammhirntemperatur von ca. 37 °C überschritten ist“ (Mayer 1995). Weder die Kaltrezeptoren der Haut, noch die Warmrezeptoren im Stammhirn sollen also Anlass haben, die thermische Umgebung verändern zu wollen. Für einen nur mit Badehose bekleideten, ruhenden jungen Mann waren diese beiden Kriterien beispielsweise in einem nur sehr schmalen Temperaturspektrum bei einer Umgebungstemperatur von 30 °C erfüllt. Hier herrscht demnach vollständige thermische Behaglichkeit und die ideale Umgebungstemperatur liegt vor. Diese ideale Umgebungstemperatur sinkt bei zunehmendem Bekleidungs- und Aktivitätsgrad.

Im weiteren Verlauf seiner Forschung stellte Mayer (1995) die Ergebnisse seiner Untersuchungen dem PMV und PPD Modell nach Fanger gegenüber. Bei Fanger wird der Prozentsatz derer, die sich bei einem vorgegebenen Raumklima unbehaglich fühlen, auf minimal 5 % gesetzt, während es bei Mayer minimal 20 % sind. Zusätzlich stellte Mayer eine Verschiebung der Kurve nach rechts fest, sodass die Anzahl der Unzufriedenen Personen bei einem PMV von 0,5 ihr Minimum erreichte (nicht wie bei Fanger bei einem PMV von 0). Dies bedeutet, dass nach Mayer (1995) Personen ein Raumklima bevorzugen, in dem sie sich ein wenig wärmer fühlen als thermisch neutral. Abgesehen von dieser Verschiebung des PPD um 15 % nach oben und des PMV um 0,5 Einheiten nach rechts stimmt die Form der Kurve jedoch sehr gut mit der von Fanger überein (siehe Abb. 5-28) (Mayer 1995).

Unter Bürobedingungen konnte die größte Zufriedenheit (PPD = 20 %) mit dem Umgebungsklima festgestellt werden, wenn die Operativtemperatur im Kopfbereich (in etwa 1,7 m Höhe) nicht über 24 °C und die Lufttemperatur im Knöchelbereich nicht unter 22 °C lag. In Absprache mit Professor Mayer kann, da in der Parameterstudie keine großen Luftbewegungen und keine großen vertikalen Luftunterschiede zu erwarten sind, dieses Kriterium weiter vereinfacht werden: Eine Operativtemperatur von 23 °C in Raummitte als Kriterium für die größtmögliche Zufriedenheit bei gegebenen Umgebungsbedingungen wurde angesetzt.

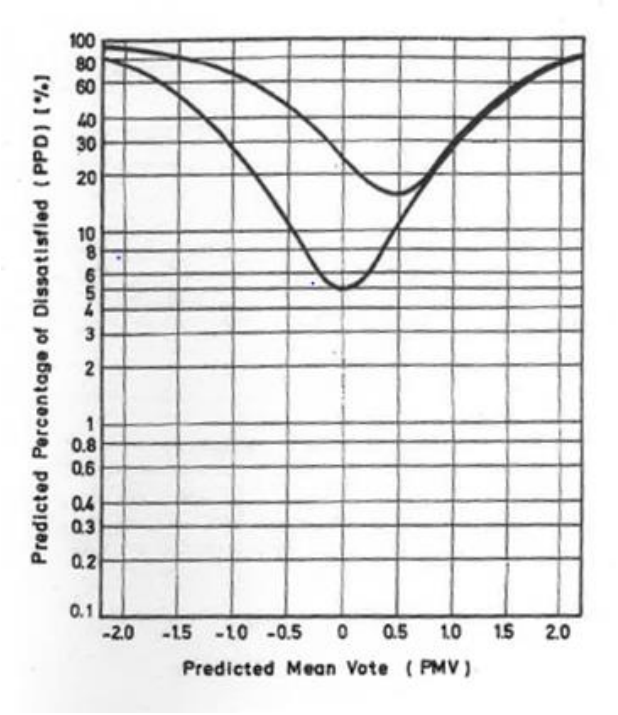


Abb. 5-28: PPD in Abhängigkeit von PMV. Obere Kurve nach Mayer, untere Kurve nach Fanger (Quelle: Mayer 1995).

Dieser Wert wird verglichen mit den empfohlenen Operativtemperaturen in Bild A2 nach DIN EN ISO 7730. Für die Kategorie A (entspricht PPD < 6 % nach Fanger und daher ungefähr PPD < 20 % nach Mayer) kann für Bürobedingungen in der Übergangszeit (clo = 0,7 und met = 1,2) ebenfalls eine optimale Operativtemperatur von 23 °C (+/- 1 °C) abgelesen werden. Daraus kann geschlossen werden, dass das Komfortkriterium auch für andere Kombinationen von Bekleidungs- und Aktivitätsgrad aus der DIN EN ISO 7730 übernommen werden kann. Aus diesem Grund kommt es für die verschiedenen Räume zu leicht angepassten, optimalen Operativtemperaturen, die als Bewertungskriterium für die thermische Behaglichkeit dienen sollen.

In Tab. 5-23 sind die empfohlenen Operativtemperaturen für die verschiedenen Räume zusammengefasst. Da ein Bewertungskriterium für die thermische Behaglichkeit während der Heizperiode definiert werden soll, wurde für den Bekleidungsgrad ein Wert von 1,0 clo angesetzt. Für das Schlafzimmer wurde dieser Wert auf 1,5 erhöht (Isolation durch Bettwäsche) und für das Bad auf 0,5 herabgesetzt (Be- und Entkleiden). Aus diesem Grund soll das Schlafzimmer etwas weniger und das Badezimmer etwas mehr als der Rest der Wohnung beheizt werden. Dies ist auch in der Realität ein häufig vorzufindender Fall. Als Vergleichskriterium zwischen verschiedenen Varianten dient im Folgenden der Zeitraum in Minuten je Parameterkombination, in denen die Operativtemperatur bei Anwesenheit des Nutzers unterhalb der definierten komfortablen Operativtemperatur liegt. Im Idealfall beträgt dieser Zeitraum 0 Minuten.

Tab. 5-23: Optimale Operativtemperaturen in Abhängigkeit von Kleidungs- und Aktivitätsgrad für die verschiedenen Nutzungsszenarien

NZ	Aktivität [met]	Kleidung [clo]	Empfohlene Operativtemperatur [°C]
NZ1: Küche (+ Esszimmer)	Stehende, leichte Tätigkeit (Kochen) (1,6), bzw. sitzende Tätigkeit (1,2)	1 ,0	21 °C (+/- 1 °C)
NZ2: Schlafen	Schlafend (0,7) bzw. sitzend, entspannt (1,0)	1,5	19 °C (+/- 1 °C)
NZ3: Bad	Stehende, leichte Tätigkeit (1,6)	0,5	23 °C (+/- 1 °C)
NZ4: Wohnen	Sitzend, entspannt (1,0)	1,0	22 °C (+/- 1 °C)
NZ5: Arbeiten	Sitzende Tätigkeit (1,2)	1,0	21 °C (+/- 1 °C)

5.4.2.4 Energiesparpotential

Neben der thermischen Behaglichkeit sollen die Varianten auch auf ihr energetisches Einsparpotential hin untersucht werden. Die Simulationen sollen über den Zeitraum eines Jahres bei den in Holzkirchen bei München vorherrschenden Außenklimabedingungen durchgeführt werden. Für das jeweilige Nutzungsszenario sollen alle Parameterkombinationen mit dem folgenden Referenzfall verglichen werden:

- **Dämmvariante**: Ungedämmt
- **Heizungssystem**: Radiator
- **Betriebsmodus**: Kontinuierlich

Dieser Referenzfall wurde gewählt, da davon ausgegangen wird, dass er am ehesten den Gegebenheiten in einem unsanierten Altbau entspricht. Das Energieeinsparpotential wird berechnet als prozentuale Verbesserung einer Parameterkombination gegenüber dem Referenzfall.

5.4.3 Auswertung der Parameterstudie

Die Parameterstudie wird nun nach den soeben beschriebenen Kriterien ausgewertet. Zuerst werden dabei die betrachteten Konstruktionen auf Schadensfreiheit hin untersucht. Anschließend werden die thermische Behaglichkeit und das Energiesparpotential zunächst einzeln betrachtet und dann eine Methodik entwickelt, um die beiden Kriterien kombiniert zu bewerten. Daraus sollen Schlüsse gezogen werden, welche Parameterkombinationen für die jeweiligen Nutzungsszenarien den bestmöglichen Fall darstellen.

5.4.3.1 Schadensfreiheit

Um eine Bewertung der Schadensfreiheit vornehmen zu können, muss ein Bauteil erst im hygrischen Sinne eingeschwungen sein. Für die betrachteten Varianten mit EPS-Dämmplatten erwies sich ein Simulationszeitraum von 5 Jahren als ausreichend, um ausreichend eingeschwungene Bauteile zu gewährleisten. Da der längere Simulationszeitraum allerdings mit

hohem Rechenaufwand verbunden ist, wurden in Vorsimulationen einige für die Schadensbewertung nicht relevante Parameter bereits ausgeschlossen. Dazu zählen:

- **Zahl der Außenwände**: Die Westwand erwies sich als die stets kritischste (hohe Schlagregenbelastung), weshalb nur diese weiter betrachtet wird. Eine Unterscheidung in Fälle mit einer Außenwand und zwei Außenwände ist somit nicht nötig.
- **Außengedämmte Fälle**: Die außengedämmten Fälle dienen in diesem Projekt nur als Referenz hinsichtlich Behaglichkeitsbedingungen und Energiesparpotential im intermittierenden Betrieb gegenüber den innengedämmten Fällen und stehen daher nicht im Fokus der Bewertung. Auch ist gegenüber dem ungedämmten Ausgangszustand bei einer außenseitigen Dämmung der Außenwände kein erhöhtes Schadensrisiko zu erwarten. Um den Rechenaufwand zu verringern, werden die außengedämmten Fälle hier nicht mehr weiter untersucht.

Die Bewertung der übrigen, relevanten Parameterkombinationen erfolgt nach den vier in Kapitel 5.4.2.1 definierten Kriterien:

- Schimmelpilzrisiko auf der Innenoberfläche (relative Feuchte maximal 75%)
- Tauwasser in der Grenzschicht (maximal 200 g/m²)
- Frostgefahr in der Grenzschicht (Durchfeuchtung maximal 30%, relative Feuchte maximal 95%)
- Gesamtwassergehalt in der Grenzschicht

Die Gesamtergebnisse der Schadensbewertung inkl. möglicher Rückschlüsse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Alle betrachteten Fälle halten die definierten Kriterien für schadensfreie Konstruktionen ein
- **Schimmelpilzrisiko auf der Innenoberfläche:** Die relative Feuchte auf der Innenoberfläche der Außenwand liegt im Bereich von minimal 51% (hochgedämmte Fälle) bis maximal 67% (ungedämmter Fall). Das Schimmelpilzrisiko sinkt folglich mit höherer Dämmstoffdicke, da die Oberflächentemperaturen auf der Wandinnenseite steigen. Alle Werte liegen weit unter der relativen Feuchte von 75%, ab der eine detaillierte Untersuchung des Schimmelpilzwachstums durchgeführt werden würde. An dieser Stelle soll jedoch erwähnt werden, dass die hier durchgeführte, sehr einfache Betrachtung des Schimmelpilzwachstums keine Betrachtung von Wärmebrücken mit einbezieht. Aufgrund der geringeren Oberflächentemperaturen kommt es in der Realität häufig an diesen hier nicht beachteten „Schwachstellen“ zu Schimmelpilzwachstum. Um eine genauere Analyse durchführen zu können, muss daher der Einzelfall betrachtet werden.
- **Tauwasser in der Grenzschicht**: In der Grenzschicht fällt eine Tauwassermenge zwischen 28 g/m² (ungedämmte Fälle) und 59 g/m² (hochgedämmte Fälle) an. Somit

steigt die Tauwassermenge mit steigender Dämmstoffdicke, bleibt aber weit unterhalb des definierten Grenzwertes von 200 g/m² und ist damit als unkritisch zu betrachten.

- **Frostschadensrisiko in der Grenzschicht**: Gegenüber den ungedämmten Fällen (Durchfeuchtungsgrad minimal 19%, relative Feuchte minimal 54%) steigt das Frostschadensrisiko in der Grenzschicht mit zunehmender Dämmstoffstärke leicht an (Durchfeuchtung maximal 25%, relative Feuchte maximal 72%). Für alle betrachteten Varianten bleiben die Werte dennoch deutlich unter den Grenzwerten (Durchfeuchtungsgrad 30%, relative Feuchte 95%). Selbst ein Überschreiten dieser Grenzwerte würde bei frostsicherer Ausführung von Mauerwerk und Putz nicht zwingend zu Bauschäden führen.
- **Gesamtwassergehalt**: Der Wassergehalt in der Grenzschicht liegt für die ungedämmten Fälle bei minimal 2.8 kg/m³. Dieser Wert wird für die hochgedämmten Fälle zum Teil mehr als verdoppelt auf bis zu 5.9 kg/m³.

Obwohl es für die betrachteten Varianten zu keinen Grenzwertüberschreitungen kommt, zeichnen sich doch einige Trends für die verschiedenen Parametervariationen hinsichtlich der Schadensanfälligkeit ab. Diese sollen hier kurz zusammengefasst werden:

- Für höhere Dämmstoffdicken wird das Schimmelpilzrisiko an den Innenoberfläche gegenüber der ungedämmten Variante geringer, jedoch steigt das Schadensrisiko in der Grenzschicht zwischen Bestandsmauerwerk und Innendämmung. Die betrachteten Dämmvarianten mit maximal 8cm starker Innendämmung erweisen sich aber als unproblematisch.
- Vergleicht man die drei verschiedenen Heizsysteme Fußbodenheizung, Radiator und Wandheizung, so weist die Wandheizung aufgrund der höheren Oberflächen- und Bauteiltemperaturen in der Regel leicht verbesserte Ergebnisse hinsichtlich des Schadensrisikos auf.
- Das Aufbringen einer Low-E Beschichtung auf den Innenoberflächen bringt für die betrachteten Fälle keine signifikanten Vor- oder Nachteile bei der Vermeidung von Bauschäden.
- Bei einem kontinuierlichen Gebäudebetrieb wird die Außenwand dauerhaft mit beheizt, sodass ihre Temperatur höher liegt als bei einer Nachtabsenkung oder gar einer Beheizung nur bei Anwesenheit, wo die Bauteile immer wieder abkühlen. Dies macht intermittierend betriebene Gebäude prinzipiell etwas schadensanfälliger. Ausschlaggebend ist hier jedoch, wie weit das Temperaturen bei Abwesenheit fallen. In dieser Parameterstudie wurden die Raumtemperaturen auf minimal 16°C abgesenkt, um zu vermeiden, dass es durch zu lange Aufheizzeiten zu inakzeptablem Komforteinbußen kommt. Hinsichtlich der Schadensfreiheit bleiben innerhalb der betrachten Temperaturspanne alle betrachteten Konstruktionen schadensfrei. Der limitierende Faktor für die Schwankungsbreite des Raumklimas wird daher in der thermischen Behaglichkeit des Nutzers und nicht in der Schadensvermeidung gesehen.

Da alle betrachteten Varianten der Prüfung auf Schadensfreiheit standhalten, werden sie in den folgenden Kapiteln weiter hinsichtlich thermischer Behaglichkeit und Energiesparpotential untersucht.

5.4.3.2 Thermische Behaglichkeit im Sommer

Die Auswertung der Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2:2012-02 wurde für alle betrachteten Dämmvarianten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 5-24 zusammengefasst. Eine Lüftung mit lediglich einer Grundluftwechselrate von 0,5 h-1 ist nur für den ungedämmten Ausgangszustand zulässig. Für alle gedämmten Fälle wird schon ab der geringsten betrachteten Dämmstoffstärke von 2cm der Anforderungswert von maximal 1200 Kh/a überschritten.

Die Art der Dämmung spielt dabei nur eine marginale Rolle. Bei gleicher Dämmstoffdicke ist die Überhitzungshäufigkeit bei einer Außendämmung zwar ein wenig geringer als bei einer Innendämmung oder gar einer Innendämmung mit zusätzlich gedämmten Innenwänden, doch die Dicke der Dämmung spielt die maßgebliche Rolle.

Ein erhöhter Nachtluftwechsel ist nur für die ungedämmte Variante und für die 2cm außen- oder innengedämmten Varianten zulässig. Für höhere Dämmstoffdicken wird auch hier der Schwellwert von 1200 Kh/a überschritten. Ein erhöhter Tagluftwechsel hingegen erweist sich für alle betrachteten Dämmvarianten als genügend, um die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 zu erfüllen. Für die Bewertung der thermischen Behaglichkeit während der Heizperiode und des Energieeinsparpotentials werden also alle hier betrachteten Dämmvarianten weiter in Betracht gezogen.

Tab. 5-24: Übertemperaturgradstunden der unterschiedlichen Dämmstrategien bei 3 verschiedenen Lüftungsvarianten

Dämmvariante	Grundluftwechsel	Erhöhter Nachtluftwechsel	Erhöhter Tagluftwechsel
OD	559	199	93
AD2	3175	843	141
AD4	5568	1855	162
AD6	7509	2625	252
AD8	9021	3305	333
ID2	3258	1073	202
ID4	5789	2056	298
ID6	7725	2786	446
ID8	9305	3505	477
ID2 + IW	3526	1361	321
ID4 + IW	6205	2193	453
ID6 + IW	8218	3076	569
ID8 + IW	9780	3734	609

5.4.3.3 Thermische Behaglichkeit im Winter

Für die thermische Behaglichkeit im Winter ergaben sich für den kontinuierlichen Betrieb und die Nachtabsenkung kaum oder keine Probleme, die gewünschte operative Temperatur bei Anwesenheit eines Nutzers während der Heizperiode zu gewährleisten. Daher soll in diesem Kapitel lediglich im Detail darauf eingegangen werden, welche Auswirkungen die Beheizung allein bei Anwesenheit auf die thermische Behaglichkeit haben kann.

Die insgesamt fünf Nutzungsszenarien wurden in zwei Kategorien unterteilt, nämlich in ‚länger genutzte Räume' (NZ2 Schlafen und NZ5 Büro), sowie in ‚kürzer genutzte Räume' (NZ1 Küche, NZ3 Bad und NZ4 Wohnen). Diese unterscheiden sich in ihren grundlegenden Eigenschaften hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit.

Länger genutzte Räume

In die Kategorie der ‚länger genutzten Räume' fallen die Nutzungsszenarien 2 (Schlafen) mit einer Aufenthaltsdauer von 8 h jede Nacht und 5 (Büro) mit einer Aufenthaltsdauer von 10 h tagsüber. Beide zeichnen sich durch verhältnismäßig niedrige Operativtemperaturen aus, die den Komfortbereich ausmachen. Im Schlafzimmer wurde dieser definiert von 18 - 20 °C, im Arbeitszimmer von 20 - 22 °C.

In beiden Nutzungsszenarien wurde für alle betrachteten Dämmstandards die gewünschte minimale Operativtemperatur während der Anwesenheitszeit des Nutzers erreicht. Allerdings ergaben sich deutliche Unterschiede bei der benötigten Aufheizdauer, um den Zielwert zu erreichen. In Abb. 5-29 sind für die beiden Nutzungsszenarien jeweils die Aufheizphasen für drei verschiedene Dämmstandards an einem Tag im Januar dargestellt (ausgehend von einer Außenwand und Beheizung mit Radiator). Die rote Kurve stellt den ungedämmten Fall dar, die grüne eine Außendämmung von 8 cm und die blaue eine Innendämmung von 8 cm auf den Außenwänden.

Auffällig ist für beide Nutzungsszenarien die deutliche Verbesserung der Aufheizgeschwindigkeit der gedämmten Fälle gegenüber dem ungedämmten Fall. Im Schlafzimmer dauerte es im ungedämmten Fall rund 1,25 h, um die Temperatur von 16 °C auf die gewünschte Mindest-Temperatur von 18°C zu heben (für den hier nicht dargestellten Fall mit 2 Außenwänden waren es rund 1,75 h). In beiden gedämmten Fällen geschieht dies deutlich schneller, nämlich in rund 15 min (rund 20 min für zwei Außenwände). Ähnlich verhält es sich im Büro. Um von 16 °C auf 20 °C zu heizen, wurden im ungedämmten Fall 3,5 h (für zwei Außenwände rund 4 h) und für die gedämmten Fälle jeweils rund 30 min (35 min für zwei Außenwände) benötigt.

Vergleicht man die beiden gedämmten Fälle miteinander, so ergibt sich kaum ein Unterschied in der Aufheizgeschwindigkeit. Für das Schlafzimmer steigt die Operativtemperatur bis zum Erreichen der 18 °C-Grenze sowohl für die Innendämmung als auch für die Außendämmung gleich schnell. Erst ab einer Temperatur von ca. 19 °C ist zu erkennen, dass die Variante mit Innendämmung sich etwas schneller aufzuheizen beginnt. Für das Abkühlverhalten ist ein deutlicherer Unterschied zu erkennen: Die Variante mit Außendämmung kühlt langsamer ab und erreicht die Minimaltemperatur von 16 °C etwa zwei Stunden nach der innengedämmten

Variante. Für das Aufheizverhalten spielt dies im Nutzungsszenario Schlafen allerdings keine Rolle, da bis zum erneuten Aufheizen beide Varianten wieder auf dasselbe Ausgangs-Temperaturniveau von 16 °C fallen.

Für das Bürogebäude zeigt sich ein ähnliches Bild. Die beiden gedämmten Varianten erreichen den Zielwert von 20 °C fast zur gleichen Zeit. Die innengedämmte Variante beginnt aber aufgrund des veränderten Auskühlverhaltens auf einem niedrigeren Temperaturniveau als die außengedämmte Variante, welche die Speichermassen der massiven Außenwände mit nutzt und daher etwas weniger weit auskühlt. Während der Aufheizphase führt aber genau dieser Effekt dazu, dass sich die außengedämmte Variante aufgrund ihrer größeren thermischen Trägheit langsamer erwärmt als die innengedämmte Variante. Die Effekte des schnelleren Aufheizens für die Innendämmung und des langsameren Abkühlens der Außendämmung heben sich bis zum Erreichen des Zielwertes (20 °C) jedoch so gut wie auf.

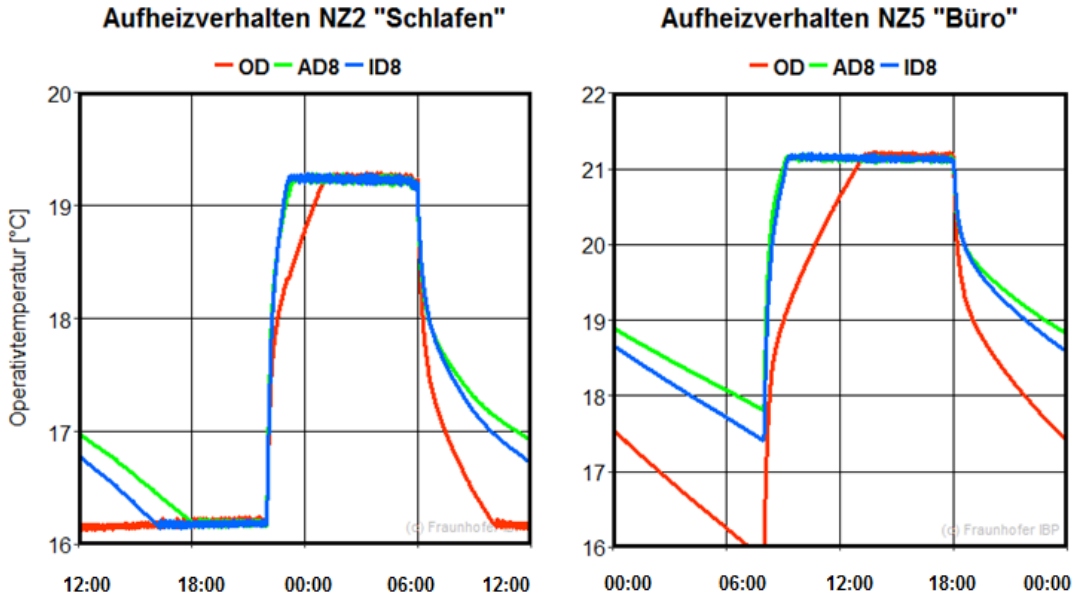


Abb. 5-29: Aufheizverhalten der länger genutzten Räume (NZ2 und NZ5) für einen Tag im Januar (Außentemperatur bei ca. -5°C). Ungedämmte Variante in rot, außengedämmte Variante in grün, innendgedämmte Variante in blau.

Für die beiden Nutzungsszenarien kann zusammenfassend gefolgert werden: Außendämmung und Innendämmungen derselben Dicke (hier dargestellt 8 cm) verbesserten die Aufheizgeschwindigkeit etwa im gleichen Maße. Dies gilt auch für den hier nicht dargestellten Fall der Innendämmung mit zusätzlicher Innendämmung der Innenwände. Für die ungedämmten Fälle befand sich die Operativtemperatur für beide Nutzungsszenarien zu lange außerhalb des komfortablen Bereichs. In den gedämmten Fällen hingegen konnte die Operativtemperatur zufriedenstellend schnell auf das gewünschte Niveau angehoben werden. In lediglich 3-5 % aller Anwesenheitsminuten während der Heizperiode lag die Operativtemperatur außerhalb des Komfortbereichs (bzw. 4-6 % für den hier nicht dargestellten, kritischeren Fall mit zwei Außenwänden). Daraus wird geschlossen, dass mit adäquater Dämmstoffdicke eine Beheizung der hier betrachteten Szenarien nur bei Anwesenheit eines Nutzers zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Allerdings soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die beiden hier betrachteten Nutzungsszenarien nicht nur die Eigenschaft teilen, dass der Nutzer sich für längere Zeiträume (8-10 h) in ihnen aufhält, sondern auch, dass die geforderten Operativtemperaturen recht gering sind (Minimalkriterium 18 °C bzw. 20 °C). Ausgehend von einer Temperatur von 16 °C ist es also kaum überraschend, dass es (im Gegensatz zu Nutzungsszenarien mit höheren Anforderungen an die Operativtemperatur) innerhalb von kurzer Zeit möglich ist, Raumklimabedingungen zu erreichen, die als zufriedenstellend einzustufen sind. Im Falle des Büros tritt der zusätzliche positive Effekt ein, dass die Auskühlzeit zwischen den genutzten Zeiträumen so gering war, dass für die gut gedämmten Fälle die Ausgangstemperatur nicht unter 17,5 °C gefallen ist. Sollte es zu längeren ungenutzten Phasen kommen (z. B. Wochenende), so wären andere Ausgangsbedingungen zu beachten, die die Aufheizzeit deutlich verlängern können.

Kürzer genutzte Räume

Zu den sogenannten ‚kürzer genutzten Räumen' zählen die Nutzungsszenarien 1 (Küche), 3 (Bad) und 4 (Wohnen). Der minimale Zielwert für die operative Temperatur in der Küche liegt mit 20 °C recht niedrig, für das Wohnzimmer mit 21 °C im normalen Bereich und für das Bad mit 22 °C höher als für die übrigen betrachteten Fälle. Ihre Nutzungsprofile unterscheiden sich von den bisher betrachteten kontinuierlichen Szenarien, da sie geprägt sind von mehreren (2-3), dafür aber kürzer genutzten Perioden je Tag. Die maximal betrachtete Aufenthaltsdauer beträgt für die Küche 1,25 h, für das Badezimmer lediglich 25 Minuten und für das Wohnzimmer rund 2 h. Abb. 5-30 zeigt das Aufheizverhalten dieser drei Nutzungsszenarien für einen Tag im Januar für vier Dämmvarianten (ausgehend von einer Außenwand und jeweils bei Beheizung nur bei Anwesenheit und mit Radiator). Der ungedämmte Fall ist in Rot, der 8 cm außengedämmte Fall in Grün und der 8 cm innengedämmte Fall in Blau dargestellt. Zusätzlich ist in Gelb noch die Variante mit 8 cm Innendämmung auf den Außenwänden und 2 cm Innendämmung auf den Innenwänden dargestellt.

Für die Küche gibt es drei Nutzungszeiträume pro Tag (morgens, mittags, abends). Für den längsten Nutzungszeitraum am Abend lagen die Operativtemperaturen nach ca. 1,25 h Aufheizzeit im ungedämmten Fall bei rund 18,5 °C. Eine Verbesserung kann für den Fall mit 8 cm Außendämmung (19 °C) und mit 8 cm Innendämmung (19,3 °C) festgestellt werden. Deutlich besser schneidet noch einmal der Fall mit zusätzlicher Innendämmung der Innenwände ab. Nach knapp 1 h wird die Mindestanforderung an die Operativtemperatur für dieses Szenario (20 °C) erreicht und damit ein deutlich schnelleres Aufheizverhalten erzielt. Ein ähnliches Bild ergibt sich für das Wohnzimmer (NZ4). Am Ende der längsten Aufenthaltszeit am Abend (2 h) wurde im ungedämmten Fall eine Operativtemperatur von 19 °C, im Fall von 8 cm Außendämmung von 20 °C und im Fall mit 8 cm Innendämmung von rund 20,5 °C erreicht. Auch hier liefert der Fall mit zusätzlicher Innenwanddämmung das deutlich beste Ergebnis. Die minimal gewünschte Operativtemperatur von 21 °C wurde innerhalb des Heizintervalls erreicht, wenn auch erst nach rund 1,5 h.

Für beide Nutzungsszenarien kann beobachtet werden, dass der Temperaturanstieg direkt nach Beginn der Beheizung für alle betrachteten Dämmvarianten zunächst sehr ähnlich verläuft. Im ungedämmten Fall steigt die Temperatur allerdings bereits ab Erreichen von rund

18 °C deutlich langsamer an. Dasselbe gilt für die Fälle ID8 und AD8 ab einer Temperatur von rund 19 °C, wobei sich der innengedämmte Fall nach wie vor etwas schneller erwärmte. Die Variante ID8+IW hingegen steigt auch bei Temperaturen über 19 °C noch deutlich schneller an als die übrigen und liefert daher auch die zufriedenstellendsten Ergebnisse.

Dieses Verhalten kann wie folgt erklärt werden: Die operative Temperatur wird beschrieben als das arithmetische Mittel aus Raumlufttemperatur und mittlerer Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen. Es kann davon ausgegangen werden, dass zu Beginn der Aufheizzeit zunächst v.a. die schneller reagierende Lufttemperatur einen Anstieg der Operativtemperatur hervorruft. Die Temperatur der umgebenden Flächen reagiert etwas langsamer und spielt somit erst mit zunehmender Beheizungszeit eine größere Rolle. Je mehr Speichermasse erwärmt werden muss, desto langsamer steigt die Oberflächentemperatur an. Durch Anbringung von Innendämmung sowohl an den Außen- als auch an den Innenwänden muss nur noch ein Minimum an thermischer Speichermasse erwärmt werden, sodass das Aufheizen deutlich schneller vonstattengeht, als beispielweise für den außengedämmten Raum. Betrachtet man das Nutzungsszenario Bad, so fällt auf, dass für die vorliegenden Nutzungszeiträume (25 min) für alle Dämmvarianten die Aufheizgeschwindigkeit deutlich zu gering ist, um den Zielwert für die operative Temperatur zu erreichen. Am Ende der Nutzungszeit liegen die erreichten Temperaturen immer noch recht nahe beisammen zwischen 18 °C (OD) und 18,8 °C (ID8+IW). Diese Werte liegen deutlich unterhalb des definierten Komfortbereiches von 22-24 °C und stellen damit inakzeptable Raumklimabedingungen dar.

Zusammenfassend kann für die drei ‚kürzer genutzte Räume' festgestellt werden, dass auch mit der bestmöglichen Dämmvariante (ID8+IW) bei Außentemperaturen von rund -5 °C die gewünschten Operativtemperaturen im Innenraum gar nicht oder erst gegen Ende der längsten Anwesenheitszeit erreicht werden können. Eine Beheizung nur bei Anwesenheit kann also unter den hier untersuchten Bedingungen (Abkühlung für alle Szenarien auf bis zu 16 °C) für die kürzer genutzten Räume als nicht geeignet eingestuft werden. Insbesondere die Kombination von sehr kurzen Aufenthaltszeiten und hohen Anforderungen an die Operativtemperatur, wie sie beispielsweise für NZ3 (Bad) anzufinden ist, erweist sich als problematisch bei der Beheizung nur bei Anwesenheit eines Nutzers.

Der prozentuale Anteil der Anwesenheitsminuten im Komfortbereich liegt über das Jahr gesehen für das Wohnzimmer bei höchstens 83 %, für die Küche bei maximal 80 % und für das Bad nur bei höchsten 39 %. Für den hier nicht dargestellten Fall mit zwei Außenwänden liegt dieser Prozentsatz jeweils noch einmal rund 1-3 % niedriger. Aufgrund dieser nicht zufriedenstellenden Ergebnisse für die drei kurz genutzten Raumtypen wurde für die oben dargestellten Dämmvarianten (OD, AD8, ID8, ID8+IW) noch einmal exemplarisch das Profil für die Beheizung bei Anwesenheit variiert. Eine Abkühlung auf bis zu 16 °C ist nur noch während der Nacht zulässig (5:30 Uhr bis 23:00 Uhr). Zwischen den Nutzungspeaks tagsüber darf die Temperatur nur noch auf minimal 18 °C (bzw. auf minimal 20 °C) fallen. Das Aufheizverhalten der vier Varianten wurde wiederum verglichen um festzustellen, ob durch diese Maßnahme eine nennenswerte Verbesserung der thermischen Behaglichkeit festgestellt werden kann. Die Ergebnisse dieser Anpassungen sind in Abb. 5-31 grafisch dargestellt.

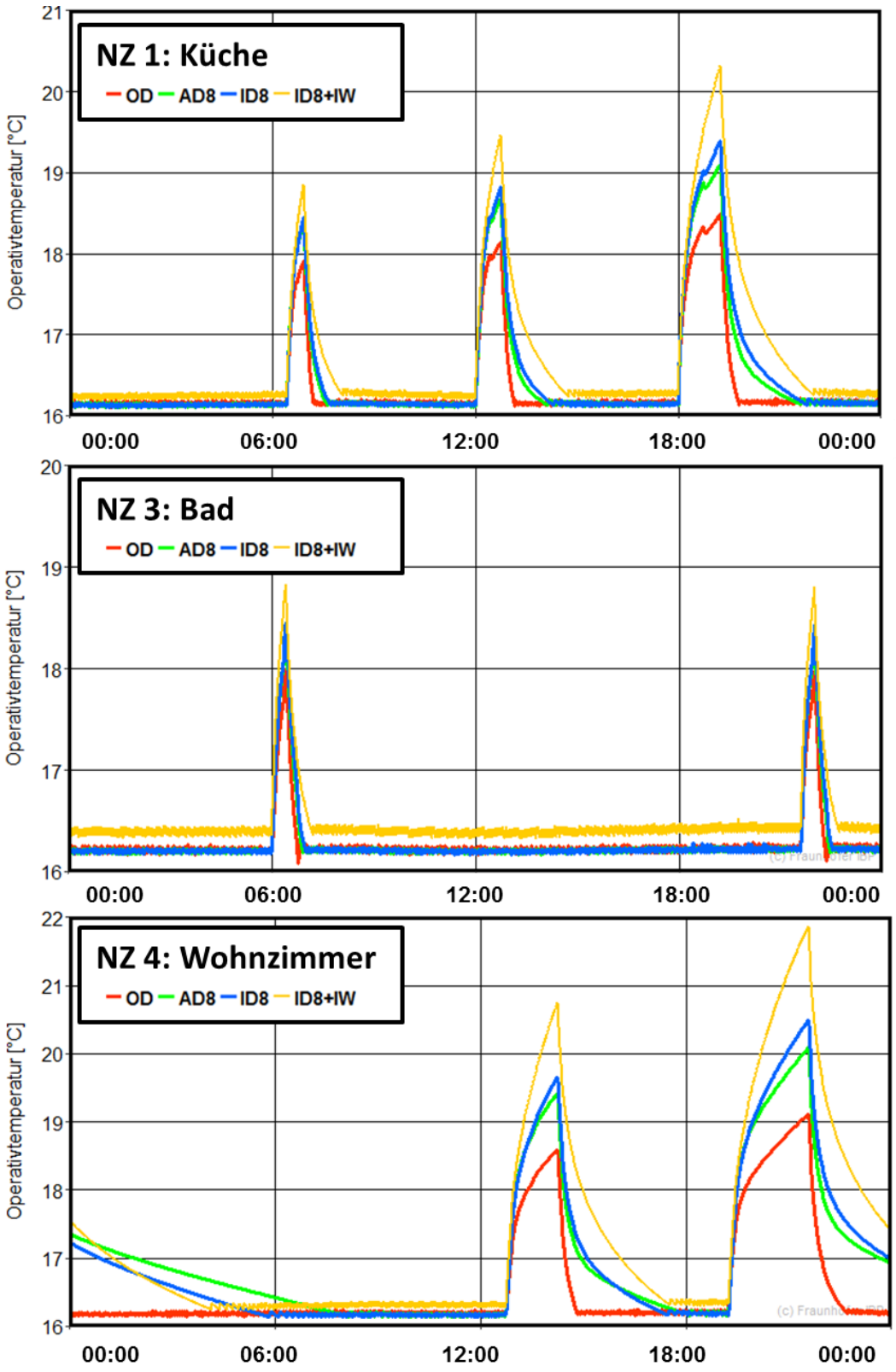


Abb. 5-30: Aufheizverhalten der ‚kürzer genutzten Räume' (NZ1, NZ3, NZ4) für einen Tag im Januar (Außentemperatur bei ca. -5 °C). Ungedämmte Variante in rot, außengedämmte Variante in grün, innengedämmte Variante in blau, innengedämmt + Innendämmung auf den Innenwänden gelb.

Diese Erhöhung der minimal erlaubten Operativtemperatur tagsüber bei Abwesenheit des Nutzers lieferte folgende Ergebnisse:

- **NZ1 - Küche**: Wird die Temperatur tagsüber auf minimal 18 °C gesenkt, so kann für den Fall ID8+IW über das Jahr gesehen in über 90 % der Anwesenheitsminuten die gewünschte Operativtemperatur eingehalten werden.
- **NZ3 – Bad**: Eine Begrenzung der minimal erlaubten Temperatur auf tagsüber 18 °C hat aufgrund der hohen Anforderungen an die Operativtemperatur (mindestens 22 °C) im Zusammenspiel mit den kurzen Aufenthaltszeiten (maximal 25 min) kaum positiven Einfluss auf die Anwesenheitsminuten innerhalb des Komfortbereichs. Erst, wenn das Badezimmer auch außerhalb der Nutzung auf mindestens 20 °C geheizt wird, tritt eine deutliche Verbesserung ein. Die thermische Behaglichkeit kann in diesem Fall in bis zu 82 % (ID8+IW) der Anwesenheitsminuten gewährleistet werden.
- **NZ4 – Wohnen**: Bei einer Abkühlung auf bis zu 18 °C liegen 90 % der Anwesenheitsminuten innerhalb des Komfortbereich (Annahme der Dämmvariante ID8+IW).

Daraus lässt sich folgender Grundsatz für alle fünf betrachteten Nutzungsszenarien formulieren: Um zu gewährleisten, dass die operativen Temperaturen sich bei Anwesenheit ausreichend schnell erhöhen und sich zu mehr als 80 % der Anwesenheitsminuten innerhalb des Komfortbereichs befinden, müssen die Räume tagsüber auch bei Abwesenheit der Nutzer ausreichend temperiert werden. Die operative Temperatur bei Abwesenheit sollte höchsten 2-3 °C unterhalb der gewünschten operativen Temperatur bei Anwesenheit liegen. Je kürzer die zu erwartenden Aufenthaltszeiten und je höher die Anforderungen an die operative Temperatur sind, desto größer werden die Behaglichkeitseinbußen, selbst bei einer Temperaturabsenkung um lediglich 2-3 °C unter die gewünschte operative Temperatur.

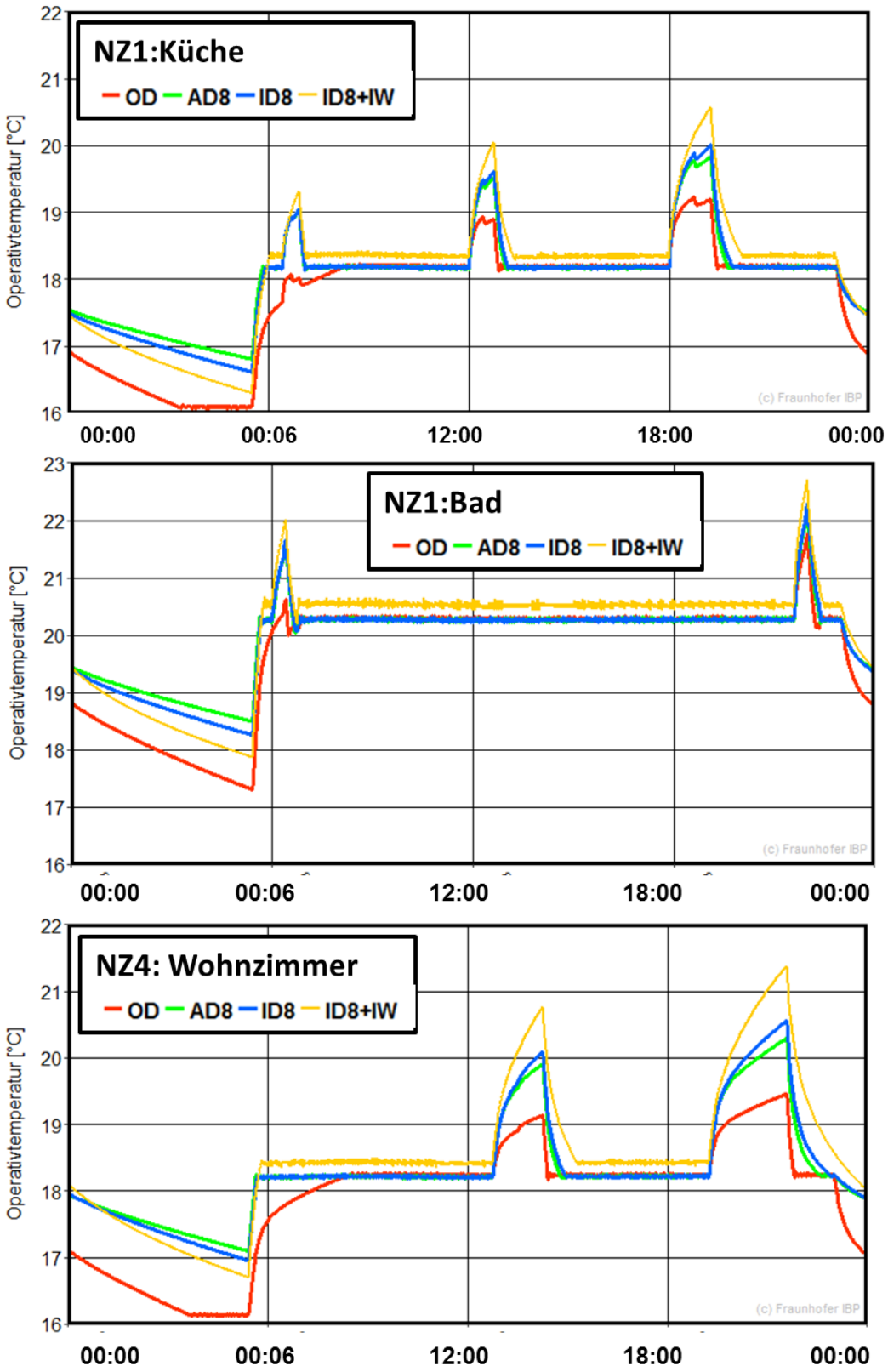


Abb. 5-31: Aufheizverhalten der ‚kürzer genutzten Räume' (NZ1, NZ3, NZ4) für einen Tag im Januar (Außentemperatur bei ca. -5 °C). Ungedämmte Variante in rot, außengedämmte Variante in grün, innengedämmte Variante in blau, innengedämmt + Innendämmung auf den Innenwänden gelb. Anpassung der minimalen Temperatur tagsüber auf 18 °C (NZ1, NZ4) bzw. 20 °C (NZ3).

5.4.3.4 Energiesparpotential

In diesem Kapitel wird für alle fünf Nutzungsszenarien beschrieben, welche Rückschlusse sich durch die Variation der Anzahl der Außenwände, der Dämmvariante, des Heizsystems und des Betriebsmodus auf den Energieverbrauch ziehen lassen. Ein Überblick über die Energiesparpotentiale der verschiedenen Nutzungsszenarien ist noch einmal in Anhang A.5.5 gegeben.

Anzahl der Außenwände

Tab. 5-25 gibt einen Überblick darüber, wie viel Heizenergie maximal (Referenzfall) bzw. minimal für jedes Nutzungsszenario verbraucht wurde, sowohl bei der Annahme von einer Außenwand (AW1) als auch von zwei Außenwänden (AW2). Zusätzlich wird jeweils die prozentuale Einsparung des energetisch besten Falls gegenüber des Referenzfalls angegeben und die Dämmvariante, für die dies der Fall war. Den Referenzfall stellt jeweils die ungedämmte Variante im kontinuierlichen Betrieb mit Radiator dar. Als energetisch beste Variante erwies sich eine Dämmung von 8 cm (kaum Unterschiede zwischen Außendämmung, Innendämmung oder Innendämmung mit zusätzlicher Innendämmung der Innenwände), jeweils im Fall von Beheizung nur bei Anwesenheit und mit Radiator.

Tab. 5-25: Gegenüberstellung des Referenzfalls und der Parameterkombination mit den größtmöglichen Energieeinsparungen jeweils für 1 und für 2 Außenwände.

NZ	AW1		AW2	
	Referenzfall	**Max. Einsparung**	**Referenzfall**	**Max. Einsparung**
Küche	165 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	55 kWh/(m²a) (67%) ID8 / ID8+IW / AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.	298 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	83 kWh/(m²a) (72%) ID8 / ID8+IW / AD8 jeweils RAD+ Anwesenh
Schlafen	153 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	66 kWh/(m²a) (57%) ID8 / ID8+IW/ AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.	265 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	98 kWh/(m²a) (63%) ID8 / ID8+IW/ AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.
Bad	222 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	72 kWh/(m²a) (68%) ID8 / ID8+IW / AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.	380 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	100 kWh/(m²a) (74%) ID8 / ID8+IW / AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.
Wohnen	196 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	71 kWh/(m²a) (64%) ID8 / ID8+IW / AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.	342 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	100 kWh/(m²a) (71%) ID8 / ID8+IW / AD8 jeweils RAD+ Anwesenh.
Arbeiten	164 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	63 kWh/(m²a) (62%) ID8 / ID8+IW jeweils RAD+ Anwesenh.	298 kWh/(m²a) OD-RAD-Kontin.	93 kWh/(m²a) (69%) ID8 / ID8+IW jeweils RAD+ Anwesenh.

Vergleicht man die Fälle mit einer Außenwand mit denen mit zwei Außenwänden, so fällt auf, dass im ungedämmten Fall für zwei Außenwände 70-80 % mehr Heizenergie benötigt wird, als für den Fall mit einer Außenwand. In der bestmöglich gedämmten Variante (8 cm) werden

lediglich 40-50 % mehr Heizenergie benötigt. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass prozentual betrachtet das Einsparvermögen bei Räumen mit zwei Außenwänden größer ist, als in Räumen mit einer Außenwand (im Bereich von 5 % - 7 %).

Dämmvariante

Betrachtet man die verschiedenen Dämmvarianten hinsichtlich des Energieverbrauchs, so ist zu erkennen, dass hohe Dämmstoffdicken (8 cm) durchweg die höchsten Energieeinsparungen mit sich bringen. Dabei spielte es in den simulierten Fällen bei gleicher Dämmstoffdicke keine oder kaum eine Rolle, ob die Wände innen oder außen gedämmt wurden. Allerdings sollte die Tatsache beachtet werden, dass WUFI® Plus Wärmebrückeneffekte nicht mit in die Simulation einbezieht. Da diese bei Innendämmungen stets größeren Einfluss haben als bei Außendämmungen, ist in der Realität davon auszugehen, dass bei gleicher Dämmstoffdicke und ohne die Beachtung zusätzlicher Bewertungskriterien stets die Außendämmung höhere energetische Einsparungen ermöglicht.

Der Effekt, dass bei Innendämmungen das zusätzliche Energiesparpotential mit zunehmender Dämmstoffdicke sinkt ist bereits hinreichend bekannt. Dieses Phänomen bestätigte sich für die untersuchten Parameterkombinationen. So betragen beispielsweise für alle Nutzungsszenarien die zusätzlichen Einsparungen bei einer Innendämmung von 6 cm Dicke statt 4 cm Dicke noch 4-5 %. Bei 8 cm statt 6 cm sind es nur noch 2-3 %. Im Vergleich dazu können bei einer Innendämmung von 2 cm gegenüber der ungedämmten Variante noch bis zu 20-30 % mehr Energie gespart werden. Der Mehrwert der sinkenden zusätzlichen Energieersparnisse bei zunehmender Dämmstärke sollte also stets abgewogen werden gegen die negativen Effekte, die höhere Dämmstoffdicken mit sich bringen können (Platzverlust, Gefahr der Taupunktunterschreitung, Wärmebrückeneffekte).

Weitere untersuchte Variationen des Dämmstandards beinhalteten nicht nur die Dämmstoffdicke, sondern auch die zusätzliche Innendämmung der Innenwände (2 cm) und die Aufbringung von Low-E-Beschichtungen. Die zusätzliche Innendämmung der Innenwände brachte keine Veränderung des Energieeinsparpotentials mit sich. Aus rein energetischen Gesichtspunkten sind der Mehraufwand und der Platzverlust, den diese Maßnahme mit sich bringen würde, also nicht gerechtfertigt. Das Aufbringen einer Low-E-Beschichtung auf den Innenoberflächen (Wände und Decke) brachte gemischte Resultate. In Verbindung mit einer Innendämmung von 8 cm hatte sie keinen bzw. einen leicht negativen Effekt auf die Energiebilanz. Bei Aufbringung einer Low-E-Beschichtung auf die ungedämmten Außenwände hingegen spielte die Art des Beheizungssystems eine Rolle. Bei der Wahl einer Wandheizung hatte die Low-E-Beschichtung einen negativen Effekt (2 - 6 % mehr Energieverbrauch). Auf die Beheizung mit Fußbodenheizung (+1-4 %) und Radiator (+4-6 %) hatte sie leicht positive Auswirkungen.

Heizungssystem

Die drei Heizungstypen (Fußbodenheizung, Wandheizung, Radiator) hatten in allen betrachteten Varianten stets dieselbe maximale Nennleistung zur Verfügung, um ihre Vergleichbarkeit zu gewährleisten (z. B. 1,6 kW im Fall einer Außenwand). Vergleicht man ausschließlich den Energieverbrauch der drei Heizungssysteme, so ist es auffällig, dass der

Radiator, unabhängig vom Betriebsmodus, stets etwas besser abschneidet, als die beiden Flächenheizsysteme. Im Rahmen dieser Arbeit standen keine Informationen zur Verfügung, welche die Effizienz verschiedener elektrischer Heizsysteme in der Realität gegenüberstellen. Eine Erklärung für die etwas schlechtere Energiebilanz der Flächenheizkörper in WUFI® Plus ist jedoch, dass sie im Gegensatz zum Radiator stets einen Teil der eingebrachten Energie nach außen verlieren. Der Radiator befand sich als Bauteil vollständig innerhalb der Zone und gibt somit auch die in ihn eingebrachte Energie vollständig an die Zone ab.

Die Flächenheizsysteme hingegen haben immer gewisse Wärmeverluste, im Fall der Fußbodenheizung nach unten und im Fall der Wandheizung nach außen. Da der Fußbodenaufbau stets unverändert blieb, bleiben auch die Wärmeverluste nach unten stets ähnlich. Im Verglich zu den Einsparungen, die mit dem Radiator möglich sind, schneidet die Fußbodenheizung für alle gewählten Dämmvarianten rund 5-6 % schlechter ab. Vergleicht man allerdings die Verluste der Wandheizung bei verschiedenen Dämmstoffdicken, so erkennt man, dass der Energieverlust nach außen hin immer geringer wird, je höher die Dämmstoffdicke gewählt wird. Bei einer Innendämmung von 8 cm beträgt er nur noch 3 %, während er bei 2 cm noch um die 8 % und im ungedämmten Fall gar 20 % oder mehr betrug. Für die hier verwendeten Modelle kann daraus geschlossen werden, dass aus energetischer Sicht die Beheizung durch den Radiator am effektivsten ist, da es hier zu keinen direkten Energieverlusten nach außen kommt. Mit zunehmender Dämmstoffdicke verbessert sich allerdings die Leistung der Wandheizung, sodass die Verluste bei 8 cm Innendämmung bereits gering sind (etwa 3 %).

Betriebsvarianten

Für die drei Betriebsvarianten (kontinuierliche Beheizung, Nachtabsenkung, Beheizung nur bei Anwesenheit) konnten folgende Zusammenhänge festgestellt werden: Gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb werden die zusätzlichen Einsparungen, die durch Nachtabsenkung oder Beheizung nur bei Anwesenheit erzielt werden können, mit zunehmender Dämmstärke stets geringer. In der ungedämmten Variante konnten durch eine Nachtabsenkung in den verschiedenen Nutzungsszenarien Einsparungen gegenüber dem kontinuierlichen Betrieb erzielt werden, die im Bereich von 5-10 % lagen. Bei einer Innendämmung von 8 cm lagen sie dagegen nur noch im Bereich von 2-4 %. Weitaus höhere Einsparungen lassen sich durch die Beheizung nur bei Anwesenheit erzielen. Für die länger genutzten Räume (Büro, Schlafzimmer) lagen die Einsparungen bei 15-20 % im ungedämmten Fall und bei 6-8 % im Fall mit 8 cm Innendämmung. Noch größer sind die Einsparungen, die in den kürzer genutzten Räumen (Küche, Bad, Wohnzimmer) erreicht werden konnten, nämlich 30-40 % im ungedämmten Fall und 13-19 % im innengedämmten Fall. Aufgrund unbefriedigender Ergebnisse bei der Bewertung der thermischen Behaglichkeit wurde für die drei kürzer genutzten Räume die Temperatur bei Abwesenheit auf 18 °C (für Küche und Wohnzimmer) bzw. 20 °C (für das Bad) angehoben. Durch diese Maßnahme sanken die möglichen Energieeinsparungen für den innengedämmten Fall um 2-3 % (18 °C) bzw. 9 % (20 °C). Vergleicht man nach dieser Maßnahme den Energieverbrauch von Nachtabsenkung und Beheizung bei Anwesenheit miteinander, so führt für die bestgedämmte Variante eine Beheizung nur bei Anwesenheit immer noch zu Ersparnissen von 8-9 % für alle Nutzungsszenarien. Gegenüber dem

kontinuierlichen Betrieb lassen sich im bestgedämmten Fall sogar 13-15 % allein durch die Änderung der Betriebsvariante hin zum intermittierenden Betrieb einsparen.

5.4.3.5 Kombinierte Betrachtung von Energieeinsparung und Komfort

Für die untersuchten Parameter hat sich ergeben, dass die Beheizung nur bei Anwesenheit eines Nutzers hohe energetische Einsparpotentiale mit sich bringt. Je kürzer die Nutzung eines Raumes üblicherweise ist, desto größer wird das Energieeinsparpotential, das sich durch die Beheizung nur bei Anwesenheit gegenüber den anderen betrachteten Betriebsmodi erzielen lässt. Auf der Kehrseite bringen diese Energieeinsparungen jedoch auch Einbußen in der thermischen Behaglichkeit mit sich. Diese sind oft so gravierend, dass sie als nicht akzeptabel beurteilt werden müssen. Daraus wird die Notwendigkeit deutlich, die beiden Bewertungskriterien kombiniert zu betrachten, um eine ideale Kombination von Dämmstrategie und Betriebsmodus für jedes Nutzungsszenario zu definieren.

Jede Parameterkombination muss zunächst ein Mindestkriterium an die thermische Behaglichkeit erfüllen, um für die kombinierte Auswertung in Betracht gezogen zu werden. Das Mindestkriterium soll sein, dass mindestens 80% der jährlichen Anwesenheitsminuten innerhalb des Komfortbereichs liegen. Alles darunter wird als für den Nutzer unzumutbar angenommen. Für alle Parameterkombinationen wird anschließend eine Auswertung nach folgendem Punktesystem vorgenommen: Eine Variante kann im Optimalfall eine Höchstpunktzahl von 200 Punkten erreichen. 100 Punkte beziehen sich hierbei auf die Bewertung der Energieeinsparungen und 100 Punkte auf die Bewertung der Behaglichkeit. Für die Bewertung der Energieeinsparungen wird berechnet, wie groß der prozentuale Anteil der Einsparungen für die derzeitige Variante verglichen mit den maximal möglichen Einsparungen des Nutzungsszenarios ist. Die Bezugswerte für die maximal möglichen Einsparungen können Anhang A.5.5entnommen werden (grün hinterlegte Variante). Die maximal möglichen 100 Punkte für die thermische Behaglichkeit entsprechen dem prozentualen Anteil der Anwesenheitsminuten innerhalb des Komfortbereichs. Für jedes Nutzungsszenario werden nun auf Grundlage dieser Bewertung Empfehlungen für die beste Parameterkombination ausgesprochen. Die Auswertungsergebnisse aller Parameterkombinationen sind außerdem in Anhang A.5.5 (tabellarisch) bzw. in Anhang A.5.6 (grafisch) dieses Berichts zu finden.

Küche

Für das Nutzungsszenario Küche erzielte die Variante ID8+IW bei einer Beheizung bei Anwesenheit (Absenkung bis auf 18 °C) insgesamt die höchste Bewertung (189 Punkte für eine Außenwand, 191 Punkte für zwei Außenwände). Bei gleichem Betrieb schneiden die Dämmvarianten ID8 und AD8 über das Jahr gesehen etwas schlechter ab. Die Unterschiede ergaben sich nicht aus den Energieeinsparungen (in allen drei Fällen etwa gleich), sondern aus dem schnelleren Aufheizverhalten der Variante mit innengedämmten Innenwänden, wodurch die Anzahl der Anwesenheitsminuten im Komfortbereich erhöht werden konnte. Dieselben Dämmvarianten (ID8+IW, ID8, AD8) schnitten auch für den Betriebsmodus Nachtabsenkung gut ab, da die thermische Behaglichkeit hier bei Anwesenheit durchweg gewährleistet ist. Allerdings werden rund 8 % weniger Energie eingespart, als für die Beheizung nur bei Anwesenheit.
Es kann für das hier untersuchte Szenario die Empfehlung ausgesprochen werden, eine Innendämmung von 8 cm mit zusätzlicher Innendämmung auf den Innenwänden (2 cm) zu

wählen. Wird eine Beheizung nur bei Anwesenheit gewählt, könnten verglichen zum Referenzfall (ungedämmt, kontinuierlich) bis zu 64 % Energie gespart werden, während sich lediglich 8 % der Anwesenheitsminuten außerhalb des Komfortbereichs bewegen. Dies wird als akzeptabel eingeschätzt. Es wird nicht empfohlen, eine geringere Dämmstoffdicke zu wählen (3-4 % weniger Energiesparpotential) oder die Innendämmung der Innenwände zu vernachlässigen (ähnliche Energieeinsparungen, aber deutlich schlechteres Aufheizverhalten).

Schlafen

Im Schlafzimmer kann ebenfalls die Möglichkeit genutzt werden, nur bei Anwesenheit eines Nutzers zu heizen. Die relativ geringen Anforderungen an die Operativtemperaturen (Komfortbereich von 18-20 °C) ermöglichen ein Absenken der Temperatur tagsüber auf bis zu 16 °C bei nur minimalen Komfortverlusten. Für die Dämmvarianten ID8, ID8+IW und AD8 liegen über 99 % aller Anwesenheitsminuten im behaglichen Bereich (sowohl für eine als auch für zwei Außenwände). Die Energieeinsparungen gegenüber dem Referenzfall betragen rund 57 % (für zwei Außenwände 63 %) für diese drei Dämmvarianten, was gleichzeitig auch den maximal möglichen, hier untersuchten Energieeinsparungen entspricht. Die Dämmvarianten ID8, ID8+IW und AD8 erhalten also eine Punktzahl zwischen 199 und 200.

Da sich die Heizprofile für die Beheizung bei Anwesenheit und die Nachtabsenkung für dieses Nutzungsszenario sehr ähneln, führen diese auch zu sehr ähnlichen Ergebnissen (alle Varianten mit Nachtabsenkung 197 Punkte). Dennoch wird zu einer Beheizung bei Anwesenheit geraten, da hier eventuelle Änderungen im Nutzungsverhalten (z. B. späteres Zubettgehen und Aufstehen an Wochenenden) in der Realität besser berücksichtigt werden können. Eine geringere Dämmstoffdicke (z. B. 6 cm) führt immer noch kaum zu Behaglichkeitseinbußen, allerdings zu rund 3 % geringeren Energieeinsparungen. Lassen die Platzverhältnisse es zu, sollte also eine Dämmstärke von 8 cm gewählt werden. Von einer zusätzlichen Innendämmung der Innenwände wird abgeraten, da sie weder zu weniger Energieverbrauch noch zu geringen Behaglichkeitsverlusten führt. Der Mehraufwand ihrer Aufbringung und der zusätzlichen Platzverlust wären nicht gerechtfertigt.

Insgesamt kann also empfohlen werden, für das Schlafzimmer eine Beheizung bei Anwesenheit mit Radiator und eine Dämmstoffdicke von 8 cm zu wählen. Wann immer eine Außendämmung möglich ist, sollte diese selbst bei instationärer Beheizung gewählt werden, da bei ihr die bauphysikalischen Risiken der Innendämmung entfallen. Da diese Arbeit die Potentiale von Gebäuden abschätzen soll, bei denen eine Außendämmung nicht möglich ist, soll nachfolgend dennoch die Variante mit 8 cm Innendämmung weiter betrachtet werden.

Bad

Das Badezimmer nimmt unter den hier betrachteten Nutzungsszenarien eine Sonderstellung ein. Da es sowohl die kürzesten Aufenthaltszeiten (max. 25 min) als auch die höchsten geforderten Operativtemperaturen (Komfortberiech von 22-24 °C) aufweist, stellte es sich als kritisch heraus, hier nur bei Anwesenheit zu beheizen. Selbst bei einer Absenkung der Temperatur tagsüber auf minimal 20 °C kann die gewünscht Operativtemperatur nur zu etwa 80 % der Anwesenheitsminuten erreicht werden. Dies wird als nicht akzeptabel eingestuft. Daher wird zu einem Betrieb mit Nachtabsenkung geraten. Obwohl in diesem Fall rund 9 %

weniger Energie eingespart werden kann als für die Beheizung bei Anwesenheit, kann die Behaglichkeit des Nutzers für die Dämmvarianten ID8, ID8+IW und AD8 zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden. Dies führt auch zu höheren Gesamtpunktzahlen für die Nachtabsenkung (186-196) gegenüber der Beheizung nur bei Anwesenheit (maximal 180).

Im Betrieb mit Nachtabsenkung brachte die Innendämmung der Innenwände keine zusätzlichen Gewinne und ist daher nicht empfehlenswert. Eine geringere Dämmstoffdicke (z. B. 6 cm) führte wie auch schon in den vorherigen Nutzungsszenarien zu rund 3 % weniger Energieeinsparungen. Wenn eine Außendämmung möglich ist, sollte diese in jedem Fall ausgeführt werden. Wenn dies nicht möglich ist und stattdessen innengedämmt werden muss, sollte, wann immer es die Platzverhältnisse zulassen, eine Innendämmung von 8 cm gewählt werden.

Wohnen

Die Ergebnisse des Nutzungsszenarios Wohnen ähneln denen des Nutzungsszenarios Küche. Für die Dämmvariante ID8+IW konnte bei einer Beheizung nur bei Anwesenheit (Absenkung der Temperatur bis auf 18 °C) die höchste Gesamtpunktzahl erreicht werden. Im Fall von einer Außenwand liegt diese bei 190, im Fall von zwei Außenwänden bei 187 Punkten. Für beide Szenarien konnte die thermische Behaglichkeit, auch bei der Beheizung nur bei Anwesenheit, für über 90 % der Anwesenheitsminuten gewährleistet werden. Gegenüber dem Referenzfall konnten 63 % (eine Außenwand) bzw. 68 % (zwei Außenwände) an Energie eingespart werden. Sowohl die Dämmvarianten ID8 als auch AD8 weisen zwar ein ähnliches Einsparpotential auf, schneiden durch ihr langsameres Aufheizverhalten im Winter insgesamt aber etwas schlechter für die Beheizung bei Anwesenheit ab.
Dieselben Dämmvarianten mit Nachtabsenkung stellen zwar wiederum die Behaglichkeit im Wohnzimmer zu jedem Zeitpunkt sicher, allerdings lassen sich hierdurch auch 8-10 % weniger Energie sparen. Wie für die Küche wird also auch für das Wohnzimmer die Empfehlung ausgesprochen, die Dämmvariante ID8+IW zu wählen. Eine Beheizung nur bei Anwesenheit ist mit noch akzeptablen Einbußen in der thermischen Behaglichkeit verbunden, wenn die Temperatur auf minimal 18 °C abgesenkt wird.

Arbeiten

Für das Arbeitszimmer können prinzipiell dieselben Aussagen getroffen werden wie für das Schlafzimmer. Eine intermittierende Beheizung nur bei Anwesenheit stellt sich aus Sicht der Behaglichkeit als unkritisch heraus (weniger als 1 % der Anwesenheitsminuten außerhalb des Komfortbereiches). Die drei Dämmvarianten ID8, ID8+IW und AD8 erreichen ein Ergebnis nahe der Höchstpunktzahl von 200. Allerdings waren für den hier betrachteten Fall die Abkühlzeiten so gering, dass die Temperatur bis zur erneuten Beheizung niemals unter 17,5 °C fiel. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Operativtemperatur nach längeren ungenutzten Zeiträumen (z. B. Wochenende) länger braucht, um den Zielwert zu erreichen.

Die Innendämmung der Innenwände bringt keine zusätzlichen Vorteile. Eine geringere Dämmstoffdicke von 6 cm führte zu rund 3 % geringeren Energieeinsparungen. Wo außengedämmt werden kann, sollte auch im instationären Betrieb außengedämmt werden. Wo innengedämmt werden muss, sollte eine Dämmstoffdicke von 8 cm gewählt werden.

5.4.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten

Um zu überprüfen, als wie realitätsnah die Ergebnisse der Parameterstudie eingestuft werden können, werden wiederum Messdaten aus der Klimakammer in Stuttgart zurate gezogen. Wie in Kapitel 5.2.3 dieses Berichtes erwähnt, wurde speziell um die Vorteile des intermittierenden Betriebs zu untersuchen, drei „realere Nutzungsszenarien“ messtechnisch untersucht. Deren Ergebnisse hinsichtlich Energiesparpotential sollen nun noch einmal betrachtet und mit den Simulationsergebnissen der oben durchgeführten Parameterstudie in WUFI® Plus verglichen werden.

Abb. 5-32 vergleicht den Verlauf der Raumlufttemperaturen im „Testraum für Innendämmungen“ (rot) und im validierten WUFI® Plus Modell des Modellraums (grün) für jeweils einen Tag. Bis auf die schon in Kapitel 4 erwähnte weniger schnelle Auskühlung des Modells, insbesondere bei Temperaturen unter 19°C, stimmen die Verläufe sehr gut überein.

Zusätzlich sind in Tab. 5-26 die benötigten Heizenergiemengen für die in Abb. 5-32 dargestellten Temperaturverläufe zusammengefasst. Die Ergebnisse von Simulation und Messung weichen nur unwesentlich (max. 0,2kWh) voneinander ab. Somit ist WUFI® Plus in der Lage, die auch in den Messungen erzielten Einsparungen durch intermittierende Beheizung ausreichend genau abzubilden. Vergleicht man Simulation und Messung weiter, ergeben sich auch ähnliche Einsparpotentiale der beiden intermittierenden Profile (2 und 3) gegenüber dem kontinuierlichen Profil 1. Die Einsparungen liegen im Bereich von 29-34%.

Tab. 5-26: Benötigte Heizenergiemenge für die drei „realen Nutzungsszenarien“ sowie Ersparnisse der beiden intermittierenden Szenarien (Profil 2 und 3) gegenüber dem kontinuierlichen Szenario.

Versuch	Heizenergie Messung [kWh]	Einsparung Messung	Heizenergie Wufi [kWh]	Einsparung Wufi
Profil 1	7,6	-	7,6	-
Profil 2	5,3	2,3 kWh (30%)	5,4	2,2 kWh (29%)
Profil 3	5,0	2,6 kWh (34%)	5,2	2,4 kWh (32%)

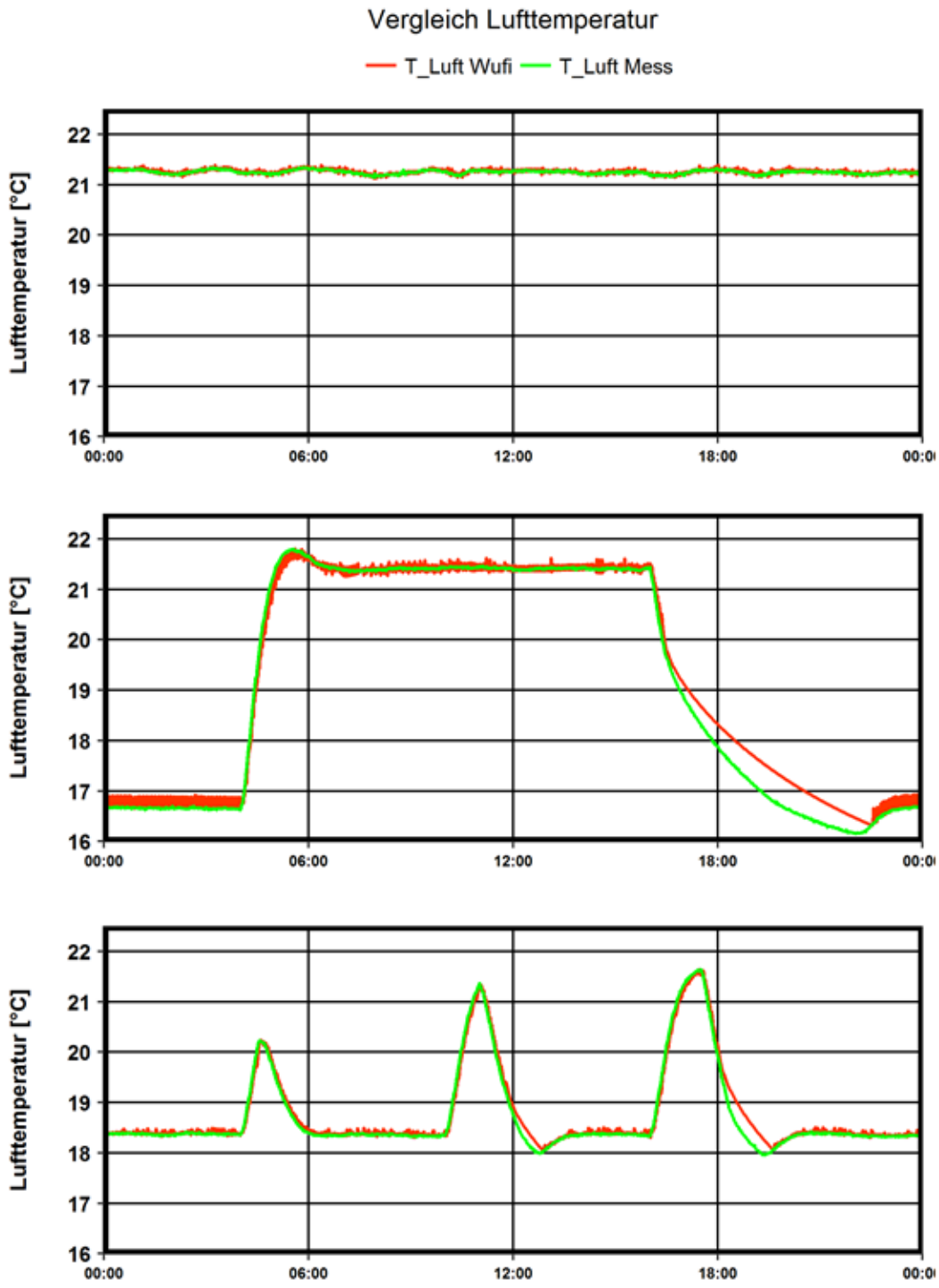


Abb. 5-32: Vergleich des Lufttemperaturverlaufes von Messung und WUFI® Plus Simulation für die drei „realen Nutzungsszenarien“

Nun sollen die hier festgestellten Einsparungen weiter in Bezug gebracht werden mit den in der Parameterstudie erzielten Ergebnissen. Hierzu soll zunächst auf einige wesentliche Einschränkungen hingewiesen werden, die bei diesem Vergleich auftreten: Der

Betrachtungszeitraum bei der Parameterstudie betrug ein Jahr, während in den Messungen nur die Einsparung verglichen wird, die in 24h stattfindet. Zusätzlich herrschte für die Messversuche ein konstantes Außenklima von 0°C, während für die Parameterstudie der Jahres-Klimadatensatz für den Standort Holzkirchen verwendet wurde. Da jedoch die prozentualen Einsparungen verglichen werden sollen, wird vermutet, dass eine Gegenüberstellung der beiden Fälle dennoch möglich und sinnvoll ist. Ein weiteres Beispiel für die unterschiedlichen Randbedingungen ist beispielsweise das Fehlen von inneren Lasten im Versuchsraum gegenüber der Parameterstudie.

Tab. 5-27: Benötigte Heizenergiemenge für die fünf untersuchten Nutzungsszenarien sowie Ersparnisse des intermittierenden Betriebs gegenüber dem kontinuierlichen Szenario und gewünschte Zieltemperatur.

NZ	Heizenergie kontinuierlich [kWh]	Heizenergie Intermittierend [kWh]	Einsparung [%]	Gewünschte Operativ-temperatur
NZ1 Küche	151	150	31%	21°C
NZ2 Schlafen	138	120	13%	19°C
NZ3 Bad	205	122	41%	23°C
NZ4 Wohnen	221	151	32%	22°C
NZ5 Arbeiten	151	114	25%	21°C

Eine bestimmte Simulationsvariante wird als dem Messaufbau am ähnlichsten angesehen und daher für die Vergleiche verwendet. Dabei handelt es sich um die Dämmvariante mit 4cm EPS Innendämmung auf den zwei Außenwänden und zusätzlich 2cm Dämmung auf den Innenwänden („ID4IW“) bei einer Beheizung mit Radiator. Verglichen wird jeweils die prozentuale Einsparung der Beheizung nur bei Anwesenheit (intermittierend) mit der Einsparung bei kontinuierlicher Beheizung für dieselbe Dämmvariante.

Von den in der Parameterstudie insgesamt fünf betrachteten Szenarien ähneln die zwei „länger genutzten Räume“ (Büro, Schlafzimmer) eher Profil 2 aus den Messungen. Die „kürzer genutzten Räume“ (Küche, Bad, Wohnzimmer) hingegen können eher mit Profil 3 der Messversuche verglichen werden. Auffällig ist die größere Spanne der Einsparungen durch intermittierenden Betrieb, die für die simulierten Varianten zwischen 13% und 41% liegt. Allerdings ist auch tendenziell zu erkennen, dass bei höheren gewünschten Operativtemperaturen die prozentualen Einsparungen durch intermittierenden Betrieb ansteigen. So ist die geringste Einsparung von nur 13% also auch für das Nutzungsszenario mit der geringsten Zieltemperatur (Schlafzimmer, 19°C) und die höchste Einsparung von 41% für das Nutzungsszenario mit der höchsten Zieltemperatur (Badezimmer, 23°C) zu erkennen. Es wird vermutet, dass die Abweichung in den gewünschten Temperaturen zwischen diesen Nutzungsszenarien und den Messungen zu hoch ist, um einen aussagekräftigen Vergleich anzustellen.

Die übrigen drei Nutzungsszenarien der Parameterstudie hingegen haben ähnliche oder nur leicht erhöhte Zieltemperaturen gegenüber den Messungen (21°C). Sie werden also als

geeigneter für den Vergleich zu den Messungen eingestuft. Bei ihnen liegen die Einsparungen durch den intermittierenden Betrieb zwischen 25% und 32%, während sie bei den Messungen zwischen 29% und 34% lagen. Dies wird als Indiz angesehen, dass die Größenordnung der Einsparungen durch intermittierenden Betrieb in der Parameterstudie als realistisch einzuschätzen ist.

5.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tab. 5-28 werden die empfohlenen Betriebsvarianten für jedes Nutzungsszenario sowie deren Energieeinsparungen gegenüber dem Referenzfall und deren Komfortverluste zusammengefasst.

Tab. 5-28: Zusammenfassung der empfohlenen Parameterkombinationen für jedes Nutzungsszenario.

NZ	Dämm-variante	Betriebs-variante	Heiz-system	Energieeinsparung		Komfortverluste	
				1AW [kWh/m²a]	2AW [kWh/m²a]	1AW	2AW
1	ID8+IW	Anwesenh. (min 18°C)	RAD	59 (64%)	87 (71%)	7%	7%
2	ID8	Anwesenh. (min 16°C)	RAD	66 (57%)	97 (63%)	<1%	<1%
3	ID8	Nachtabsenkung	RAD	109 (51%)	158 (58%)	0%	0%
4	ID8+IW	Anwesenh. (min 18°C)	RAD	73 (63%)	110 (68%)	10%	9%
5	ID8	Anwesenh. (min 16°C)	RAD	63 (62%)	93 (69%)	<1%	<1%

In der Simulation schnitt für alle Nutzungsszenarien die Beheizung mit Radiator am besten ab, da es im Modell zu keinen direkten Energieverlusten vom Übergabesystem zum Außenklima kommt. Für das Verhalten realer elektrischer Heizsysteme lagen hingegen keine Daten vor. Es konnte nicht geprüft werden, ob Radiatoren auch in der Realität Vorteile gegenüber Flächenheizsystemen aufweisen. Bei den Dämmvarianten werden durchweg hohe Dämmstoffdicken (8 cm) empfohlen. Eine geringere Dämmstoffdicke von z. B. 6 cm führt zu Verlusten bei den Energieeinsparungen, die im Bereich von 3 % liegen. Zusätzliche Innendämmungen auf den Innenwänden können dazu beitragen, die Aufheizgeschwindigkeit der Räume zu verbessern, insbesondere wenn die gewünschte Operativtemperatur über 20 °C liegt. Das Aufbringen einer Low-E-Beschichtung auf den Innenoberflächen brachte für die betrachteten Szenarien keine höheren Energieeinsparungen oder geringeren Komfortverluste mit sich.

Für alle Nutzungsszenarien außer für das Bad konnte eine Dämmvariante gefunden werden, die eine Beheizung nur bei Anwesenheit zuließ. Hierbei sollte allerdings die Operativtemperatur tagsüber nicht mehr als 2-3 °C unterhalb der gewünschten Zieltemperatur bei Anwesenheit liegen, um den Aufheizvorgang nicht inakzeptabel lang werden zu lassen. Auch müssen bei der Beheizung bei Anwesenheit immer gewisse Komfortverluste in Kauf genommen bzw. als noch akzeptabel eingestuft werden. Für die empfohlenen Varianten liegt auf das Jahr betrachtet der Anteil der Anwesenheitsminuten außerhalb des Komfortbereichs, der noch als akzeptabel angesehen werden muss, bei maximal 10%. Betrachtet man allerdings die sehr kalten Tage im Winter (wie z. B. dargestellt in Abb. 5-31 bei -5 °C Außentemperatur) separat, kann der Anteil

der Minuten außerhalb des Komfortbereichs deutlich höher liegen und einen intermittierende Heizbetrieb daher kritisch machen. Deshalb werden noch einige Möglichkeiten erwähnt, wie die Behaglichkeitsverluste eines Nutzers bei Beheizung nur bei Anwesenheit potentiell noch weiter gesenkt werden könnten.

Bereits in Vorsimulationen wurde deutlich, dass die maximal verfügbare Leistung der verschiedenen Heizsysteme großen Einfluss auf die Aufheizgeschwindigkeiten im intermittierenden Betrieb hat. Die maximale Leistung wurde für die Simulationen auf 100-110 W/m² festgesetzt, da dies ein häufig verwendeter Erfahrungswert für die Dimensionierung von Heizkörpern in Altbauten ist. Recherchen zeigten, dass moderne Flächenheizsysteme häufig wesentlich höhere Leistungsabgaben haben können, die im Bereich von 200-300 W/m² liegen. Bei der Bereitschaft der Nutzer, neben einer Verbesserung des Dämmstandards auch noch eine Erneuerung des Heizsystems durchzuführen, ließen sich vermutlich weitaus größere Potentiale für die instationäre Beheizung mit minimalen Behaglichkeitsverlusten erzielen. Auch wurde in dieser Parameterstudie nicht berücksichtigt, welche Möglichkeiten in Zukunft Smart-Home Applikationen oder selbstlernende Algorithmen bieten können. Die Beheizung wurde immer erst genau zu dem Zeitpunkt gestartet, zu dem der Nutzer auch wirklich den Raum betritt. Es wurde nicht untersucht, welche Verbesserungen sich für die thermische Behaglichkeit ergeben könnten, wenn der Beheizung eine gewisse Vorlaufzeit zur Verfügung stünde, bevor der Nutzer den Raum betritt. Smart-Home Applikationen und selbstlernen Algorithmen könnten zukünftig dazu beitragen, das Nutzerverhalten besser vorauszusagen und die Heizsysteme dementsprechend genauer, individueller und effizienter zu steuern.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass sich für die hier empfohlenen Dämm- und Betriebsvarianten gegenüber dem Referenzfall bis zu 2/3 der Heizenergie einsparen lassen. Davon lassen sich rund 49 % der Ersparnisse auf die Verbesserung des Dämmstandards und rund 15 % auf die Anpassung der Betriebsvariante hin zum intermittierenden Betrieb zurückführen.

5.4.6 Skalierung der Ergebnisse

Die in der hier durchgeführten Parameterstudie ermittelten Einsparpotentiale wurden von der Raumebene auf den gesamten deutschen Gebäudebestand hoch skaliert. Dazu war es zunächst notwendig, die für Innendämmungen relevante Wohnfläche in Deutschland sowohl insgesamt als auch für jedes Nutzungsszenario zu definieren. Anschließend wurden daraus der Energieverbrauch und das Einsparpotential für jedes Nutzungsszenario und für den gesamten Gebäudebestand bestimmt. Die Ergebnisse werden anschließend diskutiert und mit dem gesamten Endenergieverbrauch im Haushaltssektor verglichen.

5.4.6.1 Ermittlung der relevanten Gebäudefläche

Zunächst müssen für den Wohnbereich (Nutzungsszenario 1-4) und den Nichtwohnbereich (Nutzungsszenario 5) die in Deutschland vorhandenen Gesamtflächen bestimmt werden. Für den Wohnbereich beträgt die Gesamtwohnfläche (Stand 2016) rund 3.822,5 Mio. m² (Statistisches Bundesamt 2017). Für den Nichtwohnbereich wurde eine Typologie nach Dirlich et al. 2011 zurate gezogen, in der die Nutz- bzw. Wohnflächen für verschiedene Arten von Nichtwohngebäuden ermittelt wurde. Da einige Gebäudearten nicht für die Zwecke dieser Arbeit relevant sind (z. B. Landwirtschaftliche Betriebsgebäude), wird nur die Kategorie der Büro- und Verwaltungsgebäude betrachtet, sodass im Nichtwohnbereich von einer Gesamtfläche von 276 Mio. m² ausgegangen wird.

Nun muss der prozentuale Anteil aller Gebäude bestimmt werden, die für eine Innendämmung infrage kommen. Die Berechnung basiert auf der Studie „Datenbasis Gebäudebestand“ (Diefenbach et al. 2011), die sowohl Wohngebäude als auch Nichtwohngebäude berücksichtigt. Sie liefert folgende Ergebnisse:

Tab. 5-29: Bestimmung des für Innendämmung relevanten Anteils des Gebäudebestands.

Gebäudetyp	Anteil
Altbauten vor 1978	68,5 %
Ungedämmte Gebäude	59,5 %
Gebäude mit Restriktionen für Außendämmungen	28,9 %
Ungedämmte Altbauten mit Restriktionen für Außendämmungen	**11,8 %**

Wie schon an früherer Stelle in dieser Arbeit erwähnt, bringt eine Außendämmung der Außenwände gegenüber der Innendämmung gewisse bauphysikalische und energetische Vorteile mit sich. Daher sollte stets der Grundsatz gelten, dass eine Innendämmung nur infrage kommt, wenn gewisse Restriktionen vorhanden sind, die eine Außendämmung nicht zulassen. Als solche Restriktionen sind hier Wände zum Nachbargrundstück, zur Straße oder zum Bürgersteig sowie denkmalgeschützte Fassaden berücksichtigt. Insgesamt ergibt sich daraus ein geschätzter Anteil von 11,8 % an ungedämmten Altbauten, für die eine Außendämmung nicht infrage kommt. Die daraus resultierende, für die Innendämmung relevante Wohn- bzw. Nutzfläche kann Tab. 5-30 entnommen werden.

Tab. 5-30: Bestimmung der für Innendämmung relevanten Gebäudefläche.

Bereich	Gesamtfläche	Anteil ID	Fläche ID
Wohnbereich	3.822,5 Mio. m²	11,8 %	450 Mio. m²
Nichtwohnbereich	276 Mio. m²	11,8 %	33 Mio. m³

Für den Wohnbereich wurden die vier Nutzungsszenarien Küche, Schlafen, Bad und Wohnen unterschieden. Da sich in der Parameterstudie für die verschiedenen Szenarien verschieden hohe Energiesparpotentiale ergaben, wurden die Energieeinsparungen zunächst für jedes Szenario einzeln ermittelt. Dazu ist eine Aufteilung der gesamten Wohnfläche auf die

verschiedenen Nutzungsszenarien vonnöten. Einige in Tab. 5-31 zusammengefasste Annahmen müssen dabei getroffen werden. Dabei handelt es sich um:

- Die geschätzte Anzahl der Räume je Nutzungsszenario in verschieden großen Wohnungen (Küche und Bad werden nicht als Zimmer gezählt)
- Die geschätzte durchschnittliche Raumgröße für jedes Nutzungsszenario
- Der Anteil der verschieden großen Wohnungstypen am gesamten Gebäudebestand (Werte nach Statistisches Bundesamt 2017)
- Die Gesamtzahl der Wohnung in Deutschland

Tab. 5-31: Annahmen für die Verteilung der relevanten Wohnfläche auf die verschiedenen Nutzungsszenarien.

Wohnungstyp	**Küche**	**Schlafen**	**Bad**	**Wohnen**	**Anteil des Wohnungstyps am gesamten Bestand**
1 Zimmer Wohnungen	1	0	1	1	3 %
2 Zimmer Wohnungen	1	1	1	1	9 %
3 Zimmer Wohnungen	1	2	1	1	22 %
4 Zimmer Wohnungen	1	3	2	1	25 %
5 Zimmer Wohnungen	1	4	2	1	17 %
6 Zimmer Wohnungen	1	5	2	1	11 %
7 Zimmer Wohnungen	1	5	2	2	12 %
Durchschnittliche Raumgröße nach NZ	**12 m²**	**12 m²**	**9 m²**	**24 m²**	**Gesamtzahl aller Wohnung in Deutschland 2016:** 41.703.300

Daraus können die in Tab. 5-32 dargestellten Daten ermittelt werden:

- Die Anzahl der Wohnungen in den verschiedenen Wohnungstypen (prozentualer Anteil des Wohnungstyps × Gesamtzahl der Wohnungen)
- Die Anzahl der Räume je Nutzungsszenario für alle Wohnungstypen
- Die Gesamt-Wohnfläche je Nutzungsszenario (Durchschnittliche Raumgröße je NZ × Anzahl der Räume je NZ)
- Die Wohnfläche je Nutzungsszenario, die relevant ist für Innendämmung (11,8% × Gesamtfläche je NZ)

Die ermittelte Summe der Wohnfläche für alle Nutzungsszenarien stimmt gut mit den Referenzwerten des statistischen Bundesamtes für die Gesamtwohnfläche aller Bestandgebäude in Deutschland (3.822,5 Mio. m²) überein. Daraus wird geschlossen, dass die getroffenen Annahmen zur Verteilung der Wohnfläche auf die Nutzungsszenarien als zulässig einzuordnen sind.

Tab. 5-32: Ergebnisse der Wohnflächenermittlung je Nutzungsszenario.

Wohnungstyp	Küche	Schlafen	Bad	Wohnen	Gesamt
Anzahl der Räume je NZ (x1000)	41.703,4	130.757,8	69.116,8	46.832,4	**288.410,4**
Gesamtfläche nach NZ in Mio. m²	500,4	1.569,1	622,1	1.124,0	**3.815,6**
Fläche nach NZ in Mio. m² für ID	58,92	184,73	73,23	137,32	**449,2**

5.4.6.2 Ermittlung des Energieverbrauchs und Einsparpotentials

In Kapitel 5.4.3.4 ergaben sich höhere Energieverbräuche aber auch höhere prozentuale Energieeinsparungen, wenn Räume mit zwei Außenwänden statt mit einer Außenwand betrachtet wurden. Für die Zwecke der Hochrechnung ist es nötig, die Ergebnisse für den Parameter ‚Zahl der Außenwände' miteinander zu kombinieren. Da sich für Innendämmungen relevante Gebäude häufig in dichter innerstädtischer Bebauung befinden, wird davon ausgegangen, dass hier deutlich mehr Räume mit einer Außenwand als mit zwei Außenwänden vorhanden sind. Es wird also die Annahme getroffen, dass ¾ der betrachteten Räume eine Außenwand und nur ¼ zwei Außenwände aufweisen. Die für ein und zwei Außenwände gewichteten Energieverbräuche in kWh/(m²a) für den Referenzfall (ungedämmt, kontinuierlich beheizt mit Radiator), sowie für die jeweils empfohlene Variante sind in Tab. 5-33 zu sehen. Die Verbräuche je Quadratmeter werden multipliziert mit der für jedes Nutzungsszenario ermittelten Wohn- bzw. Nutzfläche, sodass sich die Verbräuche in TWh/a für den gesamten deutschen Gebäudebestand im unteren Teil der Tabelle ergeben.

Tab. 5-33: Energieverbrauch und Energieeinsparung je Nutzungsszenario.

Variante	Einheit	Küche	Schlafen	Bad	Wohnen	Büro
Verbrauch Referenzfall	kWh/(m²a)	198	181	262	233	198
Verbrauch Empfehlung	kWh/(m²a)	65	74	121	82	70
Verbrauch Referenzfall	TWh/a	11,68	33,44	19,15	30,77	6,42
Verbrauch Empfehlung	TWh/a	3,85	13,64	8,90	10,82	2,27
Einsparung	**TWh/a**	**7,83**	**19,79**	**10,25**	**19,95**	**4,15**

Damit ergeben sich laut Tab. 5-34 insgesamt folgende Energieeinsparungen:

Tab. 5-34: Gesamte Energieeinsparungen durch die empfohlenen Maßnahmen für den deutschen Gebäudebestand

Bereich	Einsparungen
Wohnbereich	57,8 TWh/a
Nichtwohnbereich	4,2 TWh/a
Gesamt	**62,0 TWh/a**

5.4.6.3 Vergleich und Diskussion

Im Jahr 2015 betrug der Endenergieverbrauch aller Haushalte 636 TWh (Umwelt Bundesamt 2017). Wenn alle Gebäude mit Potential für Innendämmung augenblicklich saniert und im empfohlenen Betriebsmodus beheizt werden würden, so würde dies im Wohnbereich eine Einsparung von rund 9 % des Endenergiebedarfs mit sich bringen. Zusätzlich wären im Bereich der Büro- und Verwaltungsgebäude noch einmal 4.2 TWh/a an Einsparungen möglich, sodass für die hier betrachteten Szenarien in Deutschland insgesamt rund 62 TWh pro Jahr an Energie eingespart werden könnten. Dieses Ergebnis liegt in derselben Größenordnung wie die Stromerzeugung der sieben letzten Atomkraftwerke in Deutschland, die sich ab Ende 2017 noch im Betrieb befinden sollen. Gemeinsam erzeugen sie jährlich rund 70 TWh Strom (Deutsches Atomforum e.V. 2015).

Da die sofortige Sanierung aller fraglichen Gebäude nicht realistisch ist, wird nun eine Sanierungsrate von 2 % angesetzt, welche als Ziel im Energiekonzept der Bundregierung angegeben ist (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie 2010). In diesem Fall würden sich die zusätzlichen Einsparungen pro Jahr auf rund 1,25 TWh belaufen. Geht man von einer durchschnittlichen Stromerzeugung von 10 TWh/a für jedes noch laufende Atomkraftwerk aus, so könnte bei den hier ermittelten Einsparungen etwa alle acht Jahre ein Kernreaktor vom Netz genommen werden.

Auffällig an diesen Ergebnissen ist u. a., dass mit einer Sanierung und Betriebsumstellung in weniger als 12 % der Bestandsgebäude rund 9 % des Endenergiebedarfs im Haushaltssektor eingespart werden kann. Dieser Wert wirkt auf den ersten Blick recht hoch und kann zum Teil der Tatsache geschuldet sein, dass die durchgeführte Potentialabschätzung einigen Vereinfachungen und Einschränkungen unterlag. Unter anderem wurden im Wohnbereich nur vier Nutzungsszenarien unterschieden. Insbesondere in Wohnungen mit hoher Zimmerzahl steigt die angenommene Zahl der Schlafzimmer, in denen nur nachts beheizt werden muss. Für diese konnten daher sehr hohe Energieeinsparungen erzielt werden. In der Realität würde eine Vielzahl der Zimmer, die hier als Schlafzimmer deklariert wurden, neben dem Schlafen auch noch tagsüber z. B. als Kinderzimmer genutzt werden. Dies würde zu einem höheren Energieverbrauch führen. Auch entspricht der verwendete Referenzfall mit ungedämmten Außenwänden und kontinuierlichem Betrieb dem ‚worst case' Szenario. Es kann davon ausgegangen werden, dass in Realität zumindest ein Teil der betrachteten Bestandsgebäude bereits mit Nachtabsenkung betrieben wird, was das Einsparpotential von Innendämmungen im instationären Betrieb noch weiter senken würde.

Auf der anderen Seite sollte nicht vergessen werden, dass die Bestandsgebäude, die Potentiale für Innendämmungen aufweisen, i. d. R. einen energetisch sehr schlechten Standard aufweisen. Häufig handelt es sich hierbei um innerstädtische Altbauten mit denkmalgeschützten Fassaden und sehr schlechtem Wärmeschutzstandard. Der betrachtete Referenzfall hat einen mittleren Heizwärmebedarf von rund 220 kWh/(m²a), was für unsanierte Altbauten ein realistischer Wert ist. Werden für alle Räume die empfohlenen Dämm- und Heizvarianten durchgeführt, kann der Heizenergiebedarf auf rund 80 kWh/(m²a) gesenkt werden. Im Vergleich dazu liegt der durchschnittliche Heizenergiebedarf aller deutschen Gebäude bei rund

160 kWh/(m²a). Die 12 % der betrachteten Bestandsgebäude können also von einem sehr schlechten Wärmeschutzstandard auf einen überdurchschnittlich guten verbessert werden. Damit kann das hohe Einsparpotential von 9 % des Endenergieverbrauchs von Haushalten zum Teil erklärt werden. Mit rund 80 kWh/(m²a) liegt der Heizenergiebedarf zwar bei weitem noch nicht im Bereich der aktuellen EnEV 2016 (≤ 45 kWh/(m²a) für Neubauten), dennoch findet eine deutliche Verbesserung statt. Der Heizenergiebedarf liegt nun nur noch etwas höher als es beispielsweise die EnEV 2002 für ein sogenanntes Effizienzhaus forderte (≤ 70 kWh/(m²a)) (Graf und Voll 2014).

5.5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Kapitels war es, die Potentiale von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb mittels einer Parameterstudie in WUFI® Plus und anschließender Skalierung aufzuzeigen. Dazu wurden zwei neue Modelle in WUFI® Plus implementiert, die anschließend durch Abgleiche mit Messwerten aus dem großen Klimasimulator in Stuttgart validiert wurden. Mit diesen validierten Modellen konnte die Parameterstudie anschließend durchgeführt und deren Ergebnisse von der Raumebene auf den gesamten deutschen Gebäudebestand skaliert werden. Die wichtigsten Ergebnisse und Herausforderungen des durchgeführten Arbeiten sowie potentielle weitere Forschungsfragen werden im Folgenden noch einmal aufgeführt.

Bei der Validierung der neuen Modelle für WUFI® Plus wurde zum einen das Modell für elektrische, bauteilintegrierte Heizsysteme (TABS) und zum anderen das Modell für den langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen betrachtet. Die Validierung erfolgte in beiden Fällen durch den Vergleich von Messdaten aus dem Versuchsraum für Innendämmungen im großen Klimasimulator des Fraunhofer IBP und den simulierten Ergebnissen aus WUFI® Plus. Für das TABS-Modell konnten drei Validierungsfälle (Fußbodenheizung stationär und instationär, Wandheizung instationär) erfolgreich durchgeführt werden. Der Vergleich von gemessenen und simulierten Raumlufttemperaturen infolge derselben zur Verfügung stehenden Heizleistung ergab in allen Fällen zufriedenstellende Ergebnisse. Für das Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen wurden vier Validierungsfälle betrachtet: Fußbodenheizung im ungedämmten Testraum bei stationärem und instationärem Betrieb sowie Wandheizung im innengedämmten Testraum bei stationärem und instationärem Betrieb. Verglichen wurden die gemessenen und simulierten Oberflächentemperaturen an fünf Punkten einer Wand (Mittelpunkt und nahe der Ecken). Beim Vergleich der realen Daten mit WUFI® Plus Simulationen konnten im Laufe der Validierung folgende Einschränkungen und Herausforderungen identifiziert werden:

- Wärmebrückeneffekte werden in WUFI® Plus nicht berücksichtigt. Ihr Einfluss wurde vor allem im Bereich der Außenwandecken im ungedämmten Fall als hoch vermutet. Daher wurden die zusätzlichen Wärmeverluste mithilfe der Simulation von 3D Objekten abgeschätzt. Im ungedämmten Fall brachte die Anpassung der Messergebnisse um einen sogenannten Wärmebrücken-Korrekturfaktor deutliche Verbesserungen (Abweichungen ohne Anpassungen im Bereich von 0,1 - 0,9 K; Abweichungen nach Anpassung zwischen 0,1 - 0,26 K).

- Mit dem TABS-Modell simulierte Flächenheizsysteme wiesen eine gleichmäßige Temperaturverteilung im gesamten Bauteil auf. In den realen Flächenheizsystemen des Messraumes hingegen stellten sich deutliche Temperaturunterschiede z. B. gegenüber der Mitte und den Randbereichen des Heizsystems ein. Diese Temperaturverteilung konnte mit dem vorhandenen Modell für Flächenheizsysteme nicht nachgestellt werden.
- Konvektionsvorgänge, v.a. im instationären Zustand, ließen sich zwischen Simulation und Messung nur schwer vergleichen. Zwar wurde der Messraum mit sogenannten Mayer-Sensoren ausgestattet, die eine Messung des h_c-Wertes (Genauigkeit von ±10 %) ermöglichen, doch unterschieden sich die Temperaturdifferenzen, die für die Berechnung des konvektiven Wärmestroms für die Simulation und die Messung verwendet wurden. So kam es im Messraum zu deutlichen horizontalen und vertikalen Lufttemperaturunterschieden, während in WUFI® Plus lediglich eine Lufttemperatur genau in Raummitte ermittelt wurde. Um dafür zu sorgen, dass die konvektiven Wärmeströme trotz unterschiedlicher Temperaturdifferenzen möglichst gleich groß sind, wurde der h_c-Wert in WUFI® Plus rechnerisch angepasst. Dabei konnte folgender Zusammenhang festgestellt werden: Für alle Positionen, an denen der Unterschied zwischen gemessenem und simuliertem konvektiven Wärmestrom weniger als 10 % betrug, konnte das Validierungskriterium (Abweichung der Oberflächentemperatur ≤ 0,27 K) eingehalten werden. Die Abweichung der konvektiven Wärmeströme an allen Messpositionen, an denen das Validierungskriterium nicht erfüllt werden konnte, betrug mit nur einer einzigen Ausnahme mehr als 10 %. Es kann also davon ausgegangen werden, dass Konvektionsvorgänge und Lufttemperaturunterschiede im realen Raum großen Einfluss auf die Validierungsergebnisse haben. Deren bessere Darstellung in WUFI® Plus sollte Bestandteil weiterer Forschung sein.

Im Hinblick auf diese Einschränkungen ergaben die vier betrachteten Validierungsfälle folgende Ergebnisse: Der qualitative Vergleich der Temperaturverteilungen auf den betrachteten Wänden war durchweg zufriedenstellend. Beim quantitativen Vergleich der gemessenen und simulierten Oberflächentemperaturen kam es v.a. in Wandmitte für alle Validierungsfälle zu sehr guten Übereinstimmungen. Auch für die meisten Eckpunkte konnte das Validierungskriterium (Abweichung zwischen Simulations- und Messergebnis ≤ 0,27 K) erfüllt werden. Für diejenigen Messpositionen, für die dieses Kriterium nicht erfüllt wurde, wird das Problem allerdings in einem Zusammenspiel der drei oben genannten Problempunkte vermutet und nicht beim Modell zum langwelligen Strahlungsaustausch. Dieses wird daher trotz der genannten Einschränkungen als erfolgreich validiert betrachtet.

Mit den zwei validierten Modellen wurde anschließend die Parameterstudie in WUFI® Plus durchgeführt. Durch Variationen der Nutzungstypen, Dämmvarianten, Heizsysteme, Betriebsvarianten und Zahl der Außenwände wurden insgesamt 1.440 Parameterkombinationen untersucht. Ziel war es, die Potentiale von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb gegenüber anderen Varianten abzuschätzen. Prinzipiell sollte gelten, dass wann immer möglich eine außenseitige Dämmung der Außenwände einer Innendämmung vorzuziehen ist. Dadurch

können gewisse bauphysikalische Probleme (Frostgefährdung, Taupunktverschiebung, Schimmelpilzbildung etc.) sowie verschärfte Wärmebrückeneffekte und Wohnflächenverluste bei Innendämmungen vermieden werden. Innendämmungen kommen folglich nur dann infrage, wenn Außendämmungen, z. B. aufgrund von denkmalgeschützten Fassaden, dichter Bebauung oder uneinheitlicher Besitzverhältnisse, nicht möglich sind.

Falls nur eine Innendämmung infrage kommt, wurde für alle hier betrachteten Nutzungsszenarien (Küche, Schlafen, Bad, Wohnen, Büro) aus den Ergebnissen der Parameterstudie eine Empfehlung hinsichtlich Sanierungs- und Betriebsvariante ausgesprochen:

- **Küche**: Innendämmung von 8 cm auf den Außenwänden, zusätzliche Innendämmung der Innenwände (2 cm); intermittierende Beheizung mit Radiator und maximaler Absenkung auf 18 °C tagsüber und 16 °C nachts
- **Schlafen**: Innendämmung von 8 cm auf den Außenwänden; intermittierende Beheizung mit Radiator und maximaler Absenkung auf 16 °C tagsüber
- **Bad**: Innendämmung von 8 cm auf den Außenwänden; Beheizung mit Radiator und Nachtabsenkung (nachts maximale Absenkung auf 16 °C)
- **Wohnen**: Innendämmung von 8 cm auf den Außenwänden, zusätzliche Innendämmung der Innenwände (2 cm); intermittierende Beheizung mit Radiator und maximaler Absenkung auf 18 °C tagsüber und 16 °C nachts
- **Büro**: Innendämmung von 8 cm auf den Außenwänden; intermittierende Beheizung mit Radiator und maximaler Absenkung auf 16 °C

Durchweg erwies sich also eine Beheizung durch einen Radiator und die Aufbringung hoher Dämmstoffdicken (8 cm) als am effektivsten. Eine zusätzliche Dämmung der Innenwände ist ratsam, wenn die Aufheizgeschwindigkeit aufgrund kurzer Aufenthaltszeiten in den Räumen verbessert werden muss und die gewünschte Operativtemperatur über 20 °C liegt. Für alle Nutzungsszenarien außer für das Bad konnte eine Dämmvariante gefunden werden, die eine Beheizung nur bei Anwesenheit mit maximal 10 % der Anwesenheitsminuten außerhalb des definierten Komfortbereichs ermöglicht. Die Operativtemperatur sollte für das Erreichen des Komfortbereiches in einem akzeptablen Zeitrahmen tagsüber nicht mehr als 2-3 °C unter die gewünschte Temperatur bei Anwesenheit abgesenkt werden. Dies soll ein ausreichend schnelles Aufheizen sicherstellen. Die Kombination von sehr kurzen Aufenthaltszeiten und sehr hohen gewünschten Operativtemperaturen (z. B. Bad) erweist sich als kritisch für eine intermittierende Beheizung, weshalb hier lediglich eine Nachtabsenkung empfohlen wird. Um die Anwesenheitsminuten außerhalb des Komfortbereichs bei intermittierender Heizung weiter zu reduzieren, könnten in Zukunft weitere Faktoren eine Rolle spielen. Dazu gehören selbstlernende Algorithmen und Smart-Home Applikationen, die eine individuell reagierende und effiziente Heizungssteuerung ermöglichen könnten und daher im Zusammenhang mit intermittierendem Betrieb weiter erforscht werden sollten.

Auf Wohnungsebene ergab sich aus der Parameterstudie folgendes, für alle Nutzungsszenarien gemitteltes Energiesparpotential:

Tab. 5-35: Zusammenfassung der Energieeinsparpotentiale

Variante	Energieverbrauch
Referenzfall	220 kWh/(m²a)
Empfohlene Sanierungs- und Betriebsvariante	80 kWh/(m²a)
Einsparungen	**120 kWh/(m²a) ≙ 64 %**

Der Energieverbrauch kann also, wenn die Wohnung nach den oben ausgesprochenen Empfehlungen saniert und beheizt wird, um fast 2/3 gesenkt werden.

Anschließend wurden die Potentiale von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb auf den gesamten deutschen Gebäudebestand skaliert. Es wurde ermittelt, dass knapp 12 % der deutschen Bestandsgebäude potentiell für eine Innendämmung infrage kämen. Würden alle diese Bestandsgebäude augenblicklich wie oben empfohlen saniert und beheizt werden, so könnten jährlich rund 58 TWh im Wohnbereich und rund 4 TWh in Büro- und Verwaltungsgebäuden (insgesamt also 62 TWh) an Heizenergie eingespart werden.
Alles in allem kann zusammengefasst werden, dass die häufig unliebsame Sanierungsmaßnahme Innendämmung in Kombination mit intermittierender Beheizung sehr große energetische Potentiale mit sich bringt. Bei einer Sanierung von rund 12 % der Bestandsgebäude könnten rund 9 % des gesamten Endenergieverbrauchs im Haushaltssektor eingespart werden. Die ermittelten Einbußen an thermischer Behaglichkeit werden als gerade noch akzeptable eingestuft, sollten aber durch klugen Einsatz moderner Smart-Home Einrichtungen noch weiter verringert werden.

Die hohen energetischen Einsparpotentiale ergeben sich nicht allein aus einer Verbesserung des Dämmstandards oder einer Anpassung des Betriebsmodus, sondern vielmehr aus der Kombination dieser beiden Parameter. So verbessert die Sanierung des Gebäudes mit Aufbringung einer Innendämmung zwar die Energieeffizienz, erst die Beheizung lediglich bei Anwesenheit aber auch die Energiesuffizienz. Diese scheint in Energiekonzepten und –standards, die meist nur auf die Effizienz von Gebäuden abzielen, oft vernachlässigt zu werden, obwohl sie deutliche Potentiale mit sich bringt. Im hier betrachteten Fall konnten 49 % der Energieeinsparungen durch die Verbesserung der Effizienz (Innendämmung), jedoch immer noch 15 % aufgrund der Verbesserung der Suffizienz (intermittierende statt kontinuierliche Beheizung) erzielt werden. Dieser Forschungsbericht kann also als Beispiel dafür herangezogen werden, dass sowohl Energieeffizienz als auch -suffizienz eine wichtige Rolle dabei spielen sollten, die Energieprobleme der Zukunft in Angriff zu nehmen.

5.6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-1: Ablaufdiagramm der durchzuführenden Arbeitsschritte. 394
Abb. 5-2: Geometrische Skizze zur Definition des Sichtfaktors zwischen zwei Flächen i und j (Quelle: Winkler et al. 2016). 396
Abb. 5-3: Bestandteile der Gebhart-Matrix (Quelle: Winkler et al. 2016). 397
Abb. 5-4: Geometrien der DIN EN ISO 13791:2012 Testfälle. Außenwände sind in Rot hervorgehoben (Quelle: Winkler et al. 2016). 399
Abb. 5-5: Aktivierung des Modells zum langwelligen Strahlungsaustausch an Innenoberflächen 400
Abb. 5-6: Vorprozess der Sichtfaktorenberechnung in WUFI® Plus. 400
Abb. 5-7: Einstellung für den Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung an Innenoberflächen. 401
Abb. 5-8: Nutzereingaben zu TABS Systemen in WUFI® Plus. 403
Abb. 5-9: Vergleich des Aufheizverhaltens (Lufttemperatur links, Operativtemperatur rechts) bei Verwendung idealer Anlagentechnik (rot) und des neuen Modells zu bauteilintegrierten Heizsystemen (grün). 404
Abb. 5-10: Grafische Darstellung von Energiesparpotential und Aufheizverhalten verschiedener Dämmvarianten bei einem Aufheizvorgang von 17°C auf 22°C. 406
Abb. 5-11: Temperaturprofile der Validierungsversuche „variierende Heiztemperaturen“ (links) und „variierende Abkühlzeiten“ (rechts). 408
Abb. 5-12: „Reale“ Nutzungsszenarien für die Potentialabschätzung bei intermittierender Beheizung 410
Abb. 5-13: Außenansicht des großen Klimasimulators in Stuttgart. 411
Abb. 5-14: Innenansicht von AW1 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen. 412
Abb. 5-15: Basismodell Versuchsraum für Innendämmungen in WUFI® Plus 3.1 416
Abb. 5-16: Aufbau des Fußbodens mit Fertigteilestrich, Fußbodenheizung, Perlitschüttung, XPS-Platten und Randdämmstreifen 418
Abb. 5-17: 1A (links) und 1B (rechts).Vergleich der Lufttemperaturen von Messdaten (grün), elektrischem TABS System in Wufi® Plus(rot) und interner Wärmequelle in Wufi® Plus(blau) bei gleicher aufgebrachter Heizenergie. 419
Abb. 5-18: Aufbau der Wandheizung mit 40mm EPS-Platten, Wandheizung und Verkleidung. 421
Abb. 5-19: Validierungsfall 2 - Vergleich der Lufttemperaturen von Messdaten (grün), elektrischem TABS System in WUFI® Plus (rot) und interner Wärmequelle in WUFI® Plus (blau) bei gleicher aufgebrachter Heizenergie. 422
Abb. 5-20: ..... Validierungsfall 1A – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei 26°C und stationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 426
Abb. 5-21: Validierungsfall 1B – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei instationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 428
Abb. 5-22: Verlegung der Heizdrähte in Türnähe und in der Ecke Innenwand-Innenwand. 429
Abb. 5-23: Validierungsfall 2A – gedämmte Variante mit Wandheizung bei 25°C stationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 431

Abb. 5-24: Validierungsfall 2B –gedämmte Variante mit Wandheizung bei instationärer Beheizung. Grafischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 433
Abb. 5-25: Beispielhafte Belegungsprofile für die verschiedenen Räume in einem Einpersonenhaushalt (oben) sowie in einem Einmann-Büro werktags (unten). 440
Abb. 5-26: Beispielhafte Profile für die inneren Wärmelasten in verschiedenen Räumen einer Wohnung. 443
Abb. 5-27: Beispielhafte Profile für die inneren Feuchtelasten in verschiedenen Räumen einer Wohnung. 446
Abb. 5-28: PPD in Abhängigkeit von PMV. Obere Kurve nach Mayer, untere Kurve nach Fanger (Quelle: Mayer 1995). 451
Abb. 5-29: Aufheizverhalten der länger genutzten Räume (NZ2 und NZ5) für einen Tag im Januar (Außentemperatur bei ca. -5°C). Ungedämmte Variante in rot, außengedämmte Variante in grün, innendgedämmte Variante in blau. 457
Abb. 5-30: Aufheizverhalten der ‚kürzer genutzten Räume' (NZ1, NZ3, NZ4) für einen Tag im Januar (Außentemperatur bei ca. -5 °C). Ungedämmte Variante in rot, außengedämmte Variante in grün, innengedämmte Variante in blau, innengedämmt + Innendämmung auf den Innenwänden gelb. 460
Abb. 5-31: Aufheizverhalten der ‚kürzer genutzten Räume' (NZ1, NZ3, NZ4) für einen Tag im Januar (Außentemperatur bei ca. -5 °C). Ungedämmte Variante in rot, außengedämmte Variante in grün, innengedämmte Variante in blau, innengedämmt + Innendämmung auf den Innenwänden gelb. Anpassung der minimalen Temperatur tagsüber auf 18 °C (NZ1, NZ4) bzw. 20 °C (NZ3). 462
Abb. 5-32: Vergleich des Lufttemperaturverlaufes von Messung und WUFI® Plus Simulation für die drei „realen Nutzungsszenarien" 470
Abb. 5-33: Horizontaler Schnitt durch den Messraum mit den einzelnen Messpositionen. Die dargestellten Messpositionen sind gültig für die Oberseite der Decke, die Unterseite der Decke und für die Oberseite des Fußbodens. 489
Abb. 5-34: Innenansicht der Innenwand 1 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen. 490
Abb. 5-35: Innenansicht der Innenwand 2 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen. 490
Abb. 5-36: Innenansicht der Außenwand 1 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen. 491
Abb. 5-37: Innenansicht der Außenwand 2 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen. 491
Abb. 5-38: Draufsicht des Messraums 492
Abb. 5-39: Querschnitt des Deckenaufbaus (Schnitt AW2) mit 22mm starker Holzplatte zur sicheren Begehung. 492
Abb. 5-40: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 493
Abb. 5-41: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 493
Abb. 5-42: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 494

Abb. 5-43: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 494
Abb. 5-44: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 495
Abb. 1-45: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 495
Abb. 5-46: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 496
Abb. 5-47: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 496
Abb. 5-48: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 497
Abb. 5-49: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 497
Abb. 5-50: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 498
Abb. 5-51: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 498
Abb. 5-52: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 499
Abb. 5-53: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 499
Abb. 5-54: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 500
Abb. 5-55: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 500
Abb. 5-56: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 501
Abb.5-57: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 501
Abb. 5-58: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 502
Abb. 5-59: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten. 502
Abb. 5-60: Für die Parameterstudie verwendeter Deckenaufbau. 503
Abb. 5-61: Für die Parameterstudie verwendeter Fußbodenaufbau. Bei Beheizung mit Fußbodenheizung befindet sich das TABS System in Ebene 4. 503
Abb. 5-62: Variationen der in der Parameterstudie verwendeten Außenwände. Ungedämmt (oben), Außendämmung (Mitte, beispielhaft 8cm), Innendämmung (unten, beispielhaft 8cm)....504
Abb. 5-63: Variationen der in der Parameterstudie verwendeten Innenwände. Ungedämmt (oben), Innendämmung 2cm (unten) 505
Abb. 5-64: Auswertung der Parameterstudie für NZ1 Küche und 1 Außenwand. 507
Abb. 5-65: Auswertung der Parameterstudie für NZ1 Küche und 2 Außenwände. 508
Abb. 5-66: Auswertung der Parameterstudie für NZ2 Schlafen und 1 Außenwand. 509

Abb. 5-67: Auswertung der Parameterstudie für NZ2 Schlafen und 2 Außenwände. 510
Abb. 5-68: Auswertung der Parameterstudie für NZ3 Bad und 1 Außenwand. 511
Abb. 5-69: Auswertung der Parameterstudie für NZ3 Bad und 2 Außenwände. 512
Abb. 5-70: Auswertung der Parameterstudie für NZ4 Wohnen und 1 Außenwand. 513
Abb. 5-71: Auswertung der Parameterstudie für NZ4 Wohnen und 2 Außenwände. 514
Abb. 5-72: Auswertung der Parameterstudie für NZ5 Büro und 1 Außenwand. 515
Abb. 5-73: Auswertung der Parameterstudie für NZ5 Büro und 2 Außenwände. 516
Abb. 5-74: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ1 Küche in parallelen Koordinatenplots. 518
Abb. 5-75: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ2 Schlafen in parallelen Koordinatenplots. 519
Abb. 5-76: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ3 Bad in parallelen Koordinatenplots. 520
Abb. 5-77: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ4 Wohnen in parallelen Koordinatenplots. 521
Abb. 5-78: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ5 Arbeiten in parallelen Koordinatenplots. 522

5.7 Tabellenverzeichnis

Tab. 5-1: Vergleich der simulierten Innenraumtemperaturen [°C] mit den Referenzwerten der DIN EN ISO 13791:2012 399
Tab. 5-2: Tabellarische Darstellung von Energiesparpotential und Aufheizverhalten verschiedener Dämmvarianten bei einem Aufheizvorgang von 17°C auf 22°C. 406
Tab. 5-3: Beschreibung der Bauteilaufbauten im Messraum. 413
Tab. 5-4: Zusammenfassung der Messkanäle des Testraums. 413
Tab. 5-5: Zeitplan der durchgeführten Versuche. 414
Tab. 5-6: Zusammenfassung einiger wichtiger Eingangsparameter für die Simulationen in WUFI® Plus 416
Tab. 5-7: Schichtaufbau des Fußbodens im WUFI® Plus Modell. Das TABS System bzw. die interne Wärmequelle werden in der Perlitschüttung angesetzt. 418
Tab. 5-8: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 1A. 425
Tab. 5-9: Validierungsfall 1A – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei 26°C und stationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 426
Tab. 5-10: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 1B. 427
Tab. 5-11: Validierungsfall 1B – ungedämmte Variante mit Fußbodenheizung bei instationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 428
Tab. 5-12: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 2A. 430
Tab. 5-13: Validierungsfall 2A –gedämmte Variante mit Wandheizung bei 25°C stationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 431
Tab. 5-14: Ergebnisse der Berechnungen für Validierungsfall 2B. 432

Tab. 5-15: Validierungsfall 2B –gedämmte Variante mit Wandheizung bei instationärer Beheizung. Tabellarischer Vergleich zwischen Mess- und Simulationsergebnissen. 433
Tab. 5-16: Überblick über die variablen Parameter. 435
Tab. 5-17: Überblick über die konstanten Parameter. 436
Tab. 5-18: Beschreibung der Nutzungsszenarien und ihrer Hauptcharakteristika. 438
Tab. 5-19: Aufenthaltszeiten in den verschiedenen Räumen einer Wohnung (Hamilton et al. 2013) sowie in einem Büro (werktags). 439
Tab. 5-20: Mittlere interne Wärmeleistung verschiedener Wärmequellen in Gebäuden. 441
Tab. 5-21: Typische Feuchtequellen für verschiedene Räume eines Gebäudes(Werte nach Willems 2008). 444
Tab. 5-22: Bewertungsgrößen und Erfolgskriterien für die Sicherstellung der Schadensfreiheit. 449
Tab. 5-23: Optimale Operativtemperaturen in Abhängigkeit von Kleidungs- und Aktivitätsgrad für die verschiedenen Nutzungsszenarien 452
Tab. 5-24: Übertemperaturgradstunden der unterschiedlichen Dämmstrategien bei 3 verschiedenen Lüftungsvarianten....455
Tab. 5-25: Gegenüberstellung des Referenzfalls und der Parameterkombination mit den größtmöglichen Energieeinsparungen jeweils für 1 und für 2 Außenwände. 463
Tab. 5-26: Benötigte Heizenergiemenge für die drei „realen Nutzungsszenarien“ sowie Ersparnisse der beiden intermittierenden Szenarien (Profil 2 und 3) gegenüber dem kontinuierlichen Szenario. 469
Tab. 5-27: Benötigte Heizenergiemenge für die fünf untersuchten Nutzungsszenarien sowie Ersparnisse des intermittierenden Betriebs gegenüber dem kontinuierlichen Szenario und gewünschte Zieltemperatur. 471
Tab. 5-28: Zusammenfassung der empfohlenen Parameterkombinationen für jedes Nutzungsszenario. 472
Tab. 5-29: Bestimmung des für Innendämmung relevanten Anteils des Gebäudebestands. ...474
Tab. 5-30: Bestimmung der für Innendämmung relevanten Gebäudefläche. 474
Tab. 5-31: Annahmen für die Verteilung der relevanten Wohnfläche auf die verschiedenen Nutzungsszenarien. 475
Tab. 5-32: Ergebnisse der Wohnflächenermittlung je Nutzungsszenario. 476
Tab. 5-33: Energieverbrauch und Energieeinsparung je Nutzungsszenario. 476
Tab. 5-34: Gesamte Energieeinsparungen durch die empfohlenen Maßnahmen für den deutschen Gebäudebestand 476
Tab. 5-35: Zusammenfassung der Energieeinsparpotentiale 481
Tab. 5-36: Erläuterungen zu den farblichen Hinterlegungen der Auswertung. 506

5.8 Literaturverzeichnis

Antretter, Florian; Winkler, Matthias; Fink, Marcus; Pazold, Matthias; Radon, Jan; Stadler, Sebastian (2017): WUFI® Plus 3.1 Manual. Online verfügbar unter https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2017.07_WUFI-Plus-Manual_en.pdf [15.06.2017], zuletzt aktualisiert am 01.06.2017.

VDI 2078: Berechnung der Kühllast klimatisierter räume (VDI-Kühllastregeln).

Bischof, Wolfgang; Blank, Hubert; Borsch-Laaks, Robert (2009): Wohnungslüftung und Raumklima. Grundlagen, Ausführungshinweise, Rechtsfragen. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Hg. v. Helmut Künzel. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Brasche, Sabine; Bischof, Wolfgang (2005): Daily time spent indoors in German homes - Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. In: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* (208), S. 247–253. DOI: 10.1016/j.ijheh.2005.03.003.

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.html [23.06.2017].

Deutsches Atomforum e.V. (2015): Kernenergie in Zahlen 2015. Online verfügbar unter http://www.datf.de/kernenergie-wAssets/docs/service/621kernenergie-in-zahlen2015.pdf [20.09.2017].

Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter (2011): Datenbasis Gebäudebestand - Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag.

Dirlich, S.; Gruhler, K.; Deilmann, C. (2011): Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland. Berlin (BMVBS-Online-Publikation). Online verfügbar unter https://www.ioer.de/fileadmin/internet/IOER_Projekte/PDF/FB_E/P329_Beheizte_NWG_endbericht_110728_wa.pdf [21.09.2017].

Graf, A.; Voll, M. (2014): Praxisleitfaden: "Klimaschutz in der Stadtplanung". Teil 4: Energie und Gebäude. Frankfurt am Main.

Hamilton, Kimberley; Matthews, Melanie; Fernley, Louise (2013): Britain at Home Report (LLoyds Banking Group). Online verfügbar unter http://www.lloydsbankinggroup.com/globalassets/documents/media/press-releases/lloyds-bank/2013/3009_home_report.pdf [08.07.2017].

Intergovernmental Panel On Climate Change (2013): Human influence on climate clear, IPCC report says. Stockholm. Online verfügbar unter https://www.ipcc.ch/news_and_events/docs/ar5/press_release_ar5_wgi_en.pdf [20.08.2017].

Jagnow, Kati; Horschler, Stefan; Wolff, Dieter (2002): Die neue Energieeinsparverordnung 2002. Kosten- und verbrauchsoptimierte Gesamtlösungen ; Verordnungstext, Erläuterungen, Umsetzungshilfen. Köln: Dt. Wirtschaftsdienst.

Keller, B. (1997): Klimagerechtes Bauen. Grundlagen - Dimensionierung - Beispiele. Stuttgart: B.G. Teubner.

Mayer, Erhard (Hg.) (1995): Menschengerechte Raumklimatisierung durch Quelllüftung und Flächenkühlung. Forschungsergebnisse des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Forschungs- und Entwicklungsprogramm Arbeit und Technik. Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau. Stuttgart: IRB Verlag (Bauforschung für die Praxis, 13).

Nipkow, Jürg (2013): Typischer Haushalt-Stromverbrauch. Schlussbericht vom 13.09.2013 des Bundesamts für Energie BFE. Online verfügbar unter http://docplayer.org/15755229-Typischer-haushalt-stromverbrauch.html [08.07.2017].

Ökodesign Richtlinie (2008): Umwelt Bundesamt: Standby- und Schein-Aus-(Off-Mode)-Verluste und Verluste im vernetzen Bereitschaftsbetrieb. Verordnung (EG) Nr. 1275/2008. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/datenblatt_oekodesign-richtlinie_standby-_und_schein-aus-_off-mode-verluste_und_verluste_im_vernetzten_bereitschaftsbetrieb.pdf [08.07.2017], zuletzt aktualisiert am 2008.

Siegel, R.; Howell, J.R. (2002): Thermal Radiation Heat Transfer. 4. Auflage. New York: Taylor & Francis.

Statistisches Bundesamt (2017): Wohnungen - Wohnungsbestand in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Wohnen/Tabellen/Wohnungsbestand.html [07.10.2017].

Umwelt Bundesamt (2017): Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren [04.10.2017].

Verband Fenster + Fassade & Bundesverband Flachglas (2014): Mehr Energie sparen mit neuen Fenstern. Aktualisierung März 2014 der Studie "Im neuen Licht: energetische Modernisierung von alten Fenstern", Stand: März 2014. Frankfurt, Troisdorf: VFF, Verband Fenster + Fassade; BF, Bundesverband Flachglas e.V.

Viessmann (2005): Fachreihe Heizungsmodernisierung. Heizungsmodernisierung spart Brennstoff und schont die Umwelt. Allendorf (Eder): Hohage & Co.

DIN 4108-2:2012-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.

DIN EN ISO 13791:2012: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren (ISO 13791:2012).

Willems, Wolfgang (2008): Lehrbuch der Bauphysik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Winkler, Matthias; Antretter, Florian; Radon, Jan (2016): Implementation and validation of a longwave heat exchange model, Buildings XIII International Conference. Atlanta, Ga.: ASHRAE.

A.5 Energetische Betrachtung von Innendämmungen im intermittierenden Betrieb unter Komfortbedingungen

A.5.1 Testraum für Innendämmungen – Ansichten und Messpositionen

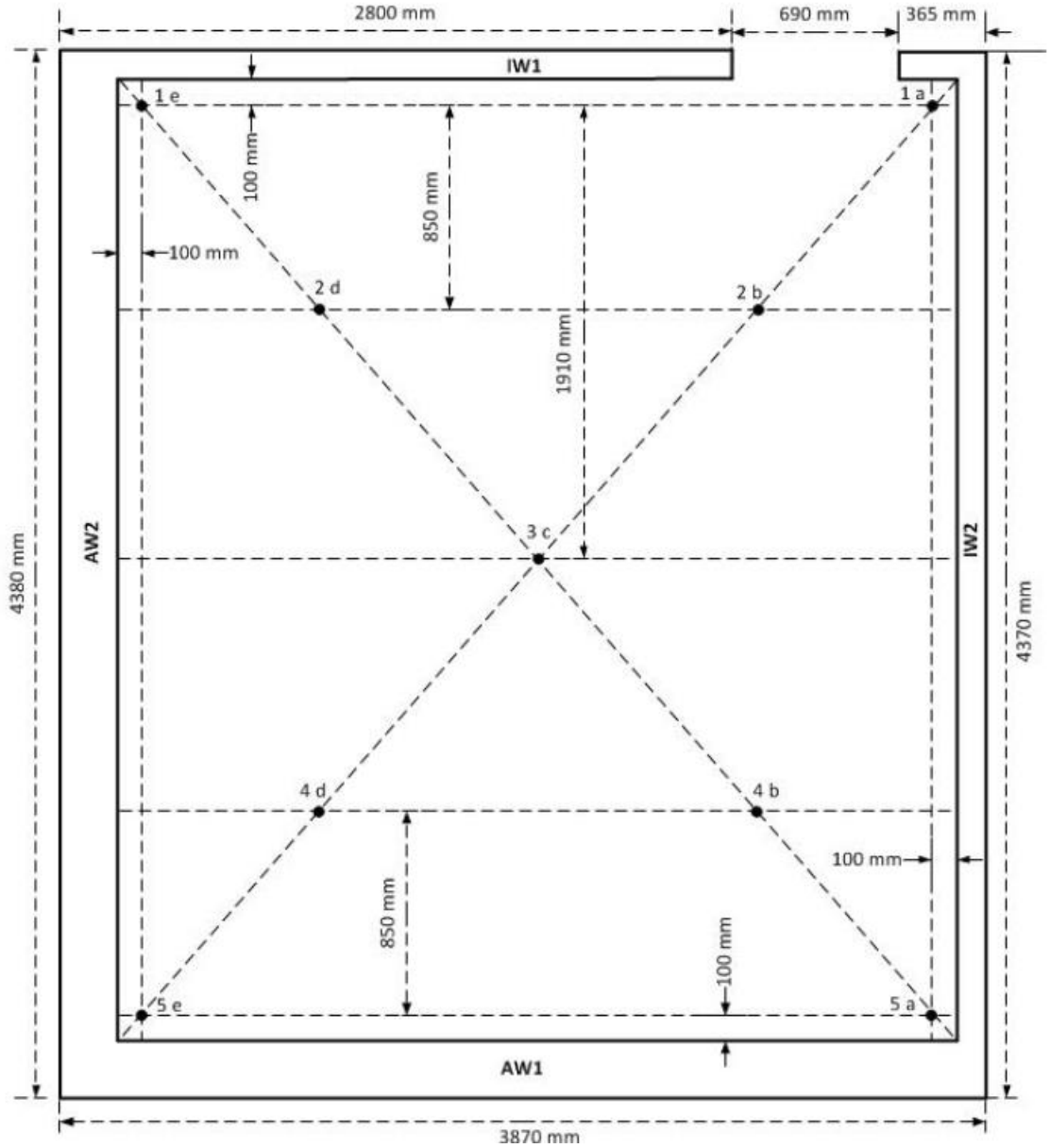


Abb. 5-33: Horizontaler Schnitt durch den Messraum mit den einzelnen Messpositionen. Die dargestellten Messpositionen sind gültig für die Oberseite der Decke, die Unterseite der Decke und für die Oberseite des Fußbodens.

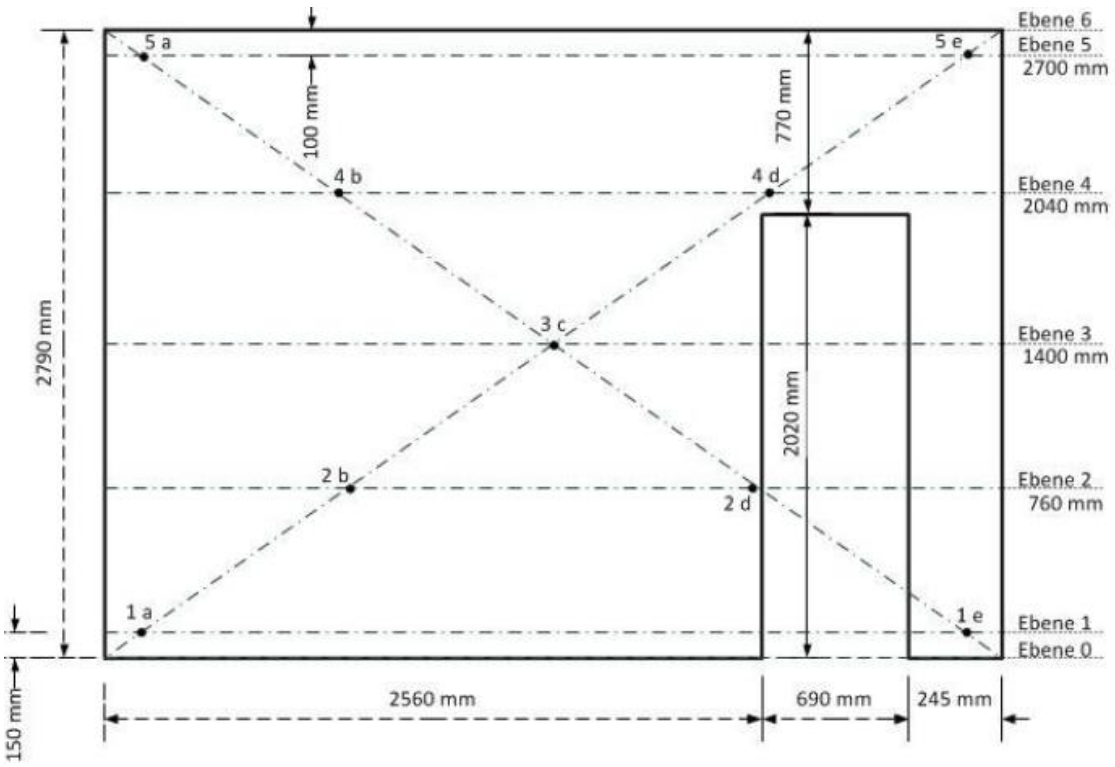


Abb. 5-34: Innenansicht der Innenwand 1 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen.

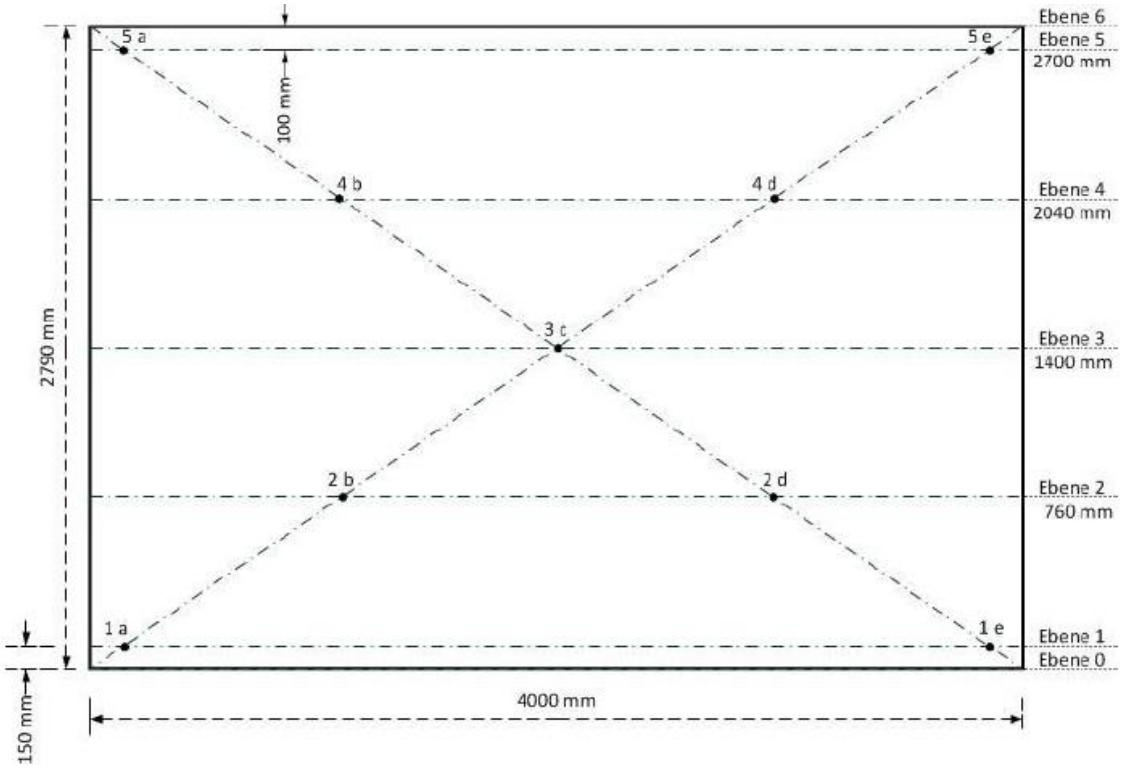


Abb. 5-35: Innenansicht der Innenwand 2 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen.

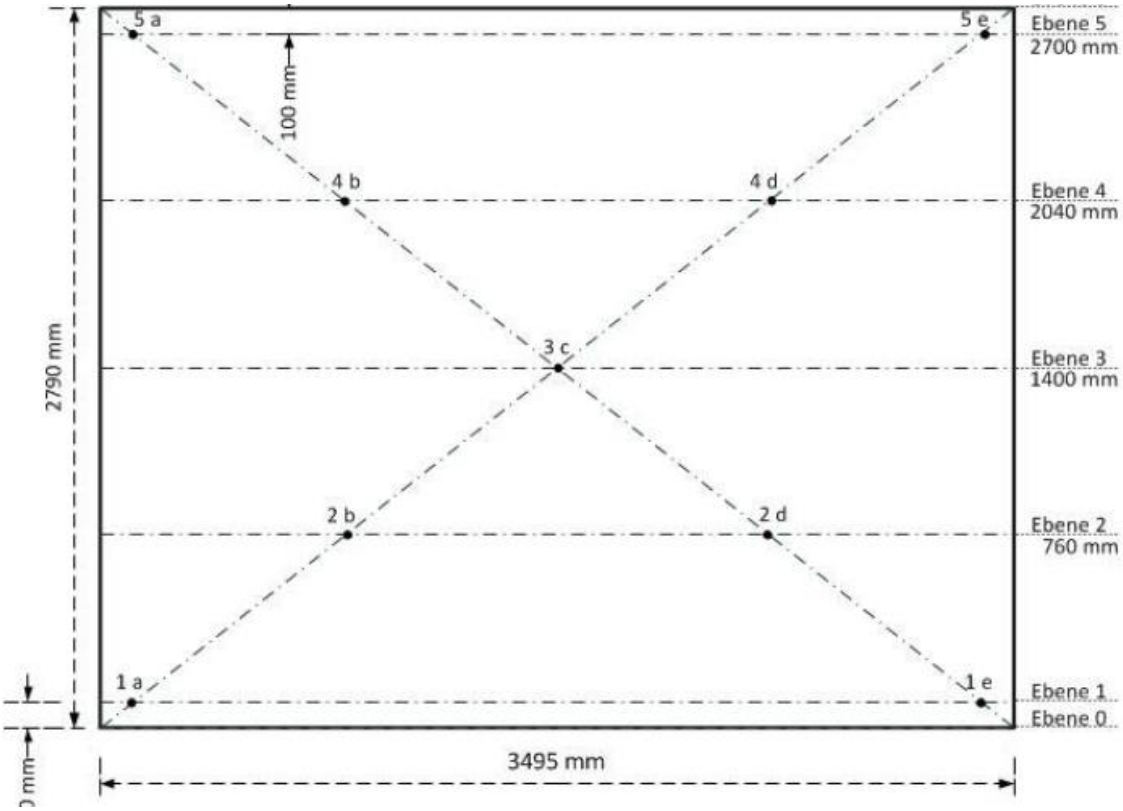


Abb. 5-36: Innenansicht der Außenwand 1 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen.

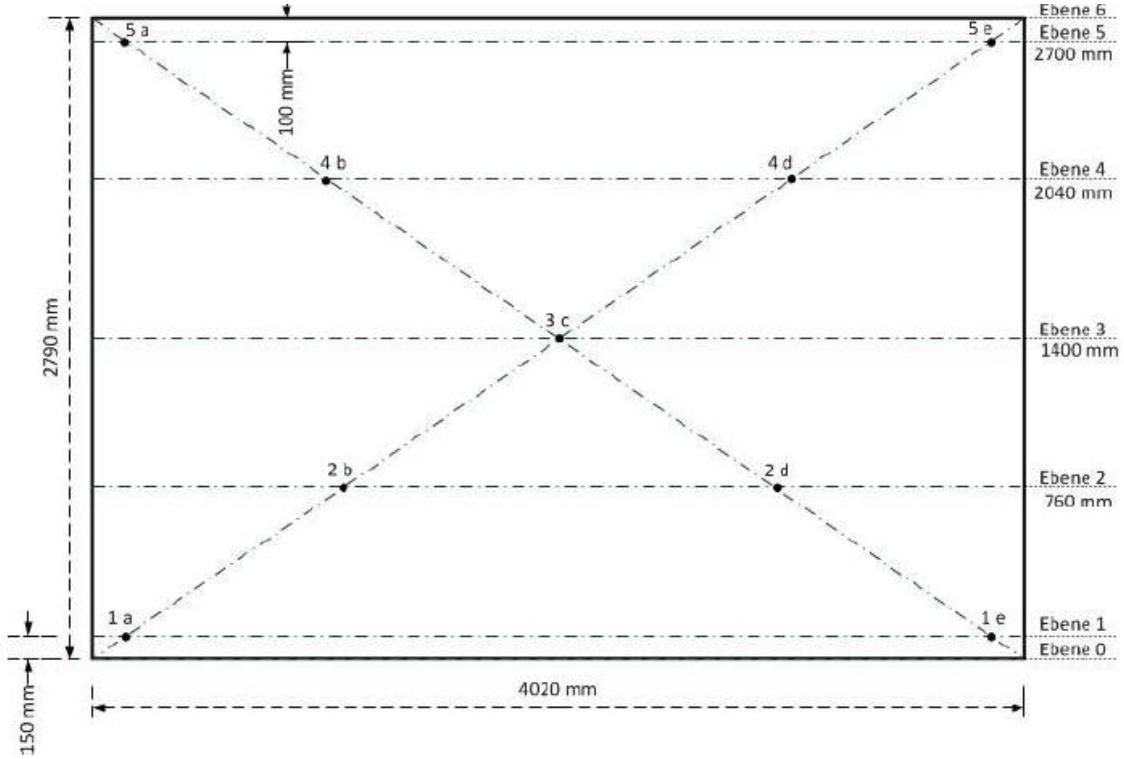


Abb. 5-37: Innenansicht der Außenwand 2 mit den jeweiligen Abmessungen und den einzelnen Messpositionen.

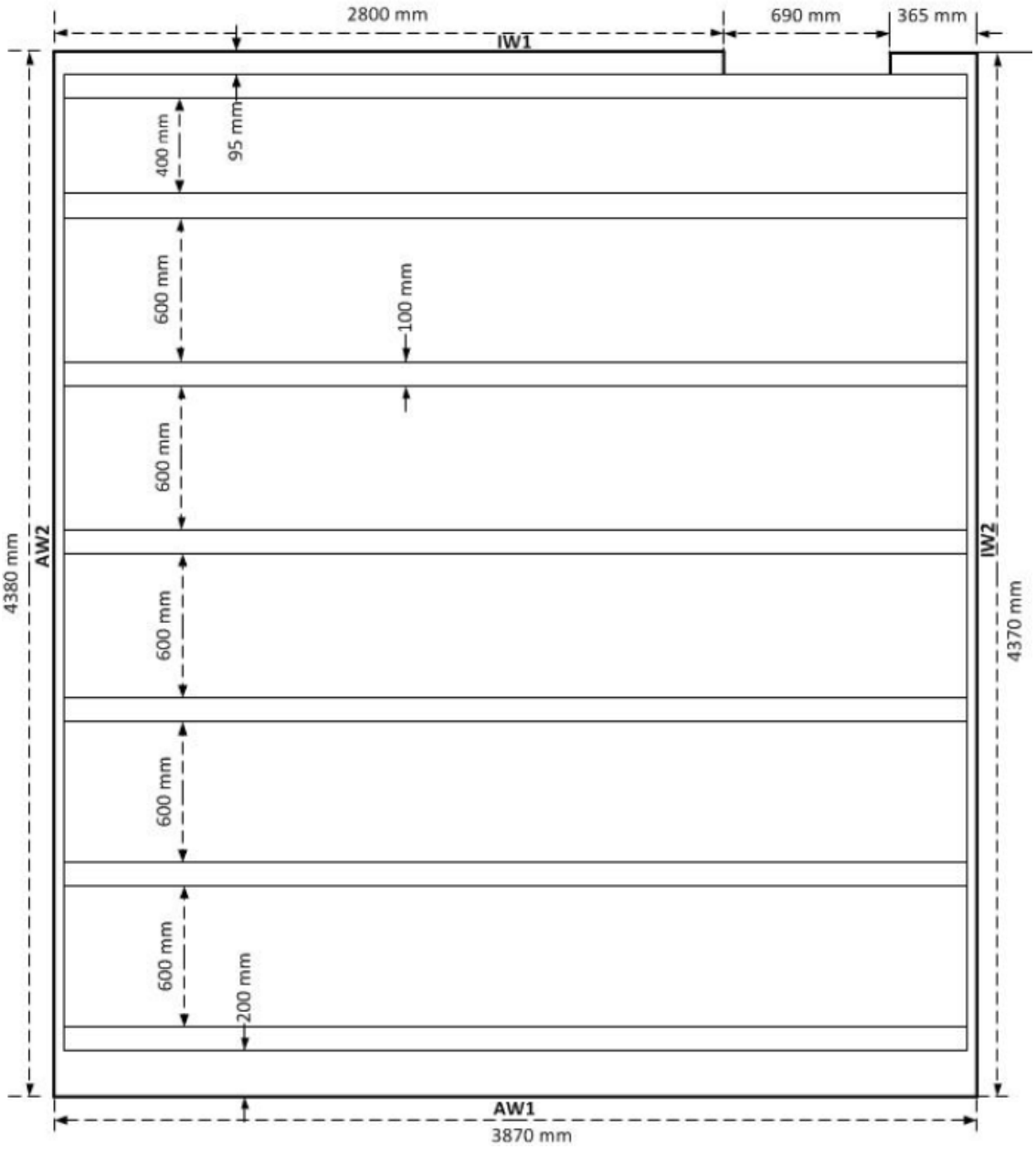


Abb. 5-38: Draufsicht des Messraums

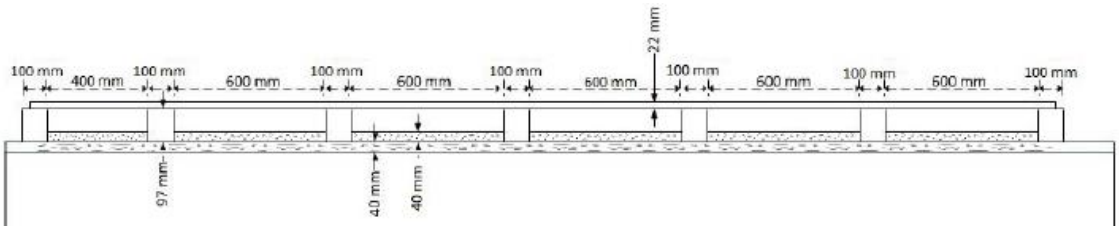


Abb. 5-39: Querschnitt des Deckenaufbaus (Schnitt AW2) mit 22mm starker Holzplatte zur sicheren Begehung.

A.5.2 Validierungsfall 1B – Oberflächentemperaturen und konvektive Wärmeströme der einzelnen Messpositionen

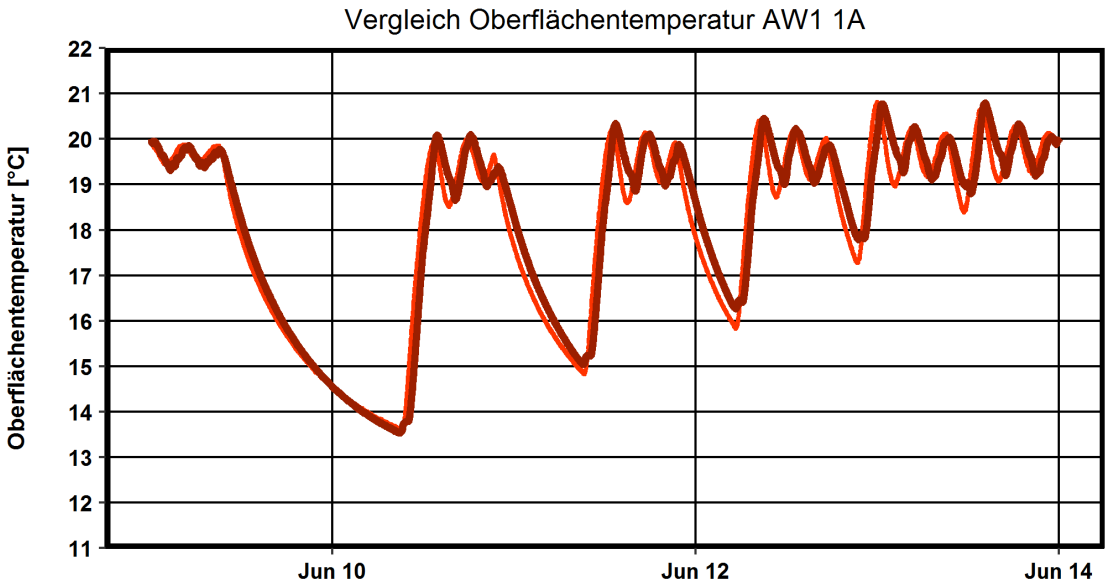


Abb. 5-40: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

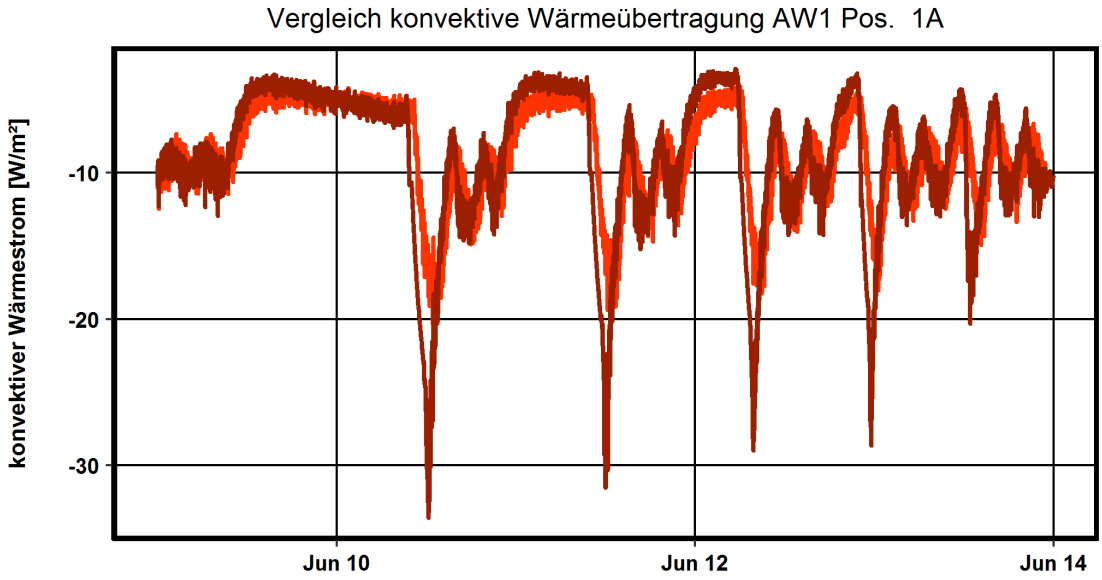


Abb. 5-41: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

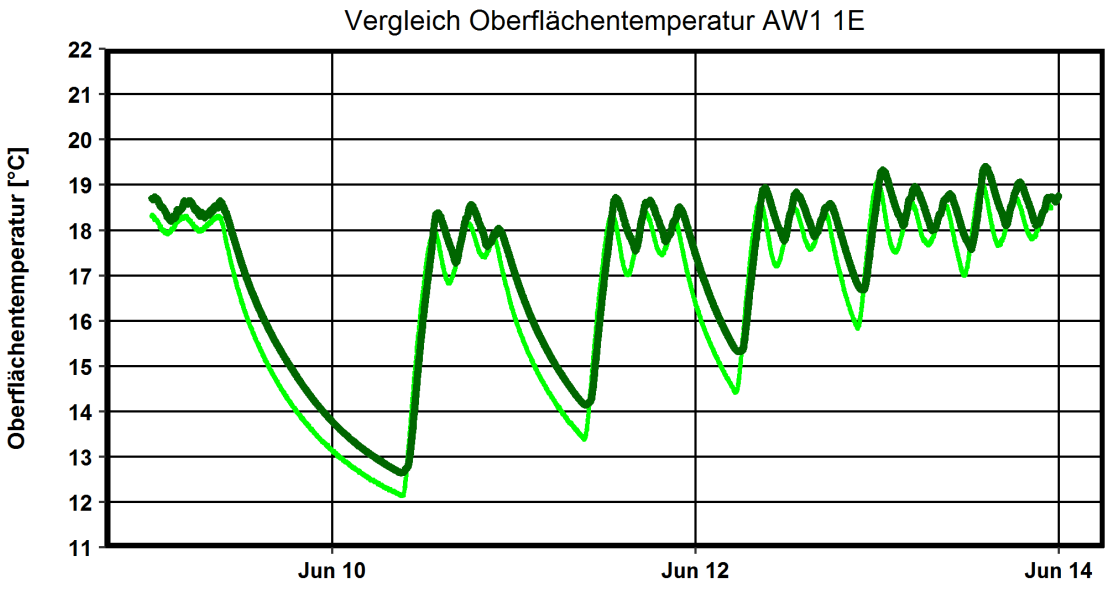


Abb. 5-42: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

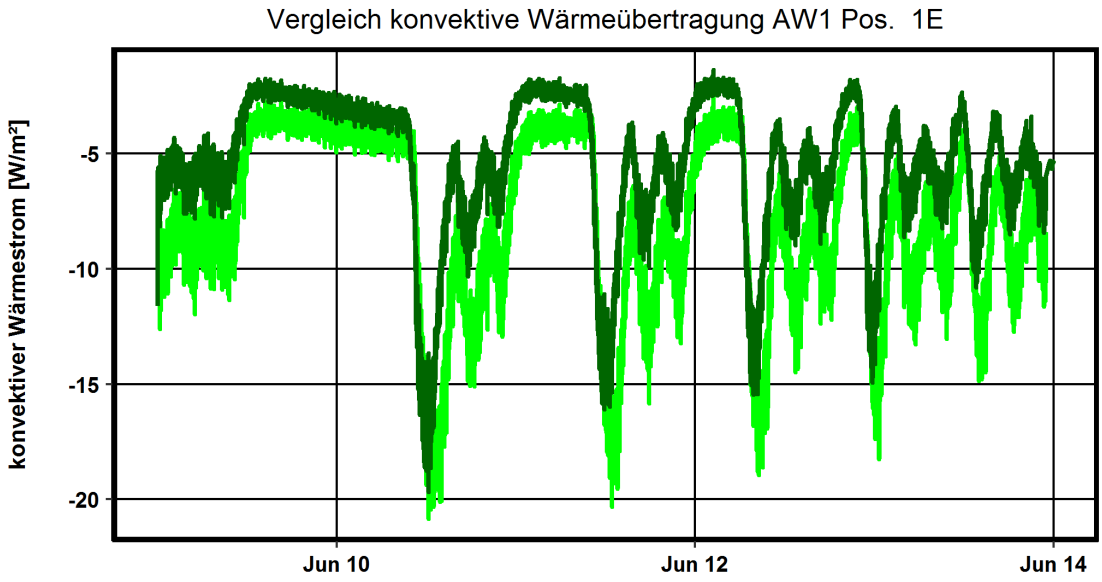


Abb. 5-43: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

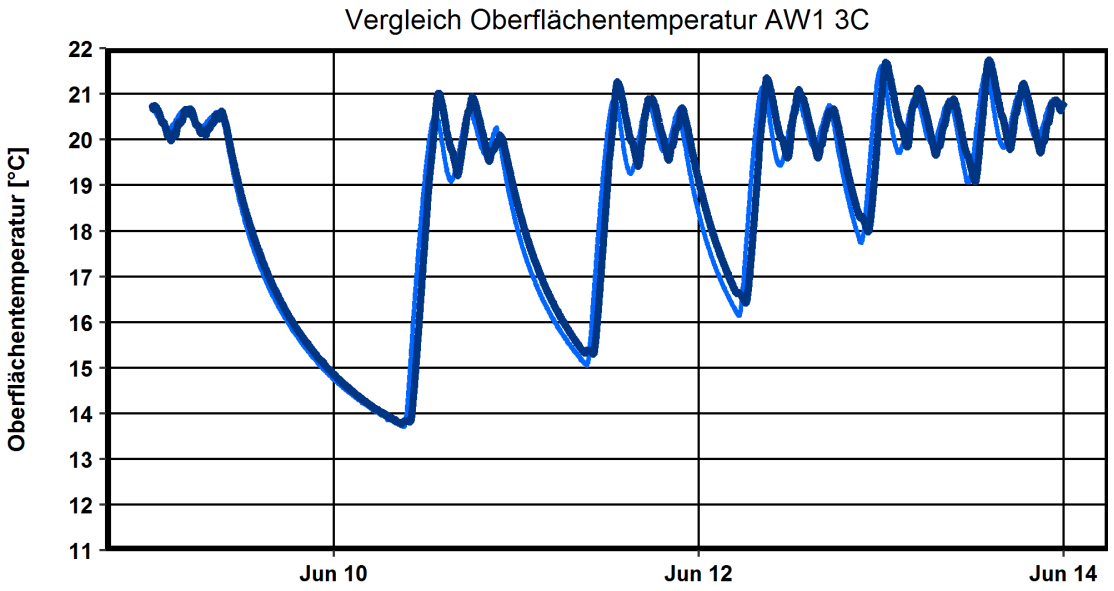


Abb. 5-44: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

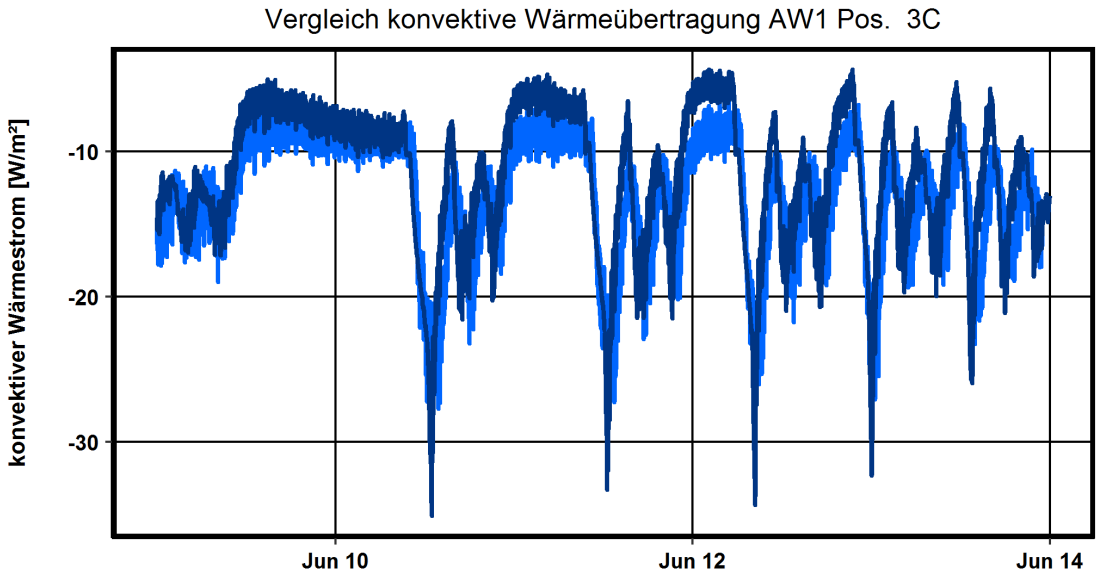


Abb. 5-45: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

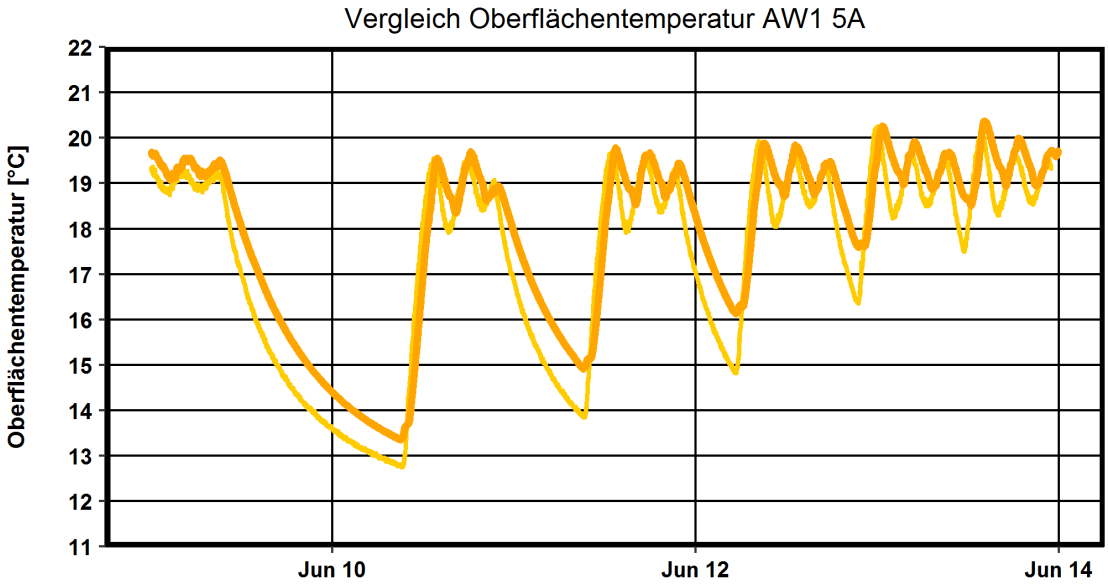


Abb. 5-46: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

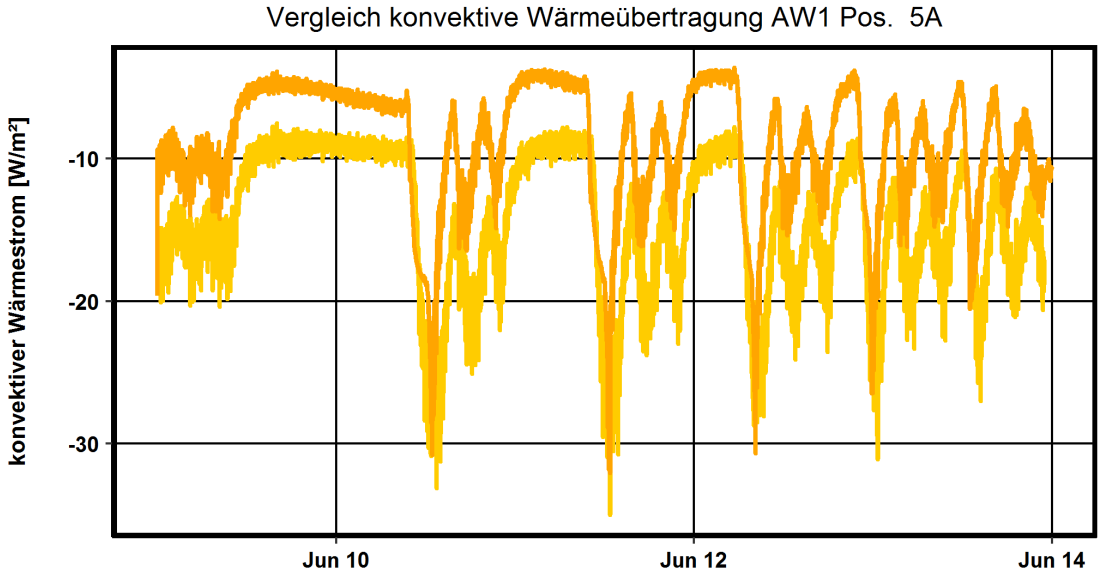


Abb. 5-47: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

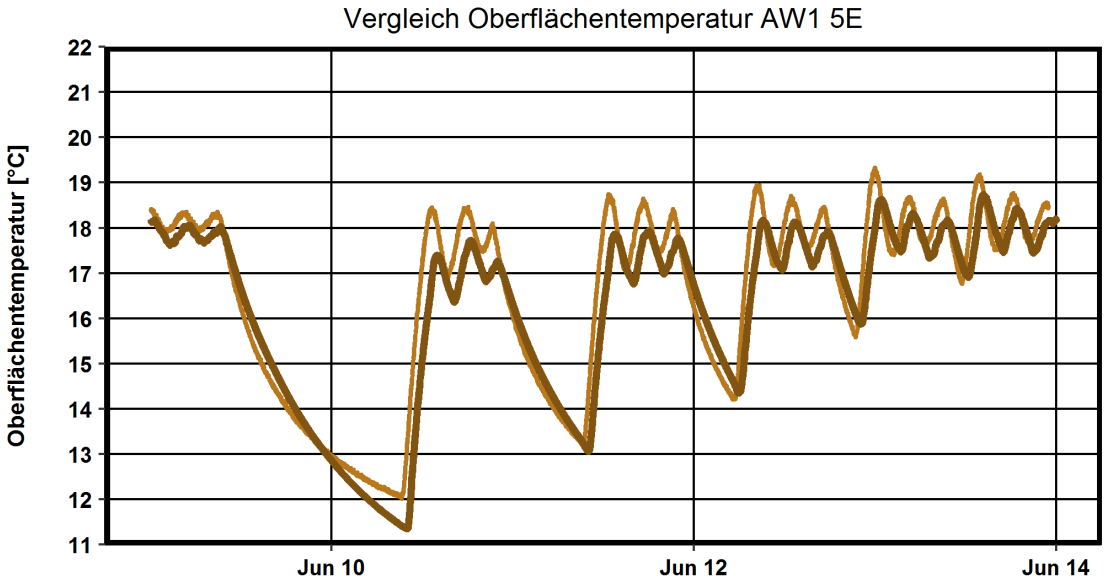


Abb. 5-48: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B - Oberflächentemperaturen Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

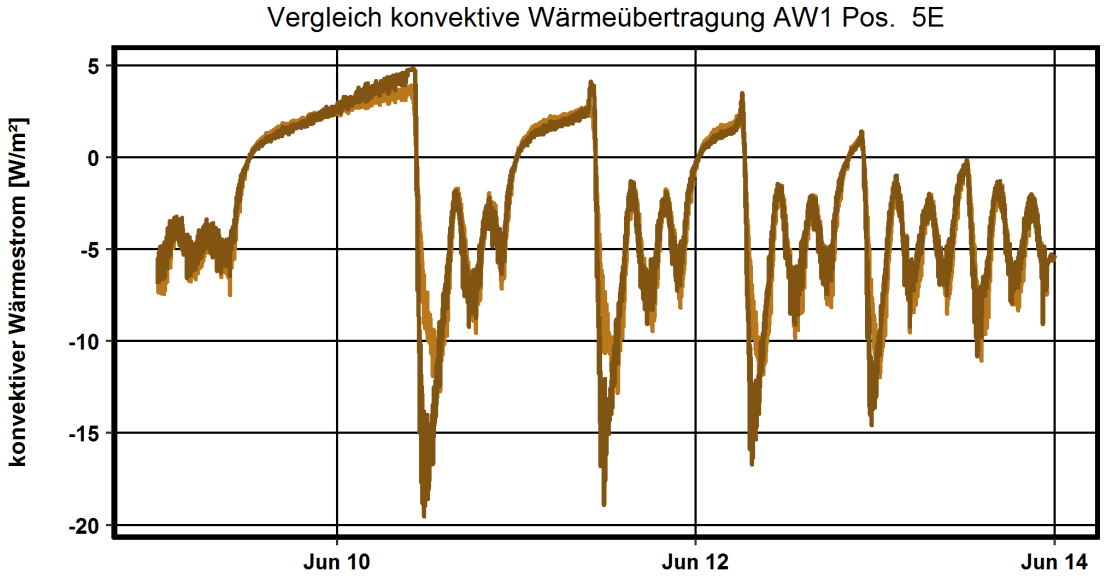


Abb. 5-49: Validierungsfall Strahlungsmodell 1B – Konvektive Wärmeströme Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

A.5.3 Validierungsfall 2B – Oberflächentemperaturen und konvektive Wärmeströme der einzelnen Messpositionen

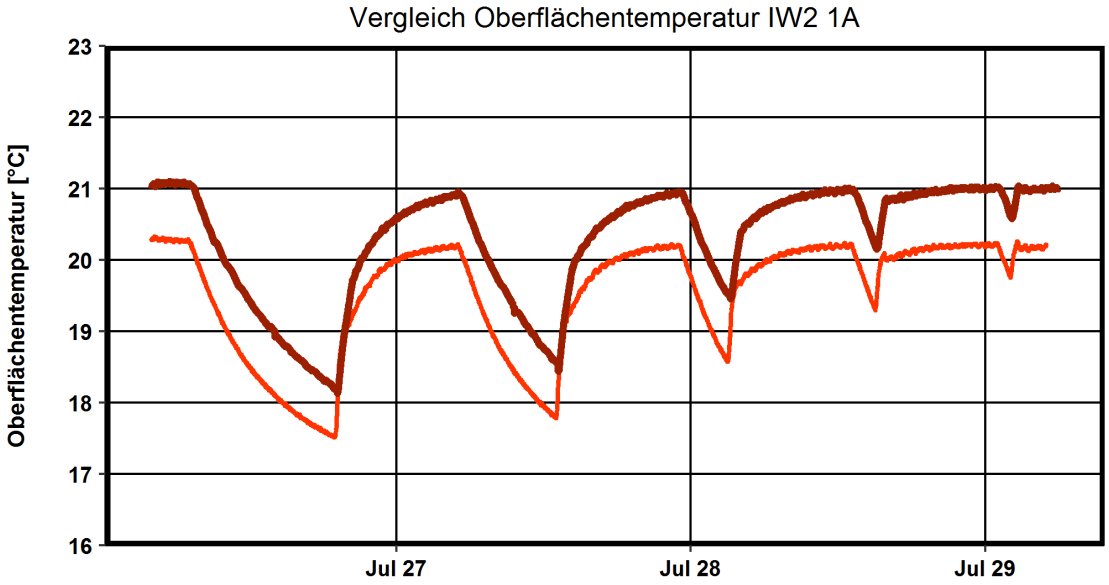


Abb. 5-50: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

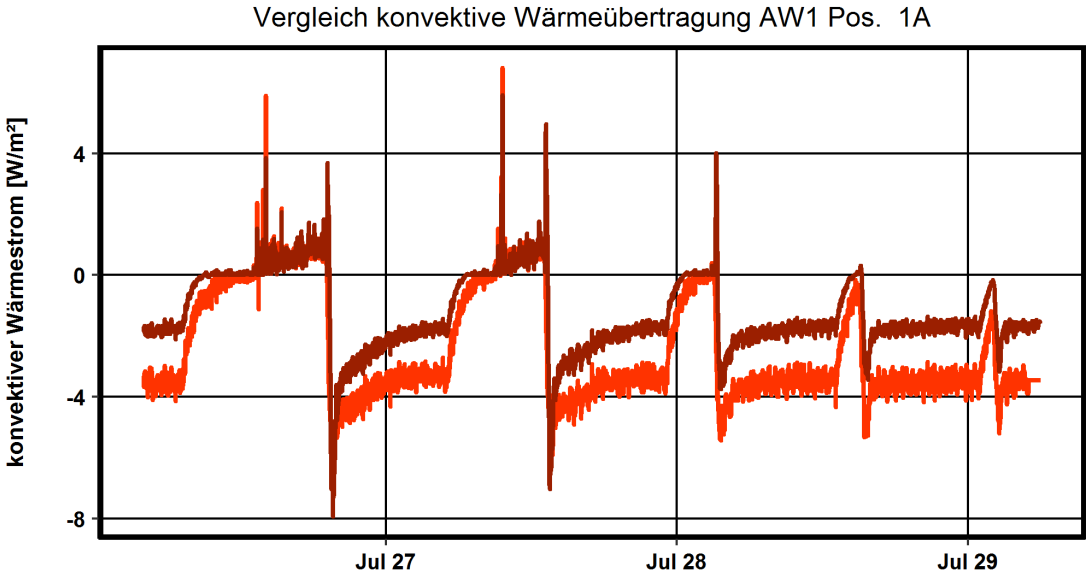


Abb. 5-51: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 1A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

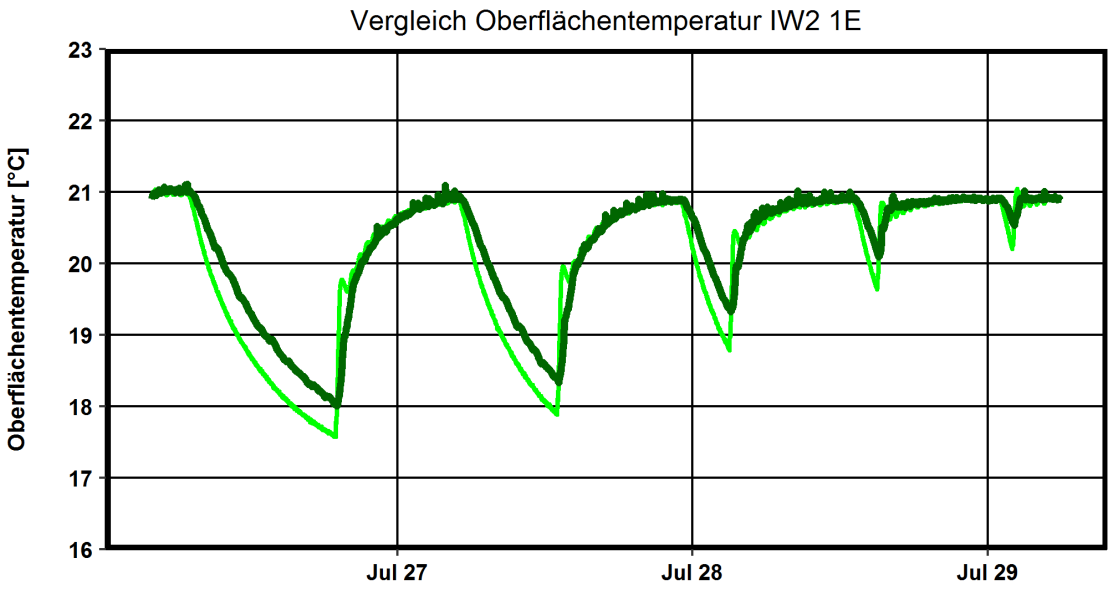


Abb. 5-52: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

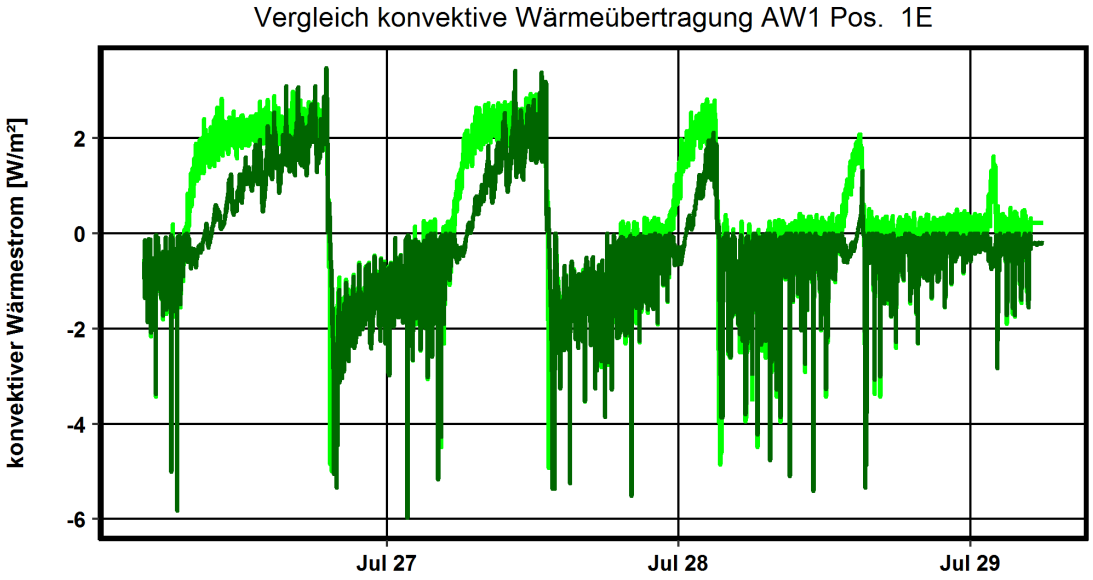


Abb. 5-53: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 1E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

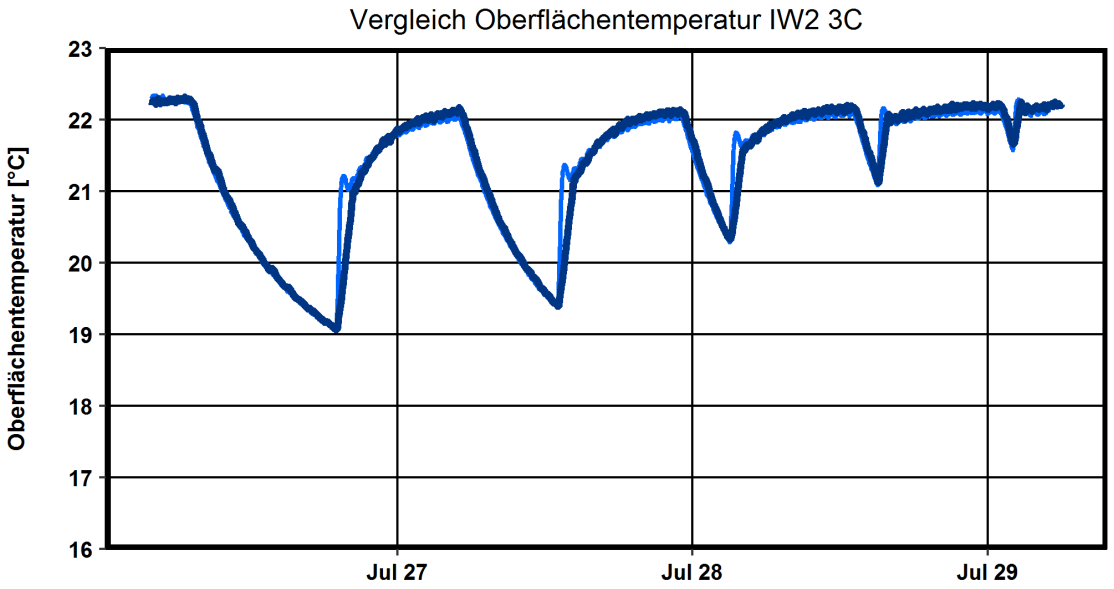


Abb. 5-54: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

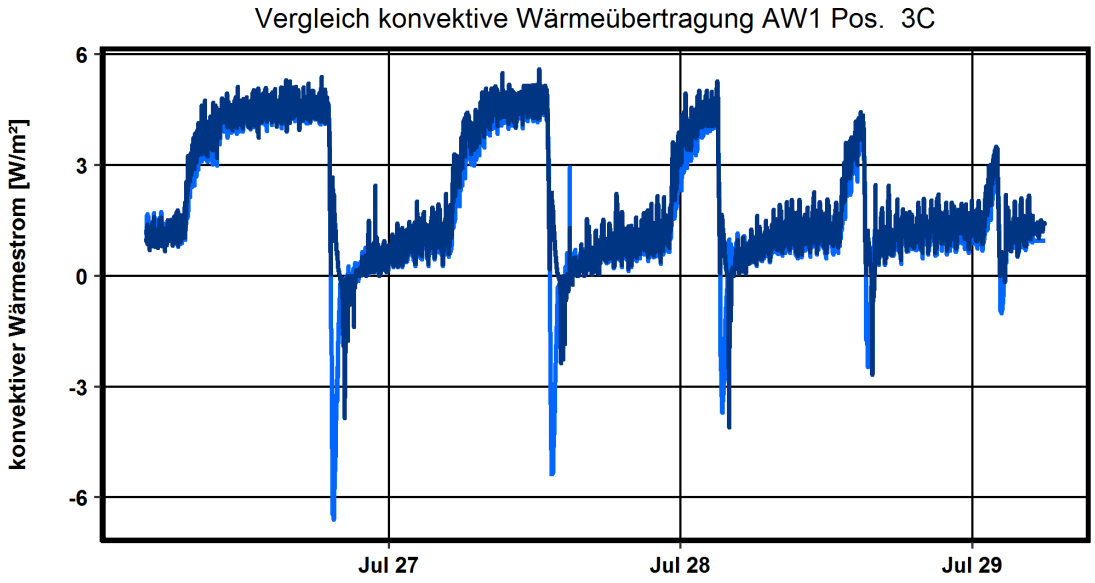


Abb. 5-55: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 3C. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

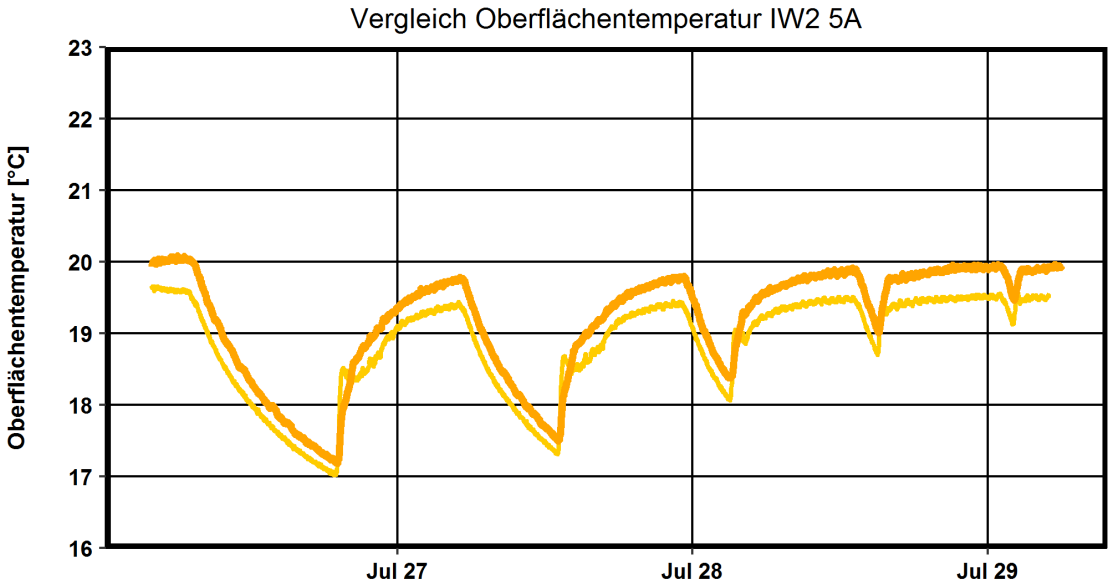


Abb. 5-56: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

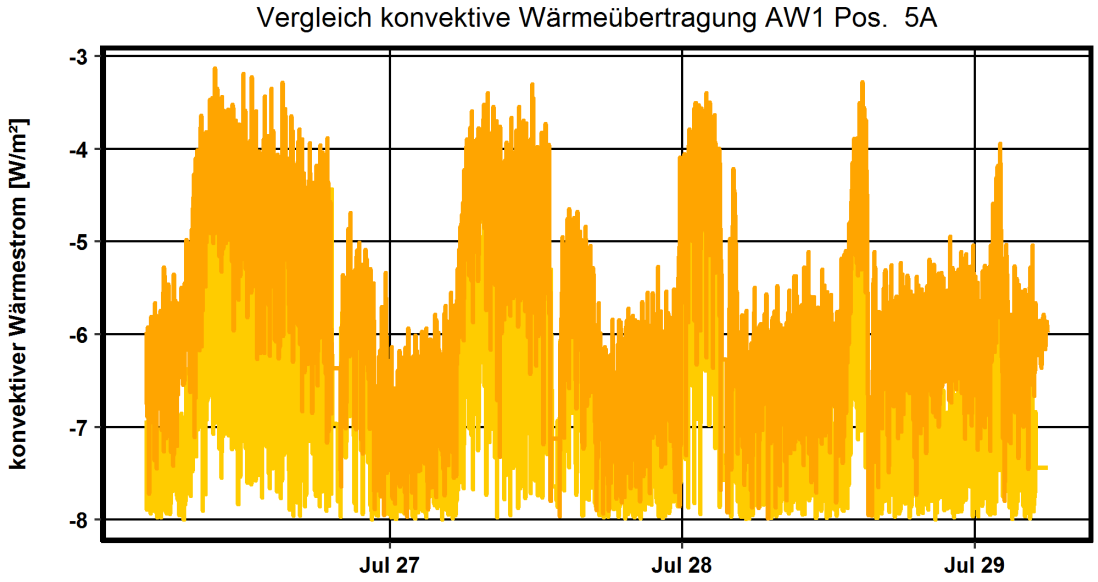


Abb.5-57: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 5A. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

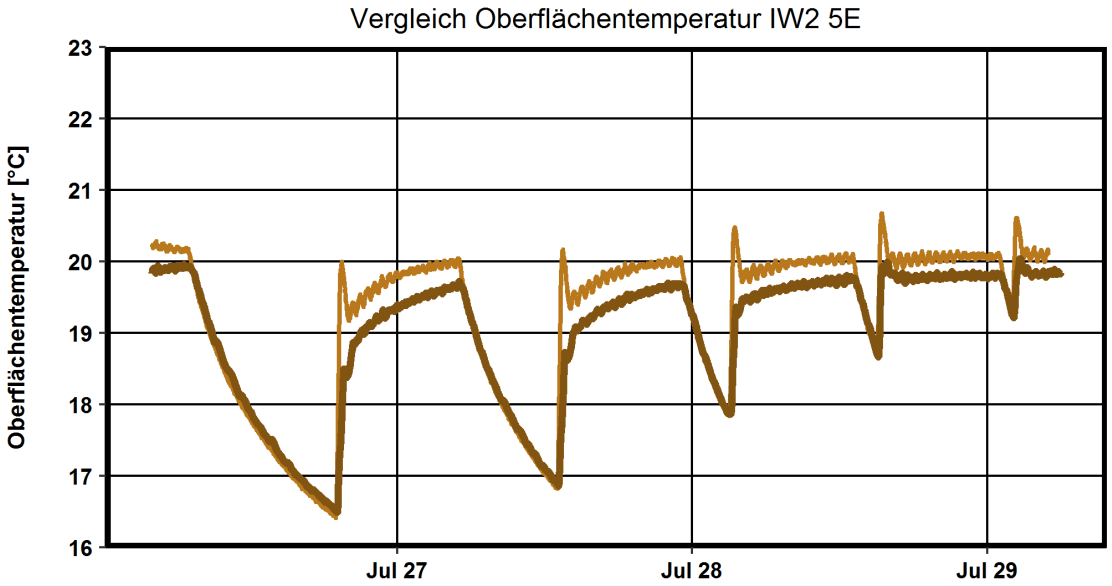


Abb. 5-58: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B - Oberflächentemperaturen Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

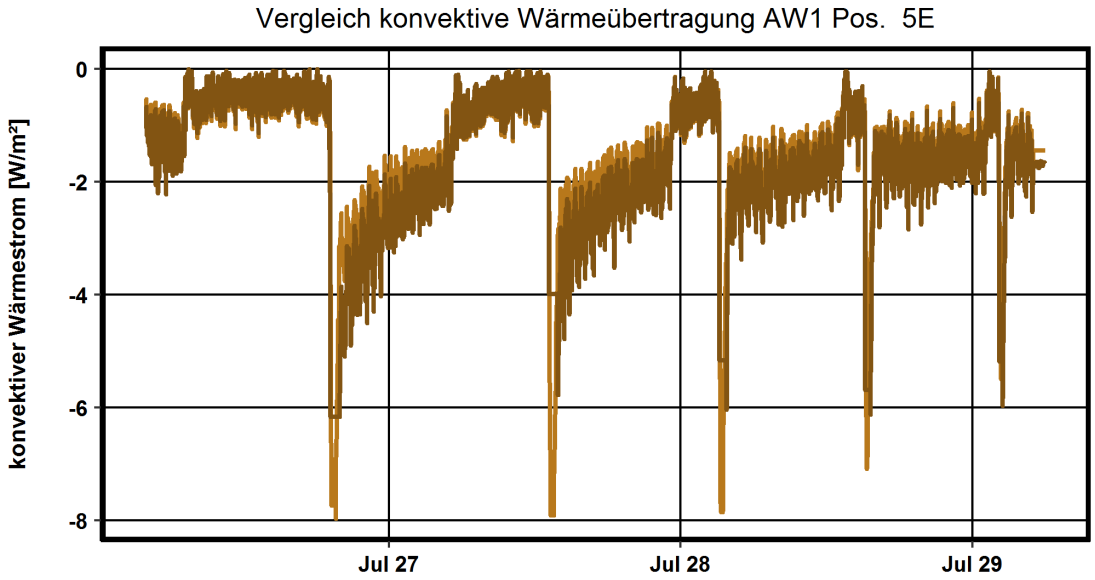


Abb. 5-59: Validierungsfall Strahlungsmodell 2B – Konvektive Wärmeströme Position 5E. Die dunklere Linie entspricht der Wufi® Plus Simulation, die hellere den Messwerten.

A.5.4 Bestandskonstruktionen Parameterstudie

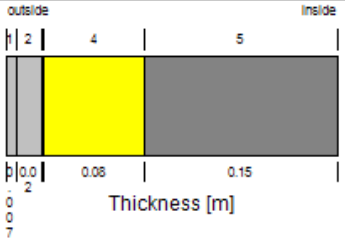
Assembly (Id.3): Decke bis 1983

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,131 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 0,44 W/m²K

Thickness: 0,258 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Fliesen	2000	850	1	0,007	
2	Zementestrich µ=35	2000	850	1,4	0,02	
3	vapour retarder (sd=50m)	130	2300	2,3	0,001	
4	EPS (heat cond.: 0.04 W/mK - density: 30kg/m³)	30	1500	0,04	0,08	
5	Concrete	2104	776	1,373	0,15	

Abb. 5-60: Für die Parameterstudie verwendeter Deckenaufbau.

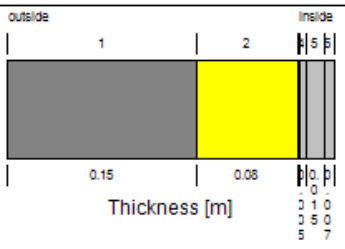
Assembly (Id.5): Boden mit Fußbodenheizung bis 1983

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,131 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 0,427 W/m²K

Thickness: 0,258 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Concrete	2104	776	1,373	0,15	
2	EPS (heat cond.: 0.04 W/mK - density: 30kg/m³)	30	1500	0,04	0,08	
3	vapour retarder (sd=50m)	130	2300	2,3	0,001	
4	Zementestrich µ=35	2000	850	1,4	0,005	
5	Zementestrich µ=35	2000	850	1,4	0,015	
6	Fliesen	2000	850	1	0,007	

Abb. 5-61: Für die Parameterstudie verwendeter Fußbodenaufbau. Bei Beheizung mit Fußbodenheizung befindet sich das TABS System in Ebene 4.

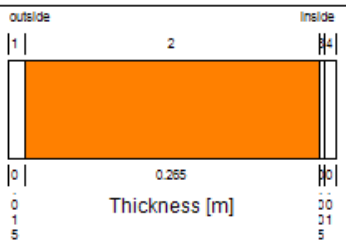
Assembly (Id.1): Außenwand Hohlziegel bis 1983

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,581 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 1,332 W/m²K

Thickness: 0,295 m



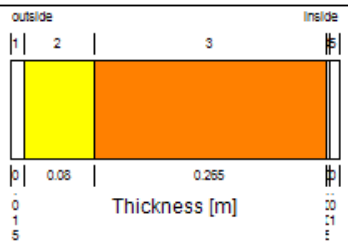
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Kalk Zementputz	1900	1000	0,8	0,015	
2	Hohlziegel ID	1200	1000	0,49	0,265	
3	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,005	
4	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,934 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 0,322 W/m²K

Thickness: 0,375 m



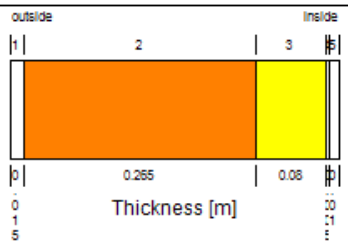
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Kalk Zementputz	1900	1000	0,8	0,015	
2	XPS Klimakammer ID	40	1500	0,034	0,08	
3	Hohlziegel ID	1200	1000	0,49	0,265	
4	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,005	
5	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	

Homogenous layers

Thermal resistance: 2,934 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 0,322 W/m²K

Thickness: 0,375 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	Kalk Zementputz	1900	1000	0,8	0,015	
2	Hohlziegel ID	1200	1000	0,49	0,265	
3	XPS Klimakammer ID	40	1500	0,034	0,08	
4	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,005	
5	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	

Abb. 5-62: Variationen der in der Parameterstudie verwendeten Außenwände. Ungedämmt (oben), Außendämmung (Mitte, beispielhaft 8cm), Innendämmung (unten, beispielhaft 8cm)

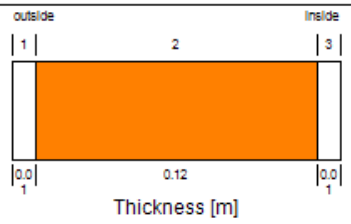
Assembly (Id.2): Innenwand Hohlziegel

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,273 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 2,255 W/m²K

Thickness: 0,14 m



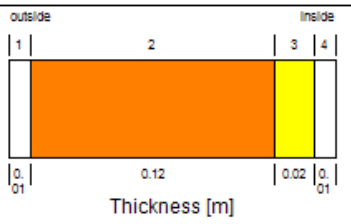
Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	
2	Hohlziegel ID	1200	1000	0,49	0,12	
3	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	

Homogenous layers

Thermal resistance: 0,862 m²K/W (without Rsi, Rse)

Heat transfer coefficient (U-value): 0,969 W/m²K

Thickness: 0,16 m



Nr.	Material/Layer (from outside to inside)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Thickness [m]	Color
1	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	
2	Hohlziegel ID	1200	1000	0,49	0,12	
3	XPS Klimakammer ID	40	1500	0,034	0,02	
4	ID_Kalktputz für F	1600	850	0,7	0,01	

Abb. 5-63: Variationen der in der Parameterstudie verwendeten Innenwände. Ungedämmt (oben), Innendämmung 2cm (unten)

A.5.5 Auswertung der Parameterstudie: Kombinierte Betrachtung von thermischer Behaglichkeit und Energiesparpotential - tabellarische Darstellung

In den folgenden Tabellen ist ein Teil der Auswertung der Parameterstudie abgebildet. Aus Platzgründen wird an dieser Stelle auf die gesamte Auswertung (288 Fälle oder mehr pro Nutzungsszenario) verzichtet. Stattdessen sind für jeweils eine und zwei Außenwände die 45 Varianten mit den höchsten Punktzahlen sowie die ungedämmte Variante als Vergleich abgebildet.
Die farbliche Hinterlegung einiger Tabellenzeilen kann wie folgt verstanden werden:

Tab. 5-36: Erläuterungen zu den farblichen Hinterlegungen der Auswertung.

Farbe	Bedeutung
	Varianten, die das Mindestkriterium an die thermische Behaglichkeit (mindestens 80% der Anwesenheitsminuten im Komfortbereich) nicht erfüllen; werden nicht bei der Auswahl der Variante mit dem geringsten Energieverbrauch berücksichtigt
	Variante mit dem niedrigsten Energieverbrauch, die das Mindestkriterium an die thermische Behaglichkeit erfüllt; wird als Referenzwert für die höchstmögliche Energieeinsparung für das Nutzungsszenario und die jeweilige Zahl der Außenwände verwendet
	Variante mit der höchsten Gesamtpunktzahl; entspricht der empfohlenen Variante
	Referenzfall für das jeweilige Nutzungsszenario (ungedämmt, Radiator, kontinuierlicher Betrieb); Energieverbrauch wird als Bezugswert für die Höhe der prozentualen Energieeinsparungen verwendet

#	NZ1 KÜCHE 1AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ1_MIN18_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**58.8**	**64.3**	**92.8**	**189.3**
2	NZ1_MIN18_ID8	RAD	Anwesenh.	58.6	64.4	90.3	187
3	NZ1_MIN18_AD8	RAD	Anwesenh.	59.1	64.1	89.5	185.8
4	NZ1_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	71.9	56.4	100	184.7
5	NZ1_ID8	RAD	Nachtabs.	71.9	56.4	100	184.7
6	NZ1_AD8	RAD	Nachtabs.	72.6	55.9	100	184
7	NZ1_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	73.5	55.4	100	183.2
8	NZ1_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	74.1	55.1	100	182.7
9	NZ1_ID8_IW	RAD	Kontin.	75.2	54.4	100	181.6
10	NZ1_ID8	RAD	Kontin.	75.8	54	100	181.1
11	NZ1_AD8	RAD	Kontin.	76	53.9	100	180.9
12	**NZ1_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**55.1**	**66.6**	**80.2**	**180.1**
13	NZ1_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	76.9	53.3	100	180
14	NZ1_ID6	RAD	Nachtabs.	77	53.3	100	180
15	NZ1_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	77	53.3	100	180
16	NZ1_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	77.6	52.9	100	179.4
17	NZ1_ID8_LowE	RAD	Kontin.	77.7	52.8	100	179.3
18	NZ1_AD6	RAD	Nachtabs.	77.7	52.8	100	179.3
19	NZ1_ID8	WAND	Nachtabs.	77.8	52.8	100	179.3
20	NZ1_ID8	RAD	Anwesenh.	54.6	66.9	77.9	178.3
21	NZ1_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	79.8	51.5	100	177.4
22	NZ1_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	56.4	65.8	78.7	177.4
23	NZ1_AD8	WAND	Nachtabs.	80.1	51.4	100	177.1
24	NZ1_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	80.4	51.2	100	176.9
25	NZ1_ID6_IW	RAD	Kontin.	80.7	51	100	176.6
26	NZ1_ID8_IW	WAND	Kontin.	80.9	50.9	100	176.4
27	NZ1_ID8_IW	FB	Nachtabs.	81.1	50.8	100	176.3
28	NZ1_ID8	FB	Nachtabs.	81.1	50.8	100	176.2
29	NZ1_ID6	RAD	Kontin.	81.3	50.7	100	176.1
30	NZ1_AD8	RAD	Anwesenh.	54.8	66.7	75.8	176
31	NZ1_AD6	RAD	Kontin.	81.5	50.6	100	175.9
32	NZ1_ID8	WAND	Kontin.	81.6	50.5	100	175.8
33	NZ1_AD8	FB	Nachtabs.	81.6	50.5	100	175.8
34	NZ1_AD8	WAND	Kontin.	82.1	50.2	100	175.4
35	NZ1_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	59	64.2	79	175.4
36	NZ1_ID8_IW_LowE	WAND	Kontin.	83.2	49.5	100	174.3
37	NZ1_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	56.5	65.7	75.6	174.3
38	NZ1_ID8_IW	FB	Kontin.	83.6	49.3	100	174
39	NZ1_ID8_LowE	WAND	Kontin.	83.8	49.1	100	173.8
40	NZ1_ID8_IW_LowE	FB	Nachtabs.	84	49	100	173.6
41	NZ1_ID6_IW	WAND	Nachtabs.	84.1	49	100	173.5
42	NZ1_ID6	WAND	Nachtabs.	84.2	48.9	100	173.4
43	NZ1_ID8	FB	Kontin.	84.3	48.9	100	173.4
44	NZ1_AD8	FB	Kontin.	84.5	48.7	100	173.2
45	NZ1_ID6	RAD	Anwesenh.	58.5	64.5	76.4	173.2
	NZ1_OD	FB	Kontin.	178.6	-8.4	100	87.5
	NZ1_OD	FB	Nachtabs.	170.1	-3.2	99.9	95.1
	NZ1_OD	FB	Anwesenh.	130.1	21.1	50	81.5
	NZ1_OD	WAND	Kontin.	209.6	-27.2	100	59.3
	NZ1_OD	WAND	Nachtabs.	200.5	-21.7	100	67.6
	NZ1_OD	WAND	Anwesenh.	150.9	8.4	47.6	60.2
Ref	**NZ1_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**164.8**	**0**	**100**	**100**
	NZ1_OD	RAD	Nachtabs.	155.5	5.7	100	108.5
	NZ1_OD	RAD	Anwesenh.	117.2	28.9	58.7	101.9

Abb. 5-64: Auswertung der Parameterstudie für NZ1 Küche und 1 Außenwand.

#	NZ1 KÜCHE 2AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ1_MIN18_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**87.4**	**70.7**	**92.5**	**190.6**
2	NZ1_MIN18_ID8	RAD	Anwesenh.	92.7	68.9	91.7	187.3
3	NZ1_ID8	RAD	Nachtabs.	111.8	62.5	100.0	186.7
4	NZ1_MIN18_AD8	RAD	Anwesenh.	93.5	68.7	91.1	186.3
5	NZ1_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	113.1	62.1	100	186.1
6	NZ1_AD8	RAD	Nachtabs.	113.3	62	100	186
7	NZ1_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	116.1	61.1	100	184.7
8	NZ1_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	116.3	61	100	184.6
9	NZ1_ID8	RAD	Kontin.	120.3	59.7	100	182.7
10	NZ1_AD8	RAD	Kontin.	120.3	59.6	100	182.7
11	NZ1_ID8_IW	RAD	Kontin.	121.2	59.3	100	182.3
12	NZ1_ID8	WAND	Nachtabs.	121.6	59.2	100	182.1
13	NZ1_ID6	RAD	Nachtabs.	122	59.1	100	181.9
14	NZ1_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	122.5	58.9	99.9	181.6
15	NZ1_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	122.7	58.8	99.9	181.5
16	NZ1_ID6_IW	RAD		123.3	58.7	100	181.3
17	NZ1_AD6	RAD	Nachtabs.	123.4	58.6	100	181.3
18	NZ1_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	123.1	58.7	99.7	181.1
19	NZ1_ID8_LowE	RAD	Kontin.	124.4	58.3	100	180.8
20	NZ1_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	124.9	58.1	100	180.6
21	NZ1_AD8	WAND	Nachtabs.	126.2	57.7	100	180
22	**NZ1_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**83.3**	**72.1**	**80**	**179.9**
23	NZ1_ID8	FB	Nachtabs.	128	57.1	99.7	178.8
24	NZ1_AD8	FB	Nachtabs.	128.9	56.8	100	178.7
25	NZ1_ID8_LowE	WAND	Kontin.	130.1	56.4	100	178.2
26	NZ1_ID8	WAND	Kontin.	130.3	56.3	100	178.1
27	NZ1_MIN18_ID8_IW	WAND	Anwesenh.	101.5	65.9	86.5	178
28	NZ1_MIN18_ID8	WAND	Anwesenh.	99.7	66.6	85.6	177.9
29	NZ1_AD8	WAND	Kontin.	131.1	56	100	177.7
30	NZ1_ID8_IW	WAND	Kontin.	131.2	56	100	177.6
31	NZ1_AD6	RAD	Kontin.	131.3	56	100	177.6
32	NZ1_ID8_IW_LowE	WAND	Kontin.	131.3	56	100	177.6
33	NZ1_ID6	RAD	Kontin.	131.4	55.9	100	177.6
34	NZ1_ID8_IW	FB	Nachtabs.	129.4	56.6	98.7	177.2
35	NZ1_ID6_IW	RAD	Kontin.	132.4	55.6	100	177.1
36	NZ1_ID8	RAD	Anwesenh.	83.4	72	77.2	177.1
37	NZ1_ID6	WAND	Nachtabs.	133.9	55.1	100	176.4
38	NZ1_AD8	FB	Kontin.	135.4	54.6	100	175.7
39	NZ1_ID8	FB	Kontin.	135.6	54.5	100	175.6
40	NZ1_ID6_IW	WAND	Nachtabs.	135.1	54.7	99.7	175.6
41	NZ1_ID8_LowE	FB	Nachtabs.	134.2	55	99.2	175.4
42	NZ1_ID8_IW	FB	Kontin.	136.5	54.2	100	175.2
43	NZ1_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	87.3	70.7	76.8	174.9
44	NZ1_AD8	RAD	Anwesenh.	83.4	72	74.4	174.3
45	NZ1_AD6	WAND	Nachtabs.	138.7	53.5	100	174.2
	NZ1_OD	FB	Kontin.	327	-9.7	100	86.6
	NZ1_OD	FB	Nachtabs.	300.2	-0.7	94.2	93.3
	NZ1_OD	FB	Anwesenh.	228.4	23.4	43.1	75.5
	NZ1_OD	WAND	Kontin.	377.9	-26.7	99.8	62.7
	NZ1_OD	WAND	Nachtabs.	342.1	-14.7	89.4	68.9
	NZ1_OD	WAND	Anwesenh.	263.3	11.7	42.3	58.5
Ref	**NZ1_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**298.1**	**0**	**100**	**100**
	NZ1_OD	RAD	Nachtabs.	273.5	8.3	98.3	109.8
	NZ1_OD	RAD	Anwesenh.	205.1	31.2	54.1	97.4

Abb. 5-65: Auswertung der Parameterstudie für NZ1 Küche und 2 Außenwände.

#	NZ2 SCHLAFEN 1AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ2_ID8**	**RAD**	**Anwesenh.**	**66.1**	**56.9**	**99.6**	**199.7**
2	NZ2_ID8_IW	RAD	Anwesenh.	66.4	56.7	99.6	199.3
3	NZ2_AD8	RAD	Anwesenh.	66.7	56.5	99.7	199
4	NZ2_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	68	55.7	99.6	197.5
5	NZ2_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	68.5	55.4	99.6	196.9
6	NZ2_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	69.3	54.9	100	196.4
7	NZ2_ID8	RAD	Nachtabs.	69.4	54.8	100	196.3
8	NZ2_AD8	RAD	Nachtabs.	70.4	54.1	100	195.2
9	NZ2_ID6	RAD	Anwesenh.	70.2	54.2	99.6	194.9
10	NZ2_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	70.8	53.8	100	194.6
11	NZ2_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	70.6	54	99.6	194.4
12	NZ2_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	71.5	53.4	100	193.8
13	NZ2_AD6	RAD	Anwesenh.	71.3	53.5	99.7	193.8
14	NZ2_ID8	WAND	Anwesenh.	71.8	53.2	99	192.6
15	NZ2_ID8_IW	WAND	Anwesenh.	71.9	53.2	98.8	192.3
16	NZ2_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	73.6	52	100	191.4
17	NZ2_ID6	RAD	Nachtabs.	73.7	52	100	191.4
18	NZ2_AD6	RAD	Nachtabs.	74.7	51.3	100	190.2
19	NZ2_ID8_IW_LowE	WAND	Anwesenh.	73.6	52	98.7	190.1
20	NZ2_ID8_IW	RAD	Kontin.	74.9	51.2	100	190
21	NZ2_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	75	51.1	100	189.8
22	NZ2_ID8_LowE	WAND	Anwesenh.	74.2	51.6	98.8	189.6
23	NZ2_ID8	WAND	Nachtabs.	75.3	50.9	100	189.5
24	NZ2_ID8	RAD	Kontin.	75.4	50.8	100	189.4
25	NZ2_AD8	RAD	Kontin.	75.6	50.7	100	189.1
26	NZ2_ID8	FB	Anwesenh.	74.9	51.2	98.4	188.3
27	NZ2_AD8	WAND	Anwesenh.	76.2	50.3	99.8	188.2
28	NZ2_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	76.5	50.1	100	188.1
29	NZ2_AD8	FB	Anwesenh.	75.5	50.8	98.7	188
30	NZ2_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	76.9	49.9	100	187.7
31	NZ2_ID8_IW	FB	Anwesenh.	75.1	51.1	97.9	187.7
32	NZ2_ID8_LowE	RAD	Kontin.	77.2	49.7	100	187.3
33	NZ2_ID4	RAD	Anwesenh.	77	49.8	99.6	187.1
34	NZ2_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	77.6	49.5	100	186.9
35	NZ2_ID6	WAND	Anwesenh.	77	49.8	99	186.5
36	NZ2_ID4_IW	RAD	Anwesenh.	77.6	49.5	99.5	186.4
37	NZ2_ID6_IW	WAND	Anwesenh.	77.2	49.7	98.8	186.1
38	NZ2_AD4	RAD	Anwesenh.	78	49.1	99.6	186
39	NZ2_ID8_IW	FB	Nachtabs.	78.4	48.9	100	185.9
40	NZ2_ID8	FB	Nachtabs.	78.7	48.7	100	185.7
41	NZ2_AD8	WAND	Nachtabs.	78.9	48.6	100	185.4
42	NZ2_AD8	FB	Nachtabs.	79.2	48.4	100	185.1
43	NZ2_ID8_IW_LowE	FB	Anwesenh.	77.7	49.4	97.7	184.5
44	NZ2_ID6_IW	RAD	Kontin.	79.8	48	100	184.4
45	NZ2_ID8_LowE	FB	Anwesenh.	78.4	48.9	98.1	184
	NZ2_OD	FB	Kontin.	166.1	-8.2	100	85.6
	NZ2_OD	FB	Nachtabs.	151.3	1.4	100	102.4
	NZ2_OD	FB	Anwesenh.	145.0	5.5	96.8	106.5
	NZ2_OD	WAND	Kontin.	195.4	-27.3	100	52
	NZ2_OD	WAND	Nachtabs.	179.3	-16.9	99.5	69.8
	NZ2_OD	WAND	Anwesenh.	172.1	-12.2	95.1	73.8
Ref	**NZ2_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**153.4**	**0.0**	**100**	**100**
	NZ2_OD	RAD	Nachtabs.	138.1	10.0	100	117.5
	NZ2_OD	RAD	Anwesenh.	132.5	13.7	99.4	123.4

Abb. 5-66: Auswertung der Parameterstudie für NZ2 Schlafen und 1 Außenwand.

#	NZ2 SCHLAFEN 2AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ2_ID8**	**RAD**	**Anwesenh.**	**97**	**63.4**	**99.6**	**199.6**
2	NZ2_AD8	RAD	Anwesenh.	98	63	99.6	199
3	NZ2_ID8_IW	RAD	Anwesenh.	98.4	62.9	99.5	198.7
4	NZ2_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	101	61.9	99.5	197.2
5	NZ2_ID8	RAD	Nachtabs.	102	61.6	100	197.1
6	NZ2_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	101.5	61.7	99.5	196.9
7	NZ2_AD8	RAD	Nachtabs.	103.1	61.1	100	196.4
8	NZ2_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	103.3	61.1	100	196.3
9	NZ2_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	106	60	100	194.7
10	NZ2_ID6	RAD	Anwesenh.	105.2	60.3	99.5	194.7
11	NZ2_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	106.5	59.9	100	194.4
12	NZ2_AD6	RAD	Anwesenh.	106.2	60	99.6	194.2
13	NZ2_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	106.8	59.8	99.5	193.8
14	NZ2_ID8	WAND	Anwesenh.	105.6	60.2	98.7	193.6
15	NZ2_ID8_LowE	WAND	Anwesenh.	106.6	59.8	98.6	192.9
16	NZ2_ID8_IW	WAND	Anwesenh.	107	59.7	98.6	192.7
17	NZ2_ID8_IW_LowE	WAND	Anwesenh.	107.4	59.5	98.5	192.4
18	NZ2_ID6	RAD	Nachtabs.	110.6	58.3	100	192
19	NZ2_ID8	WAND	Nachtabs.	111	58.2	100	191.7
20	NZ2_AD6	RAD	Nachtabs.	111.5	58	100	191.4
21	NZ2_ID8	RAD	Kontin.	111.6	57.9	100	191.4
22	NZ2_AD8	RAD	Kontin.	111.6	57.9	100	191.4
23	NZ2_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	111.9	57.8	100	191.2
24	NZ2_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	112	57.8	100	191.2
25	NZ2_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	112.3	57.7	100	191
26	NZ2_ID8_IW	RAD	Kontin.	112.3	57.7	100	190.9
27	NZ2_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	112.8	57.5	100	190.7
28	NZ2_AD8	WAND	Anwesenh.	110.8	58.2	98.6	190.5
29	NZ2_ID8	FB	Anwesenh.	110.8	58.2	97.6	189.4
30	NZ2_AD8	FB	Anwesenh.	111.3	58	97.8	189.3
31	NZ2_ID8_LowE	RAD	Kontin.	115.3	56.5	100	189.1
32	NZ2_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	115.6	56.4	100	189
33	NZ2_ID8_IW	FB	Anwesenh.	112.3	57.7	97.6	188.5
34	NZ2_AD8	WAND	Nachtabs.	116.4	56.1	100	188.5
35	NZ2_ID8	FB	Nachtabs.	116.6	56.1	100	188.4
36	NZ2_AD8	FB	Nachtabs.	117.2	55.8	100	188.1
37	NZ2_ID8_IW	FB	Nachtabs.	118.1	55.5	100	187.5
38	NZ2_ID6	WAND	Anwesenh.	115.8	56.3	98.6	187.5
39	NZ2_ID6_IW	WAND	Anwesenh.	117.3	55.8	98.5	186.5
40	NZ2_ID4	RAD	Anwesenh.	118.9	55.2	99.5	186.5
41	NZ2_AD4	RAD	Anwesenh.	119.6	54.9	99.5	186.1
42	NZ2_ID8_LowE	WAND	Kontin.	120.8	54.5	100	185.9
43	NZ2_ID8	WAND	Kontin.	120.9	54.4	100	185.9
44	NZ2_ID8_LowE	FB	Anwesenh.	116.6	56	97.4	185.8
45	NZ2_AD6	RAD	Kontin.	121.1	54.4	100	185.8
	NZ2_OD	FB	Kontin.	291.2	-9.8	100	84.6
	NZ2_OD	FB	Nachtabs.	262.2	1.2	99.4	101.3
	NZ2_OD	FB	Anwesenh.	251.3	5.3	94.9	103.2
	NZ2_OD	WAND	Kontin.	338.1	-27.5	100	56.7
	NZ2_OD	WAND	Nachtabs.	302.4	-14	88.7	66.7
	NZ2_OD	WAND	Anwesenh.	291.6	-9.9	83.6	67.9
Ref	**NZ2_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**265.3**	**0**	**100**	**100**
	NZ2_OD	RAD	Nachtabs.	237.8	10.3	100	116.3
	NZ2_OD	RAD	Anwesenh.	227.7	14.2	99.1	121.4

Abb. 5-67: Auswertung der Parameterstudie für NZ2 Schlafen und 2 Außenwände.

#	NZ3 BAD 1AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ3_ID8**	**RAD**	**Nachtabs.**	**108.9**	**50.9**	**100.0**	**186.0**
2	NZ3_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	109.0	50.8	100.0	185.9
3	NZ3_AD8	RAD	Nachtabs.	110.1	50.4	100.0	185.1
4	NZ3_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	111.4	49.8	100.0	184.1
5	NZ3_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	112.0	49.5	100.0	183.6
6	NZ3_ID8_IW	RAD	Kontin.	113.8	48.7	100.0	182.2
7	NZ3_ID8	RAD	Kontin.	114.5	48.4	100.0	181.7
8	**NZ3_MIN20_ID8**	**RAD**	**Anwesenh.**	**90.3**	**59.3**	**81.4**	**181.5**
9	NZ3_AD8	RAD	Kontin.	114.9	48.2	100.0	181.4
10	NZ3_MIN20_AD8	RAD	Anwesenh.	91.0	58.9	81.5	181.1
11	NZ3_ID6	RAD	Nachtabs.	115.3	48.0	100.0	181.1
12	NZ3_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	115.5	47.9	100.0	180.9
13	NZ3_MIN20_ID8_IW	RAD	Anwesenh.	90.5	59.2	80.7	180.7
14	NZ3_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	116.4	47.5	100.0	180.3
15	NZ3_AD6	RAD	Nachtabs.	116.4	47.5	100.0	180.2
16	NZ3_ID8_LowE	RAD	Kontin.	117.3	47.1	100.0	179.6
17	NZ3_ID8	WAND	Nachtabs.	117.6	47.0	99.9	179.2
18	NZ3_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	117.6	47.0	99.9	179.2
19	NZ3_ID6_IW	RAD	Kontin.	120.7	45.6	100.0	177.0
20	NZ3_AD8	WAND	Nachtabs.	120.9	45.5	99.9	176.7
21	NZ3_ID6	RAD	Kontin.	121.4	45.3	100.0	176.5
22	NZ3_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	121.4	45.3	99.9	176.3
23	NZ3_AD6	RAD	Kontin.	121.7	45.1	100.0	176.2
24	NZ3_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	120.8	45.5	99.3	176.2
25	NZ3_ID8_IW	WAND	Kontin.	122.3	44.9	100.0	175.8
26	NZ3_ID8	FB	Nachtabs.	122.6	44.7	99.9	175.4
27	NZ3_ID8	WAND	Kontin.	123.1	44.5	100.0	175.2
28	NZ3_AD8	FB	Nachtabs.	123.4	44.4	99.9	174.8
29	NZ3_AD8	WAND	Kontin.	123.6	44.3	100.0	174.8
30	NZ3_ID8_IW	FB	Nachtabs.	122.7	44.7	99.1	174.5
31	NZ3_ID8_IW_LowE	WAND	Kontin.	125.7	43.3	100.0	173.2
32	NZ3_ID4	RAD	Nachtabs.	125.9	43.2	100.0	173.0
33	NZ3_ID6	WAND	Nachtabs.	125.8	43.3	99.9	172.9
34	NZ3_ID6_IW	WAND	Nachtabs.	125.9	43.2	99.8	172.8
35	NZ3_ID4_IW	RAD	Nachtabs.	126.1	43.1	100.0	172.8
36	NZ3_ID8_IW	FB	Kontin.	126.3	43.1	100.0	172.7
37	NZ3_ID8_LowE	WAND	Kontin.	126.4	43.0	100.0	172.7
38	NZ3_AD4	RAD	Nachtabs.	126.9	42.8	100.0	172.3
39	NZ3_ID8	FB	Kontin.	127.1	42.7	100.0	172.1
40	NZ3_AD8	FB	Kontin.	127.5	42.5	100.0	171.8
41	NZ3_ID8_LowE	FB	Nachtabs.	127.6	42.4	99.9	171.6
42	NZ3_AD6	WAND	Nachtabs.	129.0	41.8	99.9	170.5
43	NZ3_ID6	FB	Nachtabs.	129.6	41.6	99.9	170.1
44	NZ3_ID8_IW_LowE	FB	Nachtabs.	127.0	42.7	97.8	170.0
45	NZ3_AD6	FB	Nachtabs.	130.3	41.2	99.9	169.5
	NZ3_OD	FB	Kontin.	239.7	-8.1	100	86.3
	NZ3_OD	FB	Nachtabs.	228.8	-3.2	95.3	89.9
	NZ3_OD	FB	Anwesenh.	145.6	34.3	17.9	75.9
	NZ3_OD	WAND	Kontin.	280.3	-26.4	100	55.4
	NZ3_OD	WAND	Nachtabs.	268.9	-21.2	97.7	61.8
	NZ3_OD	WAND	Anwesenh.	170.2	23.2	17.3	56.6
Ref	**NZ3_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**221.8**	**0.0**	**100**	**100**
	NZ3_OD	RAD	Nachtabs.	209.8	5.4	100	109.1
	NZ3_OD	RAD	Anwesenh.	134.3	39.4	26.1	92.8

Abb. 5-68: Auswertung der Parameterstudie für NZ3 Bad und 1 Außenwand.

#	NZ3 BAD 2AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ3_ID8**	**RAD**	**Nachtabs.**	**158**	**58.4**	**100**	**195.8**
2	NZ3_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	159.3	58.1	100	195.2
3	NZ3_AD8	RAD	Nachtabs.	160.6	57.7	100	194.6
4	NZ3_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	163.9	56.9	99.7	192.9
5	NZ3_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	164	56.8	97.8	191
6	NZ3_ID8	RAD	Kontin.	169.5	55.4	100	190.8
7	NZ3_AD8	RAD	Kontin.	170.1	55.2	100	190.5
8	NZ3_ID8_IW	RAD	Kontin.	170.3	55.2	100	190.4
9	NZ3_ID6	RAD	Nachtabs.	170.3	55.2	99.9	190.4
10	NZ3_AD6	RAD	Nachtabs.	172.9	54.5	100	189.3
11	NZ3_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	171.5	54.8	98.5	188.5
12	NZ3_ID8_LowE	RAD	Kontin.	175.1	53.9	100	188.4
13	NZ3_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	175.4	53.8	100	188.2
14	NZ3_ID8	WAND	Nachtabs.	171.3	54.9	97.1	187.1
15	NZ3_AD8	WAND	Nachtabs.	177.8	53.2	99.8	187
16	NZ3_ID6	RAD	Kontin.	182.9	51.8	100	185
17	NZ3_ID8_LowE	WAND	Kontin.	183	51.8	100	185
18	NZ3_ID8	WAND	Kontin.	183.3	51.8	100	184.9
19	NZ3_AD6	RAD	Kontin.	183.3	51.7	100	184.8
20	NZ3_ID6_IW	RAD	Kontin.	183.7	51.6	100	184.7
21	NZ3_ID8_IW	WAND	Kontin.	183.9	51.6	100	184.6
22	NZ3_ID8_IW_LowE	WAND	Kontin.	184.2	51.5	100	184.4
23	NZ3_AD8	WAND	Kontin.	184.4	51.4	100	184.3
24	NZ3_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	172.6	54.6	93.6	183
25	NZ3_AD8	FB	Nachtabs.	182	52.1	97.3	182.7
26	NZ3_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	172.4	54.6	93	182.5
27	NZ3_ID8	FB	Kontin.	190.5	49.9	100	181.7
28	NZ3_AD8	FB	Kontin.	190.9	49.8	100	181.6
29	NZ3_ID8_IW	FB	Kontin.	191.1	49.7	100	181.5
30	**NZ3_MIN20_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**147.6**	**61**	**81.2**	**181.3**
31	NZ3_ID4	RAD	Nachtabs.	190.4	49.9	99.4	181.2
32	NZ3_MIN20_AD8	RAD	Anwesenh.	148.9	60.7	81.3	180.9
33	NZ3_AD4	RAD	Nachtabs.	193	49.2	100	180.6
34	NZ3_MIN20_ID8	RAD	Anwesenh.	147.9	61	80.5	180.4
35	NZ3_AD6	WAND	Nachtabs.	193.1	49.2	99.6	180.3
36	NZ3_ID6	WAND	Nachtabs.	186.5	50.9	95.9	179.4
37	NZ3_ID8	FB	Nachtabs.	180	52.6	92.6	178.9
38	NZ3_ID4_IW	RAD	Nachtabs.	191.6	49.6	97.2	178.5
39	NZ3_ID8_LowE	FB	Kontin.	198.7	47.7	100	178.2
40	NZ3_ID8_IW_LowE	FB	Kontin.	199.1	47.6	100	178
41	NZ3_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	173.1	54.4	88.8	178
42	NZ3_ID6	WAND	Kontin.	199.8	47.4	100	177.7
43	NZ3_ID6_IW	WAND	Kontin.	200.4	47.2	100	177.4
44	NZ3_AD6	WAND	Kontin.	200.6	47.2	100	177.4
45	NZ3_AD6	FB	Nachtabs.	195.5	48.5	96.2	175.7
	NZ3_OD	FB	Kontin.	415.5	-9.4	100	84.6
	NZ3_OD	FB	Nachtabs.	381.3	-0.4	78.2	77.6
	NZ3_OD	FB	Anwesenh.	240.7	36.6	15.9	75.9
	NZ3_OD	WAND	Kontin.	479.2	-26.1	99.2	56.3
	NZ3_OD	WAND	Nachtabs.	429.1	-13	75.7	54.5
	NZ3_OD	WAND	Anwesenh.	279.3	26.5	15.9	59.2
Ref	**NZ3_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**379.9**	**0**	**100**	**100**
	NZ3_OD	RAD	Nachtabs.	348.8	8.2	90.3	103.7
	NZ3_OD	RAD	Anwesenh.	219.4	42.2	22.7	91.9

Abb. 5-69: Auswertung der Parameterstudie für NZ3 Bad und 2 Außenwände.

#	NZ4 WOHNEN 1AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ4_MIN18_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**72.3**	**63.1**	**90.9**	**190.2**
2	**NZ4_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**71.3**	**63.3**	**85.4**	**184.9**
3	NZ4_ID8	RAD	Nachtabs.	91.8	53.2	100	183.6
4	NZ4_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	92.1	53.0	100	183.4
5	NZ4_AD8	RAD	Nachtabs.	92.8	52.7	100	182.8
6	NZ4_ID8	RAD	Anwesenh.	71.3	63.6	82.5	182.6
7	NZ4_MIN18_ID8	RAD	Anwesenh.	74.2	62.1	84.6	182.3
8	NZ4_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	73.8	62.4	83.8	181.9
9	NZ4_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	94.1	52.0	100	181.8
10	NZ4_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	94.6	51.8	100	181.4
11	NZ4_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	76.3	61.1	84	180.1
12	NZ4_ID8_IW	RAD	Kontin.	96.4	50.8	100	179.9
13	NZ4_ID8	RAD	Kontin.	96.8	50.6	100	179.6
14	NZ4_AD8	RAD	Kontin.	97.1	50.4	100	179.3
15	NZ4_ID6	RAD	Nachtabs.	97.8	50.1	100	178.8
16	NZ4_AD8	RAD	Anwesenh.	72.2	63.2	79.4	178.7
17	NZ4_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	98.0	50.0	100	178.6
18	NZ4_MIN18_AD8	RAD	Anwesenh.	75.1	61.7	81.5	178.5
19	NZ4_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	98.6	49.7	100	178.2
20	NZ4_AD6	RAD	Nachtabs.	98.6	49.7	100	178.1
21	NZ4_ID8	WAND	Nachtabs.	99.3	49.4	100	177.6
22	NZ4_ID8_LowE	RAD	Kontin.	99.3	49.4	100	177.6
23	NZ4_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	99.4	49.3	100	177.5
24	NZ4_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	74.0	62.3	79.5	177.4
25	NZ4_ID6	RAD	Anwesenh.	75.4	61.5	79.9	176.7
26	NZ4_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	102.1	47.9	100	175.3
27	NZ4_AD8	WAND	Nachtabs.	102.2	47.9	100	175.3
28	NZ4_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	102.6	47.7	100	174.9
29	NZ4_ID6_IW	RAD	Kontin.	102.7	47.6	100	174.8
30	NZ4_ID6	RAD	Kontin.	103.2	47.4	100	174.5
31	NZ4_AD6	RAD	Kontin.	103.4	47.3	100	174.3
32	NZ4_ID8_IW	WAND	Kontin.	103.6	47.2	100	174.1
33	NZ4_ID8	FB	Nachtabs.	103.6	47.1	100	174.1
34	NZ4_ID8_IW	FB	Nachtabs.	103.9	47.0	100	173.9
35	NZ4_ID8	WAND	Kontin.	104.1	46.9	100	173.7
36	NZ4_AD8	FB	Nachtabs.	104.2	46.8	100	173.6
37	NZ4_AD8	WAND	Kontin.	104.7	46.6	100	173.2
38	NZ4_AD6	RAD	Anwesenh.	76.3	61.1	76.5	172.5
39	NZ4_ID4_IW	RAD	Anwesenh.	83.5	57.4	82	172.3
40	NZ4_ID8_IW_LowE	WAND	Kontin.	106.6	45.6	100	171.8
41	NZ4_ID6	WAND	Nachtabs.	106.8	45.5	100	171.6
42	NZ4_ID6_IW	WAND	Nachtabs.	106.9	45.5	100	171.5
43	NZ4_ID8_IW	FB	Kontin.	107.0	45.4	100	171.4
44	NZ4_ID8_LowE	WAND	Kontin.	107.1	45.4	100	171.3
45	NZ4_ID4	RAD	Nachtabs.	107.5	45.2	100	171
	NZ4_OD	FB	Kontin.	212.1	-8.2	100	87.1
	NZ4_OD	FB	Nachtabs.	201.8	-2.9	100	95.4
	NZ4_OD	FB	Anwesenh.	154.2	21.4	52.4	86
	NZ4_OD	WAND	Kontin.	248.5	-26.8	100	57.9
	NZ4_OD	WAND	Nachtabs.	237	-20.9	100	67.2
	NZ4_OD	WAND	Anwesenh.	178.9	8.8	48.3	62.1
Ref	**NZ4_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**196**	**0**	**100**	**100**
	NZ4_OD	RAD	Nachtabs.	184.7	5.8	100	109.1
	NZ4_OD	RAD	Anwesenh.	139.4	28.9	60.5	106

Abb. 5-70: Auswertung der Parameterstudie für NZ4 Wohnen und 1 Außenwand.

#	NZ4 WOHNEN 2AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ4_MIN18_ID8_IW**	**RAD**	**Anwesenh.**	**110.4**	**67.7**	**91.3**	**187.4**
2	NZ4_MIN18_ID8	RAD	Anwesenh.	108.8	68.1	89.3	186
3	NZ4_ID8_IW	RAD	Anwesenh.	102.6	70	86.1	185.3
4	NZ4_ID8	RAD	Nachtabs.	136.5	60.1	100	185.2
5	NZ4_MIN18_AD8	RAD	Anwesenh.	110.3	67.7	88.7	184.8
6	**NZ4_ID8**	**RAD**	**Anwesenh.**	**100.7**	**70.5**	**84.6**	**184.6**
7	NZ4_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	137.9	59.6	100	184.6
8	NZ4_AD8	RAD	Nachtabs.	138.5	59.5	100	184.3
9	NZ4_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	141.7	58.5	100	183
10	NZ4_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	141.9	58.5	100	182.9
11	NZ4_AD8	RAD	Anwesenh.	101.8	70.2	83.3	182.9
12	NZ4_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	105.7	69.1	84.9	182.9
13	NZ4_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	105.1	69.2	83.4	181.6
14	NZ4_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	110.9	67.5	85.1	180.9
15	NZ4_ID8	RAD	Kontin.	147	57	100	180.8
16	NZ4_AD8	RAD	Kontin.	147.2	56.9	100	180.7
17	NZ4_ID6	RAD	Anwesenh.	109	68.1	84	180.6
18	NZ4_ID6	RAD	Nachtabs.	147.8	56.7	100	180.5
19	NZ4_ID8_IW	RAD	Kontin.	148	56.7	100	180.4
20	NZ4_ID8	WAND	Nachtabs.	148.1	56.7	100	180.4
21	NZ4_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	149.1	56.3	100	179.9
22	NZ4_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	149.3	56.3	99.9	179.8
23	NZ4_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	149.3	56.3	99.9	179.8
24	NZ4_AD6	RAD	Nachtabs.	149.9	56.1	100	179.6
25	NZ4_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	149.8	56.1	99.8	179.4
26	NZ4_ID8_LowE	RAD	Kontin.	151.9	55.5	100	178.8
27	NZ4_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	152.5	55.4	100	178.6
28	NZ4_AD8	WAND	Nachtabs.	153.7	55	100	178
29	NZ4_AD6	RAD	Anwesenh.	110.2	67.8	81.8	177.9
30	NZ4_MIN18_ID8	WAND	Anwesenh.	118.8	65.2	85.3	177.8
31	NZ4_MIN18_ID8_IW	WAND	Anwesenh.	120.4	64.8	85.9	177.7
32	NZ4_ID8	FB	Nachtabs.	155.8	54.4	99.8	176.9
33	NZ4_AD8	FB	Nachtabs.	157.3	54	100	176.6
34	NZ4_ID8_LowE	WAND	Kontin.	158.9	53.5	100	175.9
35	NZ4_ID8	WAND	Kontin.	159	53.5	100	175.8
36	NZ4_ID6	RAD	Kontin.	159.4	53.4	100	175.7
37	NZ4_AD6	RAD	Kontin.	159.5	53.3	100	175.6
38	NZ4_ID8_IW	FB	Nachtabs.	157.5	53.9	99.1	175.6
39	NZ4_ID8_IW	WAND	Kontin.	159.9	53.2	100	175.5
40	NZ4_AD8	WAND	Kontin.	160	53.2	100	175.4
41	NZ4_ID8_IW_LowE	WAND	Kontin.	160.1	53.1	100	175.4
42	NZ4_ID6_IW	RAD	Kontin.	160.4	53.1	100	175.3
43	NZ4_ID6	WAND	Nachtabs.	162	52.6	100	174.6
44	NZ4_ID6_IW	WAND	Nachtabs.	163.2	52.2	99.8	173.9
45	NZ4_ID4_IW	RAD	Anwesenh.	124.6	63.5	83.4	173.5
	NZ4_OD	FB	Kontin.	373.8	-9.4	100	86.7
	NZ4_OD	FB	Nachtabs.	339.5	0.6	96.2	97.1
	NZ4_OD	FB	Anwesenh.	256.2	25	62.9	98.4
	NZ4_OD	WAND	Kontin.	429.9	-25.8	99.9	63.3
	NZ4_OD	WAND	Nachtabs.	380.9	-11.5	93.1	76.8
	NZ4_OD	WAND	Anwesenh.	294.5	13.8	62.4	81.9
Ref	**NZ4_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**341.7**	**0**	**100**	**100**
	NZ4_OD	RAD	Nachtabs.	311.2	8.9	98.9	111.5
	NZ4_OD	RAD	Anwesenh.	231	32.4	70.1	116

Abb. 5-71: Auswertung der Parameterstudie für NZ4 Wohnen und 2 Außenwände.

#	NZ5 BÜRO 1AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ5_ID8**	**RAD**	**Anwesenh.**	**62.6**	**61.8**	**99.4**	**199.5**
2	NZ5_ID8_IW	RAD	Anwesenh.	62.6	61.8	98.8	198.8
3	NZ5_AD8	RAD	Anwesenh.	64.1	60.9	99.6	198.2
4	NZ5_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	63.7	61.1	98.5	197.4
5	NZ5_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	64.9	60.4	99.3	197
6	NZ5_ID8	RAD	Nachtabs.	66.8	59.2	100	195.8
7	NZ5_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	67.1	59.1	100	195.6
8	NZ5_ID6	RAD	Anwesenh.	67	59.1	99.3	195
9	NZ5_AD8	RAD	Nachtabs.	68	58.5	100	194.7
10	NZ5_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	67	59.1	98.6	194.3
11	NZ5_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	68.5	58.2	100	194.2
12	NZ5_AD6	RAD	Anwesenh.	68.6	58.2	99.5	193.7
13	NZ5_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	69.1	57.8	100	193.6
14	NZ5_ID8	WAND	Anwesenh.	67.7	58.7	98.5	193.5
15	NZ5_ID8_IW	WAND	Anwesenh.	67.6	58.7	97.4	192.4
16	NZ5_ID6	RAD	Nachtabs.	71.6	56.3	100	191.1
17	NZ5_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	71.9	56.1	100	190.9
18	NZ5_ID8_IW_LowE	WAND	Anwesenh.	68.7	58.1	96.6	190.5
19	NZ5_ID8_LowE	WAND	Anwesenh.	70.1	57.3	97.8	190.5
20	NZ5_ID8	WAND	Nachtabs.	72.5	55.8	100	190.3
21	NZ5_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	72.6	55.7	100	190.1
22	NZ5_AD6	RAD	Nachtabs.	72.8	55.6	100	190
23	NZ5_AD8	WAND	Anwesenh.	72.4	55.9	99.3	189.7
24	NZ5_ID8	FB	Anwesenh.	71	56.7	97.6	189.3
25	NZ5_AD8	FB	Anwesenh.	72	56.1	98.2	189
26	NZ5_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	74.4	54.7	100	188.4
27	NZ5_ID8_IW	RAD	Kontin.	74.6	54.5	100	188.2
28	NZ5_ID8	RAD	Kontin.	75	54.3	100	187.8
29	NZ5_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	75	54.3	100	187.8
30	NZ5_ID6	WAND	Anwesenh.	73.3	55.3	98.3	187.8
31	NZ5_ID4	RAD	Anwesenh.	74.3	54.7	99.1	187.6
32	NZ5_AD8	RAD	Kontin.	75.2	54.1	100	187.6
33	NZ5_ID8_IW	FB	Anwesenh.	71.4	56.4	95.8	187.1
34	NZ5_ID4_IW	RAD	Anwesenh.	74.2	54.7	98.3	186.9
35	NZ5_ID6_IW	WAND	Anwesenh.	73.2	55.4	97.1	186.7
36	NZ5_ID8	FB	Nachtabs.	76.1	53.6	100	186.7
37	NZ5_ID8_IW_LowE	RAD	Kontin.	76.4	53.4	100	186.5
38	NZ5_AD8	WAND	Nachtabs.	76.4	53.4	100	186.4
39	NZ5_AD4	RAD	Anwesenh.	75.9	53.7	99.4	186.3
40	NZ5_ID8_IW	FB	Nachtabs.	76.7	53.2	100	186.1
41	NZ5_AD8	FB	Nachtabs.	76.9	53.1	100	186
42	NZ5_ID8_LowE	RAD	Kontin.	76.9	53.1	100	185.9
43	NZ5_ID8_LowE	FB	Anwesenh.	74.5	54.6	96.9	185.2
44	NZ5_ID6	WAND	Nachtabs.	78.5	52.1	100	184.4
45	NZ5_ID6_IW	WAND	Nachtabs.	78.6	52	100	184.2
	NZ5_OD	FB	Kontin.	177.6	-8.3	100	86.5
	NZ5_OD	FB	Nachtabs.	158.8	3.1	99.1	104.1
	NZ5_OD	FB	Anwesenh.	145	11.6	89.2	107.9
	NZ5_OD	WAND	Kontin.	208.8	-27.3	100	55.8
	NZ5_OD	WAND	Nachtabs.	187.6	-14.4	97.3	73.9
	NZ5_OD	WAND	Anwesenh.	169.1	-3.2	81.9	76.8
Ref	**NZ5_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**164**	**0**	**100**	**100**
	NZ5_OD	RAD	Nachtabs.	144.6	11.8	100	119.1
	NZ5_OD	RAD	Anwesenh.	133.3	18.7	95.3	125.6

Abb. 5-72: Auswertung der Parameterstudie für NZ5 Büro und 1 Außenwand.

#	NZ5 BÜRO 2AW Insulation	Heating System	Heating Strategy	Energy [kWh/m²a]	Energy Savings [%]	Comfort Ratio [%]	TOTAL (max 200)
1	**NZ5_ID8**	**RAD**	**Anwesenh.**	**92.7**	**68.9**	**99.4**	**199.4**
2	NZ5_ID8_IW	RAD	Anwesenh.	92.9	68.8	98.8	198.6
3	NZ5_AD8	RAD	Anwesenh.	96.7	67.5	99.6	197.6
4	NZ5_ID8_LowE	RAD	Anwesenh.	96.4	67.6	99.3	197.4
5	NZ5_ID8_IW_LowE	RAD	Anwesenh.	95.1	68.1	98.5	197.3
6	NZ5_ID6	RAD	Anwesenh.	100.7	66.2	99.3	195.4
7	NZ5_ID8	RAD	Nachtabs.	102.7	65.5	100	195.1
8	NZ5_ID8	WAND	Anwesenh.	100.5	66.2	98.5	194.7
9	NZ5_ID6_IW	RAD	Anwesenh.	100.9	66.1	98.6	194.6
10	NZ5_ID8_IW	RAD	Nachtabs.	104.1	65	100	194.4
11	NZ5_AD8	RAD	Nachtabs.	105.3	64.6	100	193.8
12	NZ5_ID8_LowE	WAND	Anwesenh.	101.2	66	97.8	193.7
13	NZ5_AD6	RAD	Anwesenh.	105	64.8	99.5	193.5
14	NZ5_ID8_IW	WAND	Anwesenh.	100.7	66.2	97.4	193.4
15	NZ5_ID8_LowE	RAD	Nachtabs.	106.8	64.1	100	193.1
16	NZ5_ID8_IW_LowE	RAD	Nachtabs.	107.1	64	100	192.9
17	NZ5_ID8_IW_LowE	WAND	Anwesenh.	100.2	66.4	96.6	192.9
18	NZ5_ID8	WAND	Nachtabs.	111.6	62.5	100	190.7
19	NZ5_AD8	WAND	Anwesenh.	110.5	62.9	99.3	190.6
20	NZ5_ID6	RAD	Nachtabs.	111.9	62.4	100	190.6
21	NZ5_ID8	FB	Anwesenh.	106.9	64.1	97.6	190.6
22	NZ5_ID8_LowE	WAND	Nachtabs.	112.8	62.1	100	190.2
23	NZ5_ID8_IW	WAND	Nachtabs.	113	62	100	190.1
24	NZ5_ID8_IW_LowE	WAND	Nachtabs.	113.4	61.9	100	189.9
25	NZ5_ID6_IW	RAD	Nachtabs.	113.4	61.9	100	189.9
26	NZ5_AD8	FB	Anwesenh.	110.1	63	98.2	189.7
27	NZ5_ID6	WAND	Anwesenh.	110.3	63	98.3	189.7
28	NZ5_AD6	RAD	Nachtabs.	114.5	61.5	100	189.3
29	NZ5_ID4	RAD	Anwesenh.	113.8	61.8	99.1	188.8
30	NZ5_ID6_IW	WAND	Anwesenh.	110.4	62.9	97.1	188.4
31	NZ5_ID8_IW	FB	Anwesenh.	107.8	63.8	95.8	188.4
32	NZ5_ID4_IW	RAD	Anwesenh.	114.1	61.7	98.3	187.8
33	NZ5_ID8	FB	Nachtabs.	118.5	60.2	100	187.4
34	NZ5_ID8_LowE	FB	Anwesenh.	112.3	62.3	96.9	187.3
35	NZ5_AD8	WAND	Nachtabs.	119.3	59.9	100	187
36	NZ5_AD4	RAD	Anwesenh.	118.4	60.2	99.4	186.8
37	NZ5_ID8	RAD	Kontin.	120	59.7	100	186.7
38	NZ5_AD8	RAD	Kontin.	120	59.7	100	186.7
39	NZ5_AD8	FB	Nachtabs.	120.4	59.6	100	186.5
40	NZ5_ID8_IW	FB	Nachtabs.	120.7	59.5	100	186.3
41	NZ5_ID8_IW	RAD	Kontin.	121.2	59.3	100	186.1
42	NZ5_ID6	FB	Anwesenh.	115.9	61.1	97.2	185.9
43	NZ5_ID8_IW_LowE	FB	Anwesenh.	111.6	62.5	95	185.7
44	NZ5_AD6	WAND	Anwesenh.	120.8	59.4	99.1	185.4
45	NZ5_ID6	WAND	Nachtabs.	122.9	58.7	100	185.3
	NZ5_OD	FB	Kontin.	326.7	-9.7	100	85.9
	NZ5_OD	FB	Nachtabs.	276.8	7.1	99.1	109.3
	NZ5_OD	FB	Anwesenh.	235.7	20.9	89.2	119.5
	NZ5_OD	WAND	Kontin.	377.2	-26.6	100	61.3
	NZ5_OD	WAND	Nachtabs.	315.6	-6	97.3	88.6
	NZ5_OD	WAND	Anwesenh.	269.2	9.6	81.9	95.8
Ref	**NZ5_OD**	**RAD**	**Kontin.**	**297.8**	**0**	**100**	**100**
	NZ5_OD	RAD	Nachtabs.	251.8	15.4	100	122.4
	NZ5_OD	RAD	Anwesenh.	216.5	27.3	95.3	134.9

Abb. 5-73: Auswertung der Parameterstudie für NZ5 Büro und 2 Außenwände.

A.5.6 Auswertung der Parameterstudie: Kombinierte Betrachtung von thermischer Behaglichkeit und Energiesparpotential - grafische Darstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterstudie in parallelen Koordiantenplots visualisiert. Diese bieten eine gute Möglichkeit, hochdimensionale Strukturen übersichtlich darzustellen. Dabei entspricht jeder Parameter einer Koordinatenachse, die jeweils parallel senkrecht zueinander verlaufen. Jede Linie von links nach rechts entspricht somit einer der betrachteten Parameterkombinationen inklusive aller ihrer Eingabe- und Ausgabewerte. Folgende Eingabeparameter sind hierbei auf der linken Seite der Grafik zu sehen:

- **Ins.Type:** Art der Dämmung, also ohne („OD“ – rot), außengedämmt („AD“ – blau), innengedämmt („ID“ – gelb), innengedämmt mit zusätzlicher Innendämmung der Innenwände („ID+IW“, grün)
- **Ins.Thickness:** Dicke der Dämmung, also 0 cm, 2 cm, 4 cm, 6 cm oder 8 cm
- **Low-E:** Low-E-Beschichtung vorhanden („Ja“) oder nicht vorhanden („Nein“)
- **Heat.System:** Art des Heizsystems, also Radiator (RAD), Wandheizung (WAND) oder Fußbodenheizung (FB)
- **Heat.Mode:** Betriebsmodus, also kontinuierlich beheizt („Kontin.“), Nachtabsenkung („Nachtabs.“) oder Beheizung nur bei Anwesenheit („Anwesenh.“)

Nun sind zusätzlich auf der rechten Seite der Grafik folgende Ausgabeparameter dargestellt:

- **Heat.Energy:** Benötigte Heizenergiemenge in kWh/(m²a)
- **Savings.Energy**: Energieeinsparung gegenüber dem Referenzfall [%]
- **Comfort.Ratio:** Anteil der Anwesenheitsminuten außerhalb des Komfortbereichs [%]
- **Total:** Gesamtbewertung von Energiesparpotential und thermischen Komfort (maximal 200)

Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, sind pro Plot jeweils alle Parameterkombinationen eines Nutzungsszenarios mit derselben Anzahl an Außenwänden dargestellt.

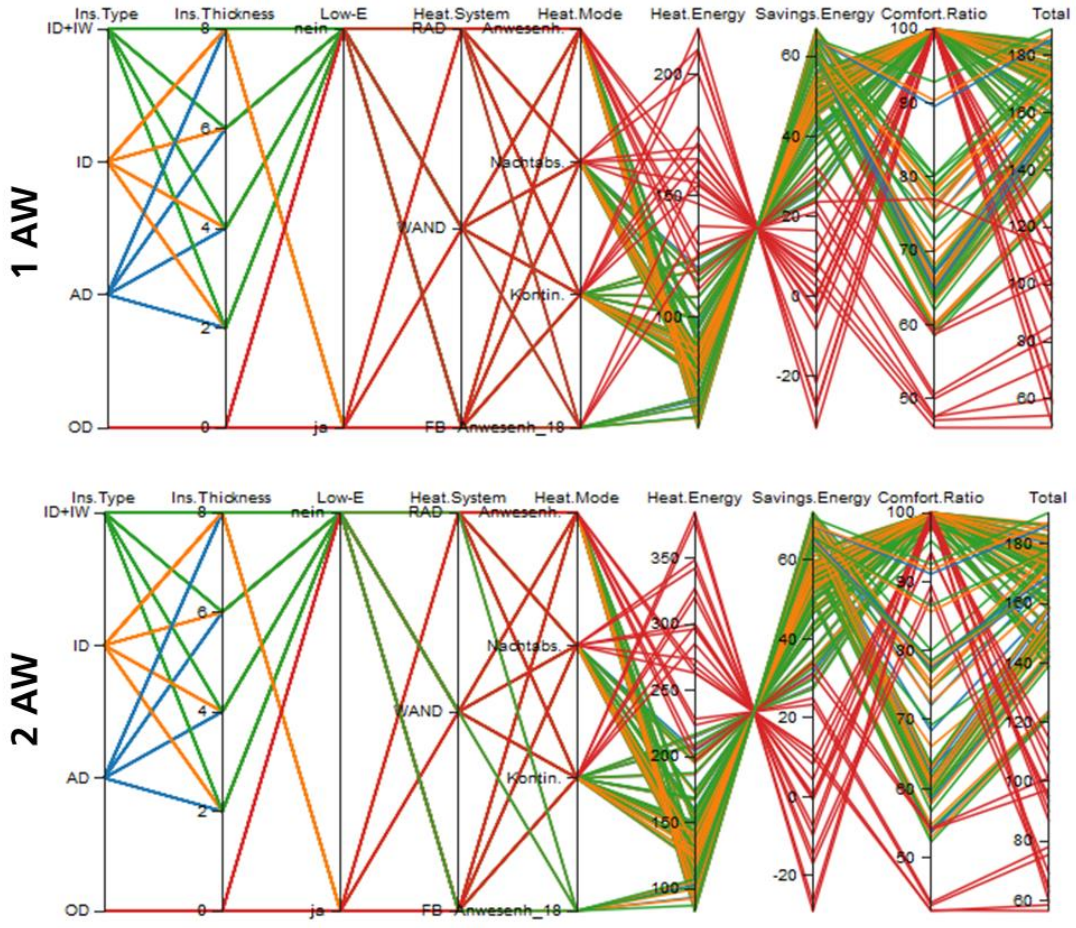


Abb. 5-74: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ1 Küche in parallelen Koordinatenplots.

NZ2: Schlafen

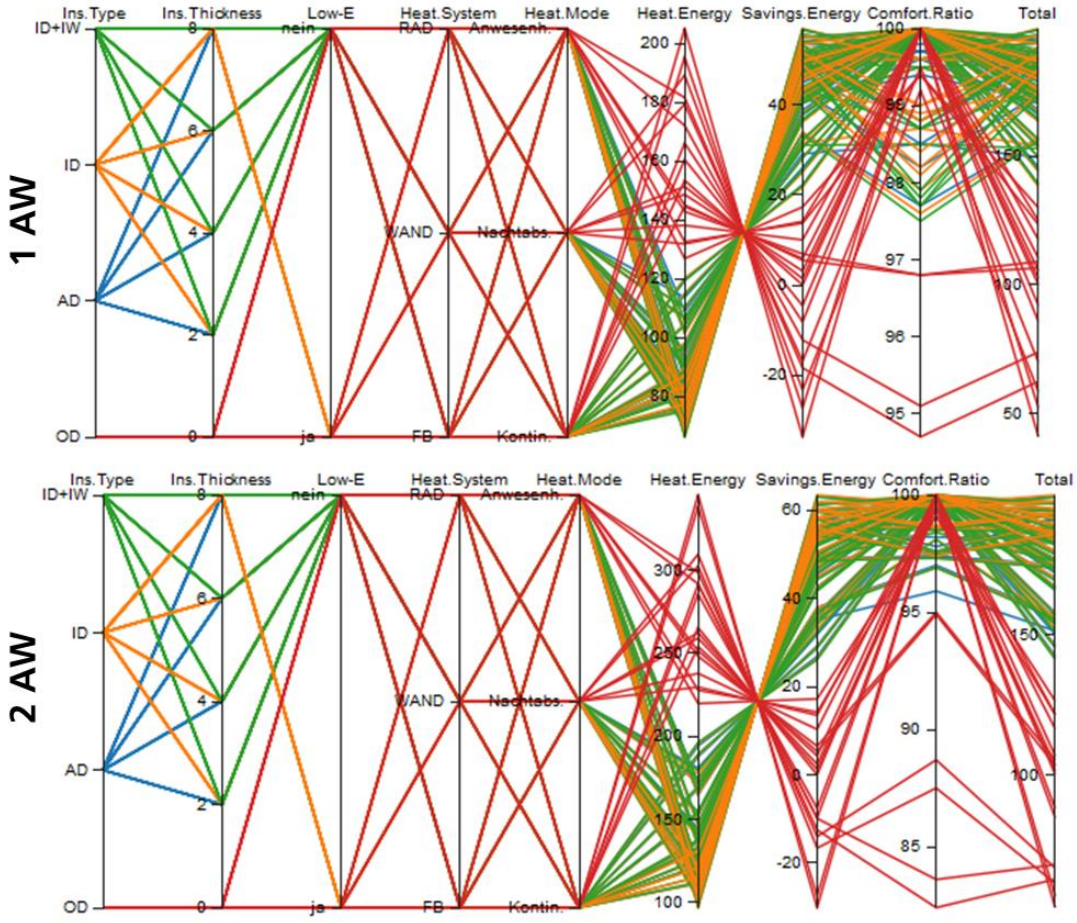


Abb. 5-75: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ2 Schlafen in parallelen Koordinatenplots.

NZ3: Bad

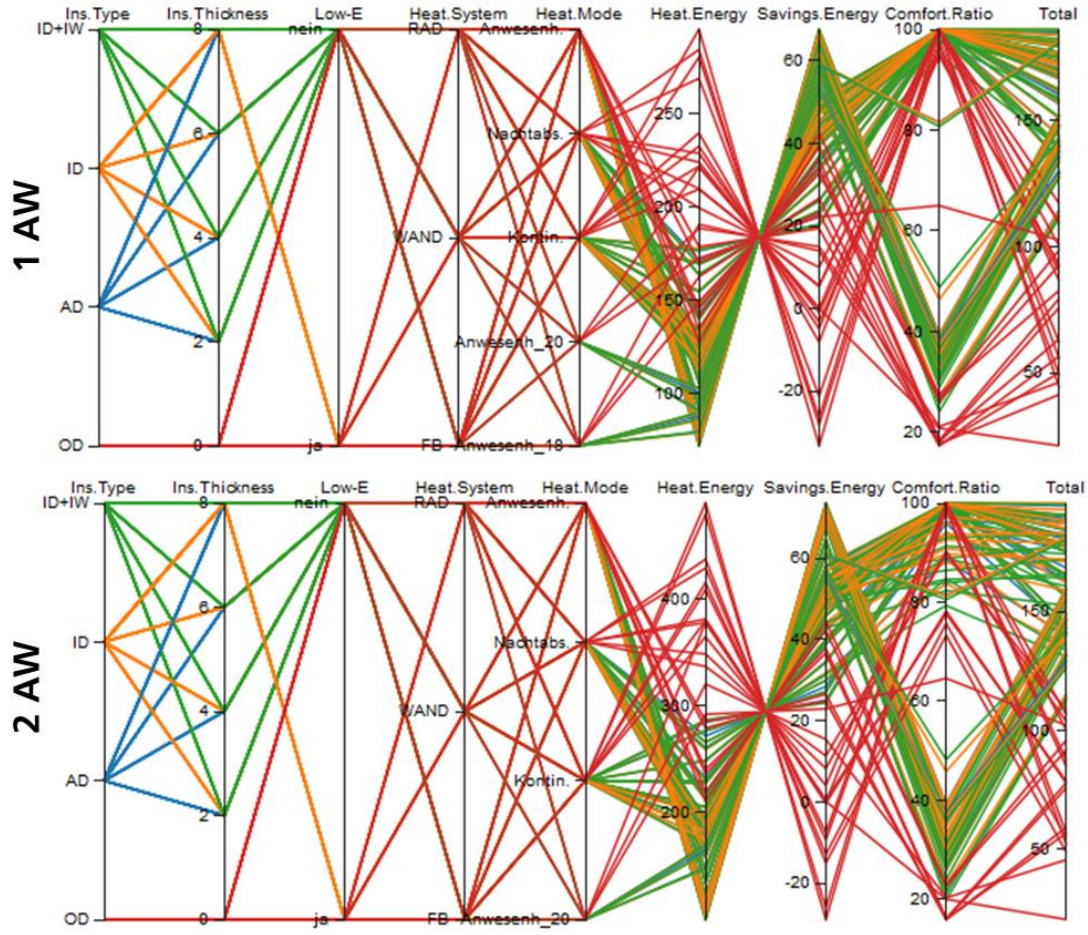


Abb. 5-76: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ3 Bad in parallelen Koordinatenplots.

.

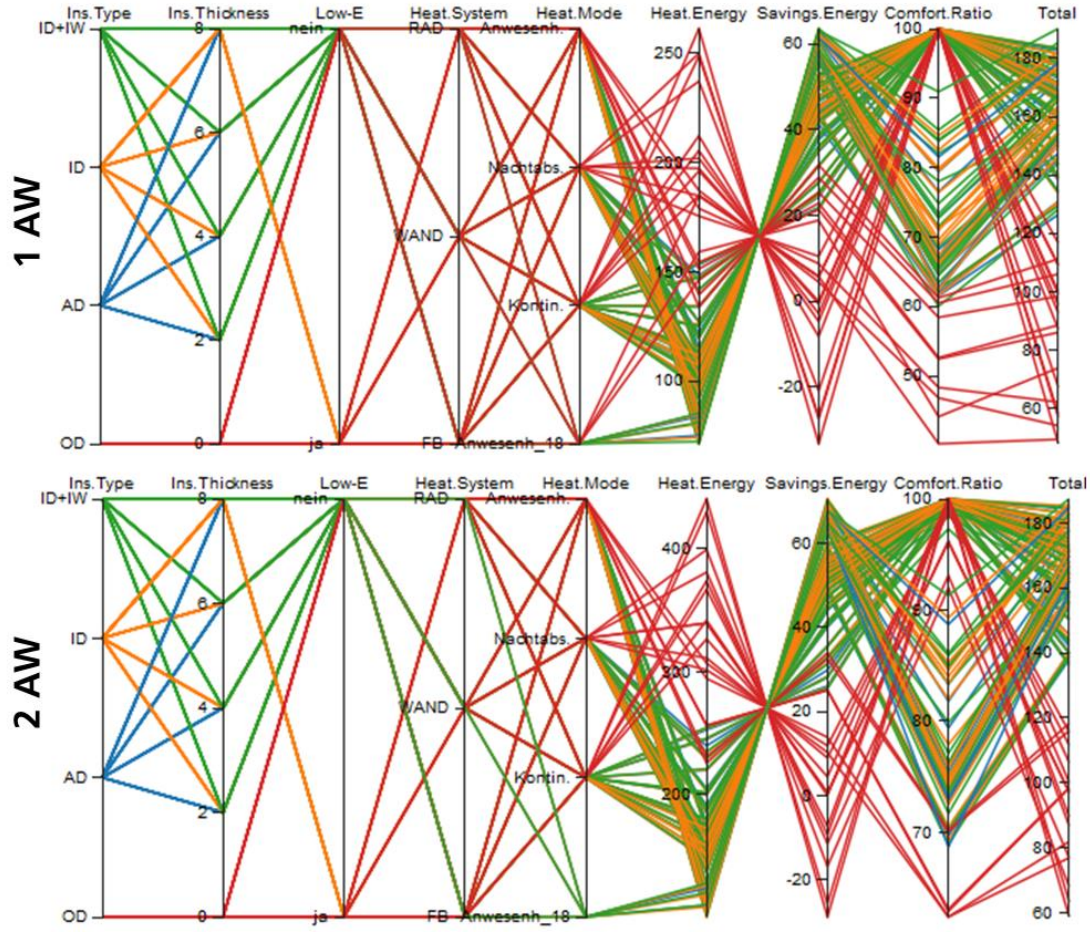


Abb. 5-77: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ4 Wohnen in parallelen Koordinatenplots.

NZ5: Arbeiten

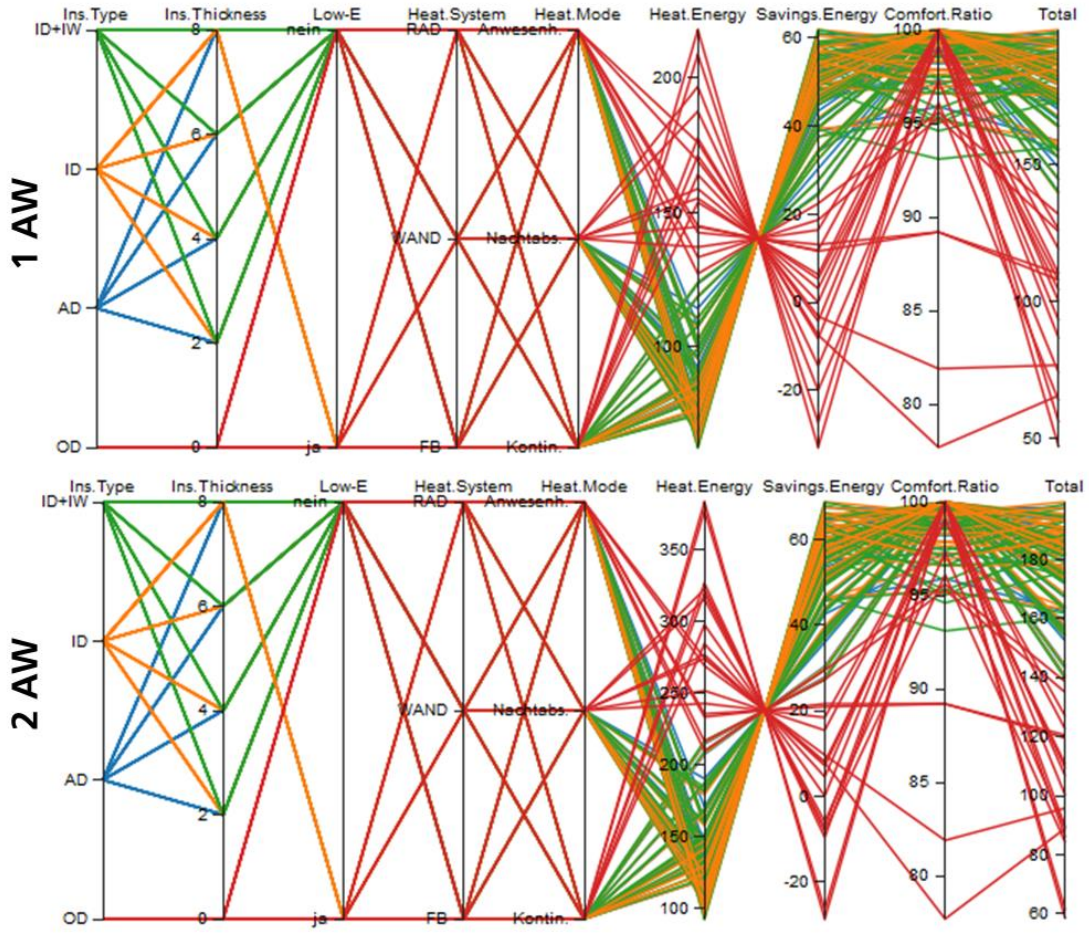


Abb. 5-78: Grafische Darstellung der Parameterstudie für NZ5 Arbeiten in parallelen Koordinatenplots.

6 Dissemination

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse wurden über verschiedenste Kanäle und Medien durch das FIW München und das IBP Holzkirchen an die relevanten Fachkreise in geeigneter Form weitergegeben. Im Folgenden werden die wichtigsten kurz zusammengestellt.

6.1 In Lehre und Forschung

Ausbildung an Hochschulen
Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben, insbesondere die Thematik Wärmeschutz, Wärmebrücken und hygrothermische Bauteilsimulation von Innendämmungen wurden und werden u.a. in folgenden Vorlesungen an die Studenten weitergegeben:

- Studiengang Bauingenieurwesen, Hochschule München, Bauphysik, Prof. Dr. A. Holm.
- Studiengang Master Online Bauphysik, Universität Stuttgart: Klimagerechtes Bauen, Prof. Dr. H. M. Künzel.
- Studiengang Energieeffizientes Design, Hochschule Augsburg: Feuchteschutz und Simulation, LB Hr. Schöner.
- Studiengang Smart Buildings, Fachhochschule Salzburg: Smart Constructions, LB Hr. Schöner.
- Studiengang Bauingenieurwesen, Hochschule München: Feuchteschutz, LB Dr. Zirkelbach.

BINE Projektinfo
Nach Abschluss des Projektes soll eine Projektbeschreibung sowie die wesentlichen Inhalte und Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben über eine BINE Projektinfo der breiten wissenschaftlichen und baupraktischen Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden.

6.2 Für Hersteller, Fachplaner und Anwender

FVID Fachtextserie Nachgedacht
Der Fachverband Innendämmung (FVID) veröffentlicht seit kurzem die Fachtextserie „Nachgedacht“ auf seiner Website. Dort werden aktuelle und interessante Themen und Fragestellungen aufgegriffen und allen interessierten Fachleuten für ihre tägliche Arbeit zur Verfügung gestellt. Eine Veröffentlichung ausgewählter Ergebnisse aus diesem Projekt soll in Zusammenarbeit mit dem FVID im Rahmen der Fachtextserie „Nachgedacht“ erfolgen.

Vorstellung am FIW Forschungstag 2015, 2016, 2019
Das Projekt und ausgewählte Ergebnisse wurden bereits mehrfach am jährlich stattfindenden FIW Forschungstag in München präsentiert. Dies wird auch im Jahr 2019 wieder der Fall sein.

- Forschungstag 2015 – Projektvorstellung und Zielsetzungen (Christoph Sprengard)
- Forschungstag 2016 – Innendämmung: Stand der Messungen und Berechnungen an Materialien, Systemen und großformatigen Bauteilen (Holger Simon)
- Forschungstag 2019 – Instationärer Betrieb und Innendämmung: Wie groß sind die Einsparpotentiale wirklich? (Carolin Kokolsky)

Projektworkshops mit beteiligten Dämmstoffherstellern
Das Projekt wurde in Zusammenarbeit und mit Unterstützung von insgesamt neun Dämmstoffherstellern sowie zwei Dämmstoffverbänden durchgeführt. Während der gesamten Projektlaufzeit fanden in regelmäßigen Abständen Workshops mit den beteiligten Herstellern statt. Dabei wurden die aktuellen Ergebnisse aus dem Projekt präsentiert und das weitere Vorgehen besprochen. Die neuesten Erkenntnisse konnten so auf direktem Wege den Herstellern übermittelt werden.

Hersteller Berichte
Allen beteiligten Dämmstoffherstellern und Verbänden wurden im Frühjahr 2018 die gesammelten Ergebnisse, welche im Laufe des Forschungsvorhaben für das jeweilige Dämmmaterial ermittelt wurden, in drei separaten Berichten zur Verfügung gestellt:

- Teilbericht 1: Materialspezifische Untersuchungen
- Teilbericht 2: Hygrothermische Parameterstudie im Regelquerschnitt
- Teilbericht 3: Wärmebrückenkatalog für die Bestandssanierung mit Innendämmung

Mit Hilfe dieser Dokumente und Inhalte wurde den Herstellern eine Grundlage für weitere Veröffentlichungen zur Information Ihrer Kunden zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise werden die Forschungsergebnisse auf direktem Wege den Planern und Anwendern gezielt zur Verfügung gestellt.

Normungs- und Gremienarbeit
Prof. Dr. Künzel brachte als Obmann die im Projekt entstandenen Ergebnisse zur Bewertung von hygrothermischen Parametersimulationen in den 2018 veröffentlichten Anhang D der überarbeiteten Feuchteschutznorm DIN 4108-3 ein.

Dr. Zirkelbach und Hr. Schöner bringen die im Projekt erworbenen Erkenntnisse zur hygrothermischen Parametersimulation im Rahmen ihrer Arbeit in der Arbeitsgruppe Innendämmung der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft zur Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) ein.

Weitere Veröffentlichungen
Darüber hinaus wurden Teilergebnisse im Rahmen der IBP Mitteilungen 548 (Haindl et al. 2016) und 561 (Schöner et al. 2019) veröffentlicht. Speziell die Erkenntnisse zur In-Situ Messung der Wasseraufnahmefähigkeit von mineralischen Fassadenoberflächen wurden darüber hinaus in (Haindl et al.) der Fachwelt vorgestellt.

6.3 Literaturverzeichnis

Haindl, K.; Schöner, Tobias; Zirkelbach, Daniel; Fitz, Cornelia: Was ist bei Karsten & Co. zu beachten? Beurteilung des Regenschutzes einer Fassade: Bautenschutz + Bausanierung (B + B).

Haindl, K.; Schöner, Tobias; Zirkelbach, Daniel; Fitz, Cornelia (2016): In-Situ-Messverfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit. vergleichende Untersuchungen. In: IBP Mitteilung.

Schöner, Tobias; Hevesi-Toth, T.; Zirkelbach, Daniel; Fitz, Cornelia (2019): In-Situ-Messgerät zur Bestimmung der Schlagregenintensität. In: IBP Mitteilung.

7 Zusammenfassung

Ein wesentliches Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts war es, den Unsicherheiten entgegenzuwirken, die sich aus der Anwendung von Innendämmungen bei der Sanierung immer noch häufig ergeben und einem breiteren Einsatz der Systeme entgegenstehen. Eine wirtschaftliche thermische Sanierung großer Teile des deutschen Gebäudebestands ist nur mit Innendämmungen machbar und sowohl aus ökologischer Sicht als auch im Hinblick auf den Komfort der Nutzer wünschenswert und dringend geboten.

Die Ergebnisse aus diesem Projekt liefern wesentliche Grundlagen und Entscheidungshilfen bei den Fragen, ob eine Innendämmung möglich ist, welche Materialien in welchen Fällen eingesetzt werden können, wie die Auslegung der Systeme vorzunehmen und welche zusätzlichen Maßnahmen zu ergreifen sind sowie zur geeigneten Ausführung von Anschlussdetails und Wärmebrücken.

Zunächst wurden die für den von innen zu dämmenden Gebäudebestand in Deutschland typischen Bauweisen analysiert und die gängigsten bzw. relevantesten Wandbildner identifiziert und mit ihren Eigenschaften und Verbreitungsgebieten beschrieben. Diese decken einen Großteil der in der Praxis zu erwartenden Bestandssituationen ab und erlauben somit standardisierte Aussagen, die von Praktikern direkt für spezifische Objekte herangezogen werden können.

Weiterhin wurde eine Marktübersicht und Klassifizierung der üblichen Dämmmaterialien erstellt und die Innendämmsysteme der beteiligten Industriepartner hinsichtlich ihrer thermischen, hygrischen und ökologischen Aspekte untersucht. Der Schwerpunkt lag hier infolge der beteiligten Partner auf kapillaraktiven Materialien, Hochleistungsdämmstoffen (z.B. Materialien mit Aerogel-Bestandteilen) und Innendämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz oder Hanf. Es kamen aber auch klassische Systeme wie Polystyrol-Verbunddämmplatten zum Einsatz.

Ergänzend zu den Labor-Untersuchungen der Materialien wurden auch Freilandversuche durchgeführt, bei denen die Dämmsysteme unter realen Klimabelastungen exponiert waren und die eine Validierung des ansonsten rechnerisch untersuchten hygrothermischen Verhaltens ermöglichten. Die Nachberechnung dieser Versuche zeigte nach Austrocknen der Einbau- und Niederschlagsfeuchte eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Infolgedessen konnten die umfassenden Parameterstudien im weiteren Verlauf des Projekts mit hygrothermischen Simulationen mit Hilfe des am IBP entwickelten Modells WUFI® durchgeführt und die Ergebnisse als realitätsnah und belastbar angesehen werden.

7.1 Charakterisierung von Innendämmstoffen

Innendämmstoffe und -systeme wurden zunächst hinsichtlich ihrer Materialeigenschaften und anschließend anhand ihrer thermischen, hygrischen und ökologischen Eigenschaften untersucht.

7.1.1 Marktrecherche, Einteilung und Auswahl

Bei der durchgeführten Marktrecherche zu verfügbaren Innendämmmaterialien wurden 213 Produkte von über 200 Herstellern berücksichtigt und kategorisiert. Eine Gruppierung nach Art der Herstellung sowie anhand der Wärmeleitfähigkeit und des Diffusionswiderstands ergab jeweils eine große Spanne von möglichen Innendämmmaterialien und -systemen. Bei der Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Innendämmung sollten jedoch nicht nur die Materialeigenschaften des Dämmstoffs berücksichtigt, sondern die Maßnahme im Kontext des Gesamtsystems Bestandswand und Innendämmung betrachtet werden. Hierbei gelten speziell für Innendämmungen einige besondere Randbedingungen, die es unter Umständen auch „Nischenprodukten“ ermöglichen, in dieser Anwendung in die Breitenanwendung vorzustoßen. Dazu zählen beispielweise der unweigerliche Verlust von Wohn- bzw. Nutzfläche bei Innendämmmaßnahmen, der durch den Einsatz schlanker Hochleistungsdämmstoffe minimiert werden kann, oder auch die positiven Eigenschaften, die diffusionsoffene und kapillaraktive Dämmmaterialien im Bereich der Innendämmung gegenüber herkömmlichen Dämmmaterialien mit sich bringen können.

7.1.2 Thermische Eigenschaften

Außerdem wurden drei als stärker Kondensat tolerierend eingestufte Innendämmsysteme, darunter eine mineralische Dämmplatte und zwei Holzfaserdämmplatten, hinsichtlich ihres thermischen Verhaltens untersucht. Zentrale Fragestellung dabei war, welchen Einfluss erhöhte Feuchtegehalte im Bereich der Grenzschicht zwischen Bestandwand und Dämmstoff auf die energetischen Kennwerte (Wärmeleitfähigkeit, R-Wert) haben können. Da üblicherweise sowohl die Wärmeleitfähigkeit als auch der R-Wert bei einem Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23 °C und 80 % relativer Feuchte (23/80) angegeben werden, wurde zusätzlich untersucht, ob dieser statisch ermittelte Referenzwert ausreichend ist, um den Einfluss erhöhter Feuchteverhältnisse in Innendämmungen darzustellen.

Anhand hygrothermischer Simulation wurden für die drei Materialien unter anderem der Standort, die inneren Feuchtelasten, die Dicke der Dämmstoffschicht sowie der Feuchtezuschlag auf die Wärmeleitfähigkeit variiert. Anschließend wurde für jeden Zentimeter Dämmstoff anhand seines Wassergehalts zunächst die vorherrschende Wärmeleitfähigkeit sowie der sich daraus ergebende R-Wert der gesamten Dämmstoffschicht ermittelt. Obwohl im ersten, kritischen Zentimeter des Dämmstoffs zur Kaltseite hin im Winter z.T. deutlich erhöhte Feuchtegehalte und dadurch Wärmeleitfähigkeiten vorliegen, fällt dieser Effekt über die gesamte Dicke der Dämmstoffschicht nur noch wenig ins Gewicht. Auch findet in allen betrachteten Fällen im Sommer eine Rücktrocknung in der kritischen Materialschicht statt, sodass nicht mit einer zunehmenden Auffeuchtung über die Jahre zu rechnen ist.

In der Regel reicht der statisch ermittelte R-Wert bei 23/80 gut aus, um den durch dynamische Simulation bestimmten R-Wert ausreichend kritisch abzubilden. Nur in extremen Fällen (hohe Feuchtezuschlagsfaktoren in Kombination mit hohen inneren Feuchtelasten und Extremstandort) ist der statisch ermittelte R-Wert (knapp) nicht ausreichend, um den Feuchteeinfluss auf die energetischen Eigenschaften des Dämmstoffs darzustellen. Doch auch

bei diesen Fällen ist der dynamisch ermittelte R-Wert höchstens im Bereich von 5 % geringer, als der statische R-Wert. Insgesamt kann also festgestellt werden, dass die Bestimmung des statischen R-Werts bzw. der Wärmeleitfähigkeit bei 23/80 einen guten Referenzwert darstellt, um den Einfluss der Feuchte auf die wärmedämmenden Eigenschaften eines Innendämmstoffs darzustellen. Nur in sehr kritischen Fällen wird der Einfluss leicht unterschätzt.

7.1.3 Hygrische Eigenschaften

Bei Innendämmungen sind neben den thermischen Kennwerten auch die hygrischen Kennwerte von großer Bedeutung und zusätzlich notwendig, um verlässliche Material-Datensätze für hygrothermische Simulationen zu erhalten.

Die normalen hygrischen Kennwerte wurden für 12 unterschiedliche Materialien ermittelt. Unter anderem wurden die Rohdichte, die Reindichte, der Wasserdampfdiffusionswiderstand, der Wasseraufnahmekoeffizient und die Feuchtespeicherfunktion bestimmt. An 7 Materialien wurde der KAPI-Test zur Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten durchgeführt und die zugehörigen Feuchteverläufe und Feuchteprofile dargestellt.

Weiterhin wurden Kriterien zur Klassifizierung der kapillaren Rückleitungseigenschaften eingeführt. Dazu wird mit den Transportkoeffizienten für eine Standardprobendicke von 5 cm die Feuchtezunahme bei dem KAPI-Test entsprechenden Randbedingungen rechnerisch über einen Zeitraum von 3 Jahren betrachtet (bei der Kork-Lehm-Platte wurde der Berechnungszeitraum aufgrund des hohen Diffusionswiderstands auf 6 Jahre erweitert). Die auf die Diffusionswiderstandszahl und das Niveau der freien Sättigung bezogene Dauer bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustands (zwischen Feuchteeintrag und kapillarer Rückleitung) beschreibt die Stärke des kapillaren Rücktransports. Wird die freie Wassersättigung überschritten, ist keine nennenswerte kapillare Rückleitung gegeben. Vier Materialien konnten nach diesen Kriterien als deutlich kapillar aktiv eingestuft werden: die Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren), die Mineraldämmplatte, der Hochleistungsdämmputz und der Aerogel-Hochleistungsdämmputz. Zwei weitere Materialien weisen demzufolge eine mittlere Kapillaraktivität auf und eines der getesteten Materialien ist kaum kapillaraktiv.

7.1.4 Ökologische Analyse

Da neben den weiter steigenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden auch Zielsetzungen an die ökologische Bauweise existieren und vermehrt nachhaltige Bau- und Dämmstoffe eingesetzt werden sollen, wurde für die gewählten Innendämmstoffe eine ökologische Analyse durchgeführt. Hierbei wurden die Emissionen in der Herstellungsphase sowohl für verschiedene Innendämmstoffe als auch -systeme berücksichtigt. Eine vollständige Bewertung des gesamte Lebenszyklus inklusive der Emissionen aus der Errichtung, Nutzung und Entsorgung ist aufgrund der unvollständigen Datenlage derzeit nicht möglich. Die ökologische Qualität der Materialien und Systeme wurde anhand der Parameter Primärenergie nicht erneuerbar (PENRT) sowie Treibhausgaspotential (GWP) bewertet.

Die untersuchten Innendämmmaterialien wurden in 15 verschiedene Produktgruppen unterteilt, mit denen die meisten konventionellen Dämmstoffe abgedeckt werden. Da die Rohdichte innerhalb der Produktgruppen zum Teil große Spannen aufweist, spiegelt sich dies auch in den Kennwerten PENRT und GWP wieder, die innerhalb einer Produktgruppe ebenfalls große Streuungen aufweisen können. Vergleicht man aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte mit mineralischen oder synthetischen Innendämmmaterialien, so fällt auf, dass sich diese vor allem im Bereich des GWP deutlich unterscheiden: Da Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen während ihrer Wachstumsphase CO_2 binden, erhalten sie in der in der Herstellungsphase eine Gutschrift, was zum größten Teil zu negativen Werten für das Treibhausgaspotential führt.

In einer weiterführenden Untersuchung wurden anschließend nicht mehr nur die einzelnen Dämmstoffe, sondern vielmehr das gesamte Innendämmsystem weiter betrachtet. Zu den untersuchten Innendämmsystemen gehören Systeme mit Vorsatzschalen, Systeme mit Platten sowie plastische Innendämmsysteme. Dabei wurden nicht nur bereits erprobte Systeme, sondern auch Systeme mit neuen und innovativen Materialien betrachtet. Es stellte sich hierbei heraus, dass die Wahl der Funktionseinheit von entscheidender Bedeutung ist, um ein valides Ergebnis der ökologischen Analyse zu erhalten. Beispielsweise werden unterschiedliche Ergebnisse erzielt je nachdem, ob eine Konstruktion nach ihrer Dicke oder nach ihrer Dämmleistung beurteilt wird. Zusätzlich fiel auf, dass bei bestimmten Konstruktionstypen die übrigen Konstruktionsmaterialien gegenüber dem Dämmstoff einen sehr hohen Anteil zu den Gesamtemissionen beitrugen. Aus ökologischen Gesichtspunkten sind bei der Wahl eines Innendämmsystems folglich nicht nur das Dämmmaterial an sich, sondern auch die für die übrige Konstruktion benötigen Materialien von großer Bedeutung.

7.2 Energetische und feuchtetechnische Bemessung

7.2.1 Feuchteverhalten der untersuchten Innendämmung

Die im Rahmen der Parameterstudie zum Feuchteverhalten der Innendämmungen durchgeführten hygrothermischen Simulationen mit etwa 21.000 Varianten zeigen, dass die aktuellen Innendämmsysteme den Feuchteeintrag aus dem Raum gut im Griff haben. Grenzen werden vor allem dann erreicht, wenn sehr diffusionsoffene Systeme bei Raumklima-bedingungen mit hoher Feuchtelast eingesetzt werden, wofür sie in der Regel nicht vorgesehen sind. Dazu kommt, dass für Naturfaserdämmungen mangels genauerer Untersuchungen bisher noch auf den eher konservativen Grenzwert von 18 M.-% Feuchtegehalt aus der DIN 68800-2 zurückgegriffen werden muss, der ohne innenseitige Dampfbremse im Außenbereich der Dämmung bei hohen Feuchtelasten im Raum erwartungsgemäß oft überschritten wird.

Etwas anders sieht es mit der Feuchtelast von außen oder in einigen Fällen auch bei Klimabedingungen mit sehr niedrigen winterlichen Temperaturen aus. Hier erweist sich vor allem der Standort Fichtelberg als kritisch, der mit seiner Mittelgebirgslage in gut 1200 m Höhe allerdings für bebaute deutsche Standorte einen absoluten „worst case“ darstellt. An den anderen Standorten traten kritische Verhältnisse, wenn überhaupt, nur auf den stark schlagregenbelasteten Fassaden auf. Dabei ist zu beachten, dass der w-Wert und damit der

Schlagregenschutz des Außenputzes in der Parameterstudie mit 0,5 kg/m²h entsprechend den Anforderungen der DIN 4108-3 angenommen wurde. Diese weist in ihrer neueren Fassung bereits darauf hin, dass dies für innen gedämmte Bauteile oft nicht mehr ausreichend ist. Trotzdem bleibt die Zahl der Bauteilvarianten, die aufgrund des Regeneintrags von außen zu feucht werden, an den normalen Standorten recht überschaubar. Sind in diesen Fällen feuchte- und frostunempfindliche Materialien vorhanden, stellt dies meist trotzdem kein Problem dar. Falls doch, können die Verhältnisse mit einem Regenschutz gemäß WTA Merkblatt 6-5 in den unkritischen Bereich verschoben werden.

Für alle untersuchten Außenklimata inklusive des Extremstandorts Fichtelberg, für Wohnraumklima mit normaler, Bemessungs- und hoher Feuchtelast sowie für alle betrachteten Wandbildner existieren also Lösungen aus der Bandbreite der untersuchten Systeme, mit denen eine Innendämmung schadenfrei und dauerhaft zum Einsatz kommen kann. Die Heatmaps in den jeweiligen Kapiteln und im Anhang erlauben für die praktische Anwendung einen schnellen Überblick und die Identifikation geeigneter Systeme für die jeweiligen Randbedingungen. Mit einem adäquaten Regenschutz und einer moderat dampfbremsenden Schicht auf der Raumseite funktionieren weit über 95 % der untersuchten Varianten.

Dementsprechend kann festgestellt werden, dass es heute nur noch wenige Fälle gibt, in denen eine Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht nicht vertretbar ist. Dies betrifft vor allem Situationen, bei denen bei starker Schlagregenbelastung kein ausreichender Regenschutz hergestellt werden kann, wie zum Beispiel bei Fachwerk oder nicht behandelbaren Natursteinfassaden. Ansonsten bleiben vor allem die Fälle übrig, bei denen die erforderlichen Begleitmaßnahmen zwar technisch möglich, aber nicht wirtschaftlich durchführbar sind. Da bereits die sichere Identifikation dieser Fälle mit entsprechenden Kosten verbunden ist, bleibt die Problematik in der Praxis virulenter als in der Theorie.

7.2.2 Schlagregenbelastung und Schlagregenschutz

Eine zu große Schlagregenaufnahme kann, wie bereits erwähnt, einer der wenigen Einflussfaktoren sein, der tatsächlich den Einsatz einer Innendämmung unmöglich macht. Umso wichtiger ist es, sowohl die standortspezifische Schlagregenbelastung als auch den aktuellen Schlagregenschutz der Bestandswand möglichst genau zu erfassen. Der Regenschutz der Fassade wird entweder konstruktiv oder durch eine geringe Wasseraufnahmefähigkeit der Fassade sichergestellt. Bei Altbauten und hier besonders bei Sichtmauerwerk sind die Eigenschaften der Fassade aber in der Regel nicht bekannt. Im Zweifel muss die Wasseraufnahme am Objekt ermittelt werden.

Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, welche In-situ-Messverfahren besser und welche weniger für die Ermittlung der Wasseraufnahme geeignet sind. Dabei stellte sich heraus, dass zum einen möglichst große Prüfflächen verwendet werden sollten, wie es z.B. mit der Franke-Platte möglich ist, und zum anderen Korrekturfunktionen eingesetzt werden müssen, die den In-situ gemessenen Wert mit einer Konfidenz von 95 % auf den Labor-Messwert übertragen können, der den Materialkennwerten zu Grunde liegt. Da die

Messungen mit vielen Unsicherheiten behaftet sind, wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die eine möglichst genaue Ermittlung der Fassadeneigenschaften für die Beurteilung des Schlagregenschutzes auf der Basis solcher In-situ-Messungen erlaubt. Dazu wurden neben den Durchführungsrandbedingungen auch die Auswertemethode der Messergebnisse festgelegt.

Die Schlagregenbelastung wird bei der hygrothermischen Bemessung zunächst für eine ungeschützte Lage untersucht. Stehen Gebäude gleicher Höhe mehr als 6 m auseinander, sollte nicht von einer geschützten Lage ausgegangen werden – dies gilt meist auch bei Gebäuden mit sehr unterschiedlicher Höhe. Bei geringeren Abständen nimmt die Regenbelastung in der zweiten Reihe deutlich ab – leider konnten hier aber aufgrund der nicht ausreichenden Datengrundlage noch keine allgemeinen Korrekturfaktoren vorgeschlagen werden. Daher wird empfohlen, die Belastung bei Bedarf am Objekt zu bestimmten. Dafür wurden eine einfache, praxisgerechte und auch wirtschaftlich vertretbare Messmethode vorgeschlagen.

7.2.3 Freilandversuche zur Validierung

Die durchgeführten Freilandversuche an Wandelementen mit vier Innendämmmaterialien lassen sich wie folgt zusammenfassen: Bei einer Versuchsdauer über drei Winterperioden wurde festgestellt, dass die Temperatur an der Grenzfläche zwischen Mauerwerk und Innendämmung nicht unter 5 °C sinkt, auch nicht bei -20 °C Außenlufttemperatur. Randeffekte durch die Einbausituation der Wandelemente im Versuchsgebäude führen dabei zu etwas höheren Temperaturwerten als im ungestörten Fall in der Praxis zu erwarten sind. Die Messung der relativen Feuchte und die Holzfeuchtemessung zeigen gute Übereinstimmung.

Die diffusionsoffenen Wandelemente mit Aerogel-Hochleistungsdämmputz oder mit Mineraldämmplatte zeigen kurzzeitig einen Anstieg der Feuchte auf Werte bis etwa 90 % r.F., bleiben aber wie die dampfbremsenden Varianten (EPS grau oder Mineralwolle mit Dampfbremse) über den gesamten Zeitraum im unkritischen Bereich. Die Messergebnisse lassen sich mit WUFI® insbesondere nach Austrocknung der Einbaufeuchte bzw. Regenfeuchte gut nachvollziehen. Die ermittelten Materialdatensätze geben also die Materialeigenschaften realitätsnah wieder und bestätigen die Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie.

7.3 Anschlussdetails und Wärmebrücken

Bei Innendämmungen kommt es zwangsläufig dazu, dass in Bereichen von Bauteilanschlüssen die Dämmebene durchstoßen wird. Verstärkte Wärmebrückenwirkungen, verringerte Oberflächentemperatur und damit erhöhte relative Luftfeuchten sowie eine Begünstigung von Schimmelpilzwachstum können die Folge sein. Neben linienförmigen 2D-Wärmebrücken spielen bei der Innendämmung daher auch punktförmige 3D-Wärmebrücken (z.B. in Eckpunkten von Bauteilanschlüssen) eine Rolle. Für punktförmige Wärmebrücken existieren jedoch in Deutschland keine gesonderten Nachweise der Schimmelgefahr, da diese bei anderen Dämmvarianten, wie z.B. bei außenseitig gedämmten Konstruktionen, in der Regel

nicht ins Gewicht fallen. Ziel dieser Arbeit war es also, speziell für innengedämmte Konstruktionen aus den raumseitigen Oberflächentemperaturen an linienförmigen Wärmebrücken auf die Zustände an anliegenden punktförmigen Wärmebrücken zu schließen.

Zunächst wurden hierfür stationäre Berechnungen mit Randbedingungen nach DIN 4108-2 an sechs Konstruktionsdetails an verschiedenen nachträglich innengedämmten Bestandskonstruktionen durchgeführt. Um sowohl linien- als auch punktförmige Wärmebrücken auf ihre Oberflächentemperaturen hin untersuchen zu können, wurden sowohl 2D als auch 3D-Berechnungen durchgeführt. Aus den umfangreichen Ergebnissen dieser Berechnung und anschließender Regressionsanalyse konnte eine Modellgleichung aufgestellt werden, die vom Temperaturfaktor an einer 2D-Wärmebrücke auf den Temperaturfaktor an einer angrenzenden 3D-Wärmebrücke schließen lässt. Für die zugrunde gelegten Bestandskonstruktionen und Dämmvarianten kann die Berechnung der punktförmigen Wärmebrücke folglich durch 2D-Berechnung und anschließende Regressionsanalyse erfolgen. Dies kann eine erhebliche Reduzierung des Planungsaufwands für Innendämmungen bedeuten, da die Simulation von 3D-Wärmebrücken nicht nur zeitaufwendig, sondern auch nur mit speziellen Programmen möglich ist.

Mit etwas reduziertem Variantenumfang wurden anschließend instationäre Berechnungen des Wärmedurchgangs an denselben Konstruktionsdetails durchgeführt. Anhand der simulierten Oberflächentemperaturen wurden die Oberflächenfeuchten ermittelt, um anschließend mit WUFI®-Bio eine biohygrothermische Simulation hinsichtlich des Schimmelpilzwachstumsrisikos durchzuführen. Das prognostizierte Schimmelpilzwachstum wurde sowohl ins Verhältnis mit dem 2D-Temperaturfaktor als auch mit dem 3D-Temperaturfaktor gesetzt. Eine Abschätzung des Schimmelpilzrisikos bzw. -wachstums an einer Wärmebrücke wird durch dieses Vorgehen allein anhand des Temperaturfaktors möglich.

In der DIN 4108-2 werden zur Schimmelpilzvermeidung Temperaturfaktoren an linienförmigen Wärmebrücken von mindestens 0,7 gefordert. An den zugehörigen punktförmigen Wärmebrücken wurde jedoch z.T. ein Schimmelpilzwachstum von 500 mm pro Jahr prognostiziert, auch wenn alle anschließenden linienförmigen Wärmebrücken die Mindestanforderung erfüllen. Die Konstruktion ist also in dieser Form nicht möglich. Erst wenn eine Berechnung des Temperaturfaktors an der punktförmigen Wärmebrücke erfolgt und auch dieser mindestens 0,7 beträgt, kann die Konstruktion als unbedenklich hinsichtlich der Schimmelpilzbildung eingestuft werden. Zusätzlich besteht eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten für Wärmebrücken, beispielsweise durch den Einsatz von Dämmkeilen, welche die Wärmebrückenproblematik weiter entschärfen können.

Abschließend wurde untersucht, inwiefern die numerischen Berechnungen von den Messungen abweichen und ob diese auf der sicheren Seite liegen, um Schäden durch zu niedrige Oberflächentemperaturen zu verhindern. Es stellte sich heraus, dass bei passender Wahl der für die Berechnung benötigten Eingangsgrößen (z.B. Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübergangswiderstände) ein hoher Übereinstimmungsgrad mit allerdings nur geringem Sicherheitspuffer festzustellen ist.

7.4 Intermittierender Betrieb

In diesem Teil des Projekts wurde untersucht, welche zusätzlichen positiven Effekte sich erzielen lassen, wenn Innendämmungen in Kombination mit intermittierendem Gebäudebetrieb, niedrigemissiven Beschichtungen oder Strahlungsheizungen betrieben werden. Durch eine Entkoppelung der thermischen Speichermassen können sowohl eine schnellere Aufheizzeit als auch Energieeinsparungen bei intermittierender Beheizung erwartet werden. Auf der anderen Seite muss beachtet werden, dass sowohl das hygrothermische Verhalten der Konstruktion als auch die thermische Behaglichkeit der Nutzer durch solche Maßnahmen negativ beeinflusst werden können.

Um die Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf, hygrothermischem Bauteilverhalten und Komfort im Zusammenhang mit Innendämmungen im intermittierendem Gebäudebetrieb genauer zu beleuchten, wurde mithilfe von WUFI®-Plus eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt. Durch Variation der Nutzungstypen, Dämmvarianten, Heizsysteme, Betriebsvarianten und Zahl der Außenwände wurden insgesamt 1.440 Parameterkombinationen untersucht. Für die betrachteten Nutzungsszenarien Küche, Schlafen, Wohnen und Büro konnte jeweils eine Dämmvariante gefunden werden, die eine Beheizung nur bei Anwesenheit des Nutzers mit maximal 10 % der Anwesenheitsdauer außerhalb des definierten Komfortbereichs ermöglicht. Nur das Nutzungsszenario Bad, wo eine Kombination von sehr kurzen Aufenthaltszeiten mit hohen gewünschten Operativtemperaturen vorliegt, erweist sich als kritisch hinsichtlich einer intermittierenden Beheizung nur bei Anwesenheit des Nutzers. Dennoch ist eine Nachtabsenkung problemlos möglich.

Durchweg erwies sich im intermittierenden Betrieb eine Beheizung durch einen schnell reagierenden Radiator als effektiver als durch träge reagierende Flächenheizsysteme. Eine zusätzliche innenseitige Dämmung der Innenwände kann die Aufheizzeit von Räumen verbessern, jedoch muss hier der zusätzliche Flächenverlust berücksichtigt werden. Die Operativtemperatur sollte für das Erreichen des Komfortbereiches in einem akzeptablen Zeitrahmen tagsüber nicht mehr als 2-3 °C unter die gewünschte Temperatur bei Anwesenheit abgesenkt werden. Dies soll ein ausreichend schnelles Aufheizen sicherstellen.

Werden die einzelnen Räume nach den empfohlenen Varianten saniert und betrieben, so ergibt sich auf Wohnungsebene eine rechnerische Senkung der Transmissionswärmeverluste um fast 2/3. Wird dieses Ergebnis weiter skaliert auf alle Gebäude des deutschen Gebäudebestands, die potentiell für Innendämmungen infrage kommen (rund 12 %), so könnten rechnerisch rund 9 % des Endenergieverbrauchs im Haushaltssektor eingespart werden. Insgesamt lassen sich rund 49 % der zu erwartenden Einsparungen auf eine Verbesserung der Energieeffizienz der Gebäude zurückführen (Aufbringung der Innendämmung), jedoch immer noch 15 % auf die Verbesserung der Energiesuffizienz, die mit der Umstellung von kontinuierlicher Beheizung auf intermittierender Beheizung einhergeht.

7.5 Weiterer Forschungsbedarf

Trotz der vielen neuen Erkenntnisse, die im Rahmen dieses Projekts gewonnen und für die Praxis aufbereitet werden konnten, wurde doch an einigen Punkten der weitere Forschungsbedarf deutlich.

Dies betrifft die Naturfaserdämmungen, die mit den Grenzwerten aus DIN 68800-1 vermutlich zu früh von der Anwendung ausgeschlossen werden. Hier wäre es wünschenswert, produktgruppen- bzw. bei Bedarf auch produktspezifische Grenzwerte zu ermitteln. Eine Alternative könnte sein, die Dauerhaftigkeit solcher Materialien im Vergleich zu Massivholz zu definieren. Für Holz stehen zahlreiche Modelle zur Verfügung bzw. befinden sich aktuell in Entwicklung, die die Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur auch instationär beurteilen und damit eine deutlich realistischere Einschätzung des Risikos ermöglichen. Für Bereiche mit höherer Feuchtebelastung könnten dann Faserdämmstoffe eingesetzt werden, die mindestens so dauerhaft sind wie Holz und mit den dann verfügbaren Holz-Bewertungs-Modellen beurteilt werden.

Ein in der Praxis immer wieder auftretendes Problem ist die zuverlässige Beurteilung des Bestands bzw. die Identifikation der evtl. zu ermittelnden Kennwerte. Praktiker sind mit dieser Einschätzung meist überfordert und die Ermittlung aller Eigenschaften ist mit Kosten verbunden, die dann oft dazu führen, dass gar nicht gemessen wird. Hier wäre die Etablierung einer Vorgehensweise wünschenswert, die nach wirtschaftlichen Kriterien das erforderliche Minimum an Informationen iterativ ermittelt, so dass bei minimalen Kosten immer ein maximal zuverlässiges Ergebnis erzielt wird.

Bei der Ermittlung des w-Werts der Fassade konnten durch das Projekt bereits eine deutlich sicherere und klarere Vorgehensweise für die Praxis vorgeschlagen werden. Auch diese ist jedoch immer noch mit einem größeren zeitlichen Aufwand und einigen Unsicherheiten verbunden. Die Entwicklung eines schnelleren und für den Standardeinsatz geeigneten Verfahrens wäre daher wünschenswert.

In diesem Bericht konnte mithilfe einer Regressionsanalyse ein Vorgehen entwickelt werden, um vom Temperaturfaktor an 2D-Wärmebrücken auf den Temperaturfaktor an 3D-Wärmebrücken zu schließen, wodurch planungsaufwendige 3D-Simulationen entfallen können. Jedoch gilt dieses Vorgehen derzeit nur für die in der Regressionsanalyse zugrunde gelegten Bestandskonstruktionen und Dämmvarianten. Ob die entwickelten Modelle auch für andere Geometrien und Materialien zutreffen, wäre nur durch eine nennenswerte Erweiterung des Rechenumfangs zu prüfen.

Bei der Prognostizierung des Schimmelpilzwachstums an Wärmebrücken konnte an punktförmigen Wärmebrücken ein unzulässig hohes Wachstum ermittelt werden, auch wenn die zugehörigen linienförmigen Wärmebrücken alle den in der DIN 4108-2 geforderten Temperaturfaktor von 0,7 erfüllten. Dieser Effekt tritt auf, da die Temperatur in der punktförmigen Wärmebrücke noch einmal deutlich geringer sein kann, als die der linienförmigen Wärmebrücke. Ein 3D-Temperaturfaktor wäre deutlich aussagekräftiger. Folglich sollte in der

einschlägigen Normung eindeutig festgelegt werden, ob und wie neben dem Temperaturfaktor an der linienförmigen Wärmebrücke auch der Temperaturfaktor and der punktförmigen Wärmebrücke zu errechnen ist.

7.6 Literaturverzeichnis

DIN 68800-1, Oktober 2010: Holzschutz - Teil 1 Allgemeines.

DIN 68800-2, Februar 2012: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.

WTA Merkblatt 6-5, April 2014: Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren.

DIN 4108-3, November 2014: Wärmeschutz und Energie- Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.