TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

INSTITUT FÜR BAUKLIMATIK
FAKULTÄT ARCHITEKTUR

Abschlussbericht

FEUCHTEATLAS ZUR VERMEIDUNG PLANUNGSBEDINGTER FEUCHTESCHÄDEN

Neue Beurteilungskriterien zur Bewertung innen gedämmter Konstruktionen

U. Ruisinger, J. Grunewald

Dresden, 22. April 2009

Dieses Vorhaben wurde zu 100% mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Kennzeichen 0329663H gefördert.

Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden

finanziert durch: Bundesministerium für Wirtschaft
und Technologie (BMWi)
53107 Bonn

Förderkennzeichen: 0329663H

Projektträger: Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Ausführende Institution: Institut für Bauklimatik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden

Autoren: Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger
Prof. Dr.-Ing. John Grunewald

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

Der Feuchteatlas wurde unter Mithilfe von Architekturstudenten des 4. Semesters, Jahrgang 2006, insbesondere durch Tobias Blaschke und Denes Honus erarbeitet.

Ein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. em. Peter Häupl.

Teil I Dokumentation

1 Einleitung 6

2 Berechnungsverfahren 10

2.1 Einführung 10

2.2 DIN-Verfahren 12

2.3 COND-Verfahren 16

2.4 Simulationsprogramm DELPHIN 22

2.4.1 Einführung 22
2.4.2 Theoretische Grundlagen 24
2.4.3 Materialfunktionen und -parameter 26
2.4.4 Kalibrierung des DELPHIN-Materialmodells 34

2.5 Zusammenstellung der Materialparameter 36

2.6 Strömungen in Hohlräumen und durch luftdurchlässige Baustoffe 37

3 Bewertungskriterien 40

3.1 Einführung 40

3.2 Stationäre Klimabedingungen 41

3.3 DIN- und COND-Kriterien 42

3.3.1 Mindestwärmeschutz 42
3.3.2 Transmissionswärmeverluste 42
3.3.3 Begrenzung der inneren Kondensatmenge 43
3.3.4 Begrenzung des inneren Dampfdiffusionswiderstandes 43
3.3.5 Vermeidung von Tauwasser und Schimmel 44
3.3.6 Wärmespeicherkapazität der innen liegenden Schichten 46
3.3.7 Beispielkonstruktion zur Demonstration der Kriterien 47
3.3.8 Ergebnisse nach DIN 4108 48
3.3.9 Ergebnisse nach COND 49
3.3.10 Zusammenstellung der Nachweise 51

3.4 Klimadaten für Simulationsverfahren 53

3.4.1 Auswahl der Testreferenzjahre (TRY) 53
3.4.2 Klimaelemente 54
3.4.3 Raumklima 58

Inhaltsverzeichnis

3.5 Neue Kriterien für Simulationsverfahren 61

3.5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen 61
3.5.2 Wärmeverluste durch Transmission 66
3.5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche 68
3.5.4 Temperatur- und Feuchteprofile, Frost-Tauwechsel 71
3.5.5 Belastungskennzahlen für biologische Schädigung 73
3.5.6 Belastungskennzahlen für mechanische Schädigung 75
3.5.7 Belastungskennzahlen für die Beispielkonstruktion 77
3.5.8 Bewertung der Simulationsergebnisse 78
3.5.9 Hinweise für den Konstruktionskatalog 80

4 Zusammenfassung und Ausblick 82

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse 82

4.2 Ausblick 89

Teil II Konstruktionskatalog

0 Übersicht über Wandaufbauten 92

0.1 Grundkonstruktionsvarianten 92

0.2 Gestaltung des Gebäudewinkels 94

1 Innendämmung mit Calciumsilikat 96

1.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat 96
1.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat 104
1.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat 110
1.4 Altbauziegel, außen historischer Kalkputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat 118
1.5 Altbauziegel, außen Kunstharzoberputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat 124
1.6 Altbauziegel, außen Wärmedämmputz, innen gedämmt mit Calciumsilikat 132
1.7 Altbauziegel, außen unverputzt, innen gedämmt mit Calciumsilikat 138
1.8 Altbauziegel, innen gedämmt mit Calciumsilikat, punktuell verklebt 146
1.9 Norm-Vollziegel (240 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat 152
1.10 Norm-Vollziegel (365 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat 160
1.11 Norm-Vollziegel (490 mm), innen gedämmt mit Calciumsilikat 166

2 Innendämmung mit Cellulose und Dampfbremse 174

2.1 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit Dampfbremse, außen unverputzt 174
2.2 Altbauziegel, innen Cellulosedämmung mit FA-Dampfbremse, außen unverputzt 180

3 Innendämmung mit Holzweichfaserdämmplatte 188

3.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten 188
3.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten 194
3.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten 202
3.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Holzweichfaserdämmplatten, innen Kunstharzoberputz 208

4 Innendämmung mit Holzwolleleichtbauplatten 216

4.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten 216
4.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten 222
4.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Holzwolleleichtbauplatten 230

5 Innendämmung mit stehender Luftschicht 236

5.1 Altbauziegel, innen verkleidet mit Gipskartonplatten, Luftschicht nicht durchlüftet 236

6 Innendämmung mit Mineraldämmplatte 245

6.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten 244
6.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten 250
6.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten 258
6.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit Mineraldämmplatten, Klima TRY-Region 4 (Potsdam) . 264
6.5 Kalksandstein (175mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten 272
6.6 Kalksandstein (240mm), innen gedämmt mit Mineraldämmplatten 278

7 Innendämmung mit Porenbetonsteinen 286

7.1 Altbauziegel, innen gedämmt mit Porenbetonsteinen, außen unverputzt 286

8 Innendämmung mit PUR-Platten 292

8.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt 292
8.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt 300
8.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit PUR-Platten, außen unverputzt 306
8.4 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten mit kap. Durchdringung, außen unverputzt 314
8.5 Altbauziegel, innen gedämmt mit PUR-Platten, außen Kunstharzoberputz 320
8.6 Altbauziegel, innen gedämmt mit Polyurethanplatten, außen hydrophobiert 328

9 Innendämmung mit Schaumglas 334

9.1 Altbauziegel (250 mm), innen gedämmt mit Schaumglas 334
9.2 Altbauziegel (380 mm), innen gedämmt mit Schaumglas 342

9.3 Altbauziegel (510 mm), innen gedämmt mit Schaumglas 348

10 Innendämmung mit Wärmedämmlehm/-platten 356

10.1 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm 356
10.2 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm 362
10.3 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehm 370
10.4 Altbauziegel (250mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten 376
10.5 Altbauziegel (380mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten 384
10.6 Altbauziegel (510mm), innen gedämmt mit Wärmedämmlehmplatten 390

11 Innendämmung mit Wärmedämmputz

11.1 Altbauziegel (250 mm), innen mit Wärmedämmputz 398
11.2 Altbauziegel (380 mm), innen mit Wärmedämmputz 404
11.3 Altbauziegel (510 mm), innen mit Wärmedämmputz 412

12 Außendämmung 418

12.1 Altbauziegel, aussen gedämmt mit WDVS-System 418

13 Zweidimensionales Beispiel 426

13.1 Streichbalken-Anschluss, Altbauziegel, innen gedämmt mit Wärmedämmlehm 426

Teil III Anhang

A Abkürzungsverzeichnis 432

B Literatur 436

C Materialtabelle und Kondensatmengen der unsanierten Varianten... 442

D Klimadaten 444

I Dokumentation

1 Einleitung

Ausgangslage

Vor dem Hintergrund steigender Preise für Energie und Rohstoffe und der zunehmenden weltweiten Klimaproblematik sind alle Bereiche der Gesellschaft dazu angehalten, sparsam und effizient mit den natürlichen Ressourcen der Erde umzugehen. Das reflektiert sich auch in der aktuellen Forschungspolitik Deutschlands und in den entsprechenden gesetzlichen Bestimmungen, z.B. der Energieeinsparverordnung (EnEV). Energieoptimiertes Bauen ist eines der wesentlichen Handlungsfelder innerhalb des 5. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung. Beim Neubau geht es darum, den Primärenergiebedarf zu halbieren. Das Fernziel sind Nullemissionshäuser. Ziel für die Gebäudesubstanz ist eine weitere grundlegende Verbesserung der Möglichkeiten einer konsequenten und nachhaltigen energetischen Sanierung.

Bei der energetischen Aufwertung von älteren Gebäuden mit geringem oder oft unzureichendem Dämmstandard sieht sich der Planer mit der Aufgabe konfrontiert, Lösungen für die bestehende Bausubstanz zu finden, die sowohl in baustofflicher, konstruktiver und gestalterischer Hinsicht verträglich sind. Die Gebäudehülle (Umfassungskonstruktion) ist ein wesentliches Element des gestalterischen und energetischen Gesamtkonzeptes eines Gebäudes. Ihre Ausführung ist maßgebend für die Transmissionswärmeverluste welche für Bestandsbauten häufig den Hauptanteil des Heizenergieverbrauchs darstellen. Gestiegene Ansprüche hinsichtlich des Wohnkomforts sind mit höheren Anforderungen an die Gebäudehülle in Einklang zu bringen und zu realisieren. Dabei müssen häufig auch unterschiedliche Wirkmechanismen und wichtige Einflussfaktoren wie Schlagregen, Frost, Salzausblühungen, Verwitterung oder organische Schädlinge bewertet werden, die mit den gängigen Bemessungsverfahren nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden können.

Zur hygrothermischen Bewertung von Umfassungskonstruktionen existieren verschiedene Bemessungsverfahren. Allerdings erfolgen diese Berechnungen mit vereinfachenden Annahmen, z.B. stationären Klimarandbedingungen (oder konstanten Monatsmittelwerten) und Vernachlässigung des kapillaren Feuchtetransports. Das kann in der Planungspraxis Unsicherheiten hinsichtlich der Bewertung von Umfassungskonstruktionen hervorrufen. Es ist zu erwarten, dass sich die Bauaktivitäten zukünftig weiter in Richtung Bestandssanierung verschieben und damit die Forderung nach einer ganzheitlichen Bewertung von Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Dauerhaftigkeit noch stärker in den Mittelpunkt rückt. In diesem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit durch die Anwendung von Standardverfahren unter Normklimabedingungen innovative Lösungen verhindert werden oder kurzlebige Konstruktionen zur Anwendung gelangen, weil wesentliche Wirkmechanismen unberücksichtigt bleiben.

Die ganzheitliche Bewertung von Umfassungskonstruktionen sollte neben baukonstruktiven und baustofflichen Aspekten auch die Berücksichtigung des realen Klimas beinhalten. Um das Verhalten von Gebäuden und baukonstruktiven De-

tails potenziell realitätsnah abzubilden, können Simulationsverfahren eingesetzt werden, welche die realen Materialeigenschaften durch genauere Modelle abbilden, als die Bemessungsverfahren dies können. Für die Umsetzung von Forschungsergebnissen in die Planungspraxis erlangen Simulationsverfahren zunehmend Bedeutung. Deren qualifizierte Anwendung erfordert allerdings ein höheres Maß an Fachkenntnis.

Problemstellung

Für die Interpretation der vielfältigen Ergebnisse bauphysikalischer Bewertungen mit Hilfe von Simulationsverfahren gibt es bisher kaum etablierte Kriterien. Vielen Bewertungsmöglichkeiten stehen keine äquivalenten Kriterien in den Bemessungsverfahren gegenüber. Eine Reihe von Fragen gilt es in diesem Zusammenhang zu beantworten. Führt die Anwendung eines Simulationsverfahrens zur gleichen Entscheidung bezüglich der Zulässigkeit einer Konstruktion? Können Grenzfälle mit Hilfe der Simulation genauer bewertet werden? Wie sinnvoll ist es, den Sicherheitsbereich mittels realitätsnäherer Abbildung der physikalischen Prozesse stärker einzugrenzen? Da der Arbeitsaufwand für die Aufbereitung und Auswertung von Simulationsrechnungen im allgemeinen höher liegt, kann der Nutzer einen Mehrwert in Form höherer Genauigkeit erwarten. Der realisiert sich aber erst dann, wenn die Kriterien entwickelt und implementiert worden sind.

Ziele

Das erste Ziel besteht in der Definition und Erläuterung von erweiterten Bewertungskriterien für Umfassungskonstruktionen, die auf neu entwickelten Algorithmen zur Auswertung von Simulationsergebnissen basieren. Diese Bewertungskriterien gehen bis zu einem gewissen Grad mit den etablierten Bemessungsverfahren konform, ergeben aber auf Grund der Vielfalt der Simulationsergebnisse ein neues, umfassenderes Bewertungsbild.

Das zweite Ziel des Feuchteatlas besteht in der beispielhaften Anwendung und praxisbezogenen Erläuterung der Bewertungskriterien für eine Auswahl gängiger Umfassungskonstruktionen mit applizierten Innendämmsystemen. Die Untersuchung bezieht sich auf eine hinreichend große Anzahl (einen Katalog) von Konstruktionen, um die Verallgemeinerbarkeit der Schlussfolgerungen zu gewährleisten.

Unter kritischen Bedingungen verursacht der konvektive Transport in durch- oder hinterlüfteten Konstruktionen bzw. Hohlräumen den Hauptanteil an Energieverlusten und Schadenspotenzialen. Es existiert bisher kein etabliertes Verfahren, welches den Einfluss der Luftkonvektion auf die hygrothermischen Prozesse in Umfassungskonstruktionen erfasst. Das dritte Ziel umfasst daher die Entwicklung und Validierung eines Verfahrens, welches in der Lage ist, den Einfluss von Luftströmungen auf den Feuchte- und Wärmehaushalt von Wand- und Dachaufbauten zu quantifizieren.

Methodik und Forschungsansatz

Die Ergebnisse neuer Simulationsverfahren werden mit denen herkömmlicher Bemessungsverfahren verglichen. Dabei kommen das am Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden entwickelte Simulationsprogramm DELPHIN (Version 4

und 5) unter realen Klimarandbedingungen sowie das analytische Bemessungsverfahren COND (IBK) und die Verfahren nach *DIN 4108* unter jeweils DIN-konformen Klimarandbedingungen zur Anwendung. Die eingehende Untersuchung verschiedener bauüblicher, eindimensionaler Standardwandaufbauten macht deutlich, in welchen Fällen die DIN-Algorithmen ungeeignet sind, weil innovative Lösungen fälschlicherweise als unzulässig eingestuft werden. Ein Vergleich von COND- und DIN-Verfahren zeigt, welchen Einfluss die Berücksichtigung des kapillaren Flüssigwassertransportes haben kann (Bemessung kapillaraktiver Systeme) und der Vergleich mit den DELPHIN-Ergebnissen demonstriert, wann auf ein Simulationsprogramm zurückgegriffen werden sollte und ob und wieweit die Ergebnisse der Bemessungsverfahren Sicherheitsreserven beinhalten.

Um den Einfluss von Luftströmungen zu quantifizieren, wurde ein Luftströmungsmodell in das Simulationsprogramm DELPHN4 implementiert. Dieses neu entwickelte CFD-(Computational Fluid Dynamics) bzw. CaFD-(Cavity Fluid Dynamics)-Modul ist in der Lage, inkompressible, laminare Luftströmungen unter Berücksichtigung viskoser Eigenschaften in einem zweidimensionalen Gebiet zu berechnen. Der Energie- und (Feuchte-)Massenaustausch zwischen den durchströmten Bereichen und den angrenzenden Materialien sowie der Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen werden mit einberechnet.

Struktur und Gliederung

Der Feuchteatlas ist in drei Teile gegliedert. Teil I beschäftigt sich mit der ausführlichen Dokumentation der angewendeten Methoden, Verfahren und Kriterien, Teil II dokumentiert die Berechnungsergebnisse des Konstruktionskataloges und der Anhang (Teil III) enthält die zu Grunde gelegten Datentabellen und Verweise auf weiterführende Literatur.

In Teil I werden die Unterschiede zwischen dem Glaser- und dem COND-Verfahren herausgearbeitet und die eingehenden Materialparameter erläutert. Auf die Grundlagen des Simulationsverfahrens DELPHIN wird insoweit eingegangen, wie das zum Verständnis des Feuchteatlas notwendig ist. Auf weiterführende Literatur wird verwiesen. In der Simulation finden Materialfunktionen anstelle von Materialparametern Anwendung. Es wird dargelegt, wie die Materialparameter als Basisparameter der Funktionsansätze eingehen. Anschließend wird auf die verwendeten Klimarandbedingungen eingegangen. Teil I stellt außerdem die neu entwickelten Beurteilungskriterien vor. Die Herleitung und Bedeutung eines jeden Bewertungskriteriums wird ausführlich und unabhängig vom konkret verwendeten Modell diskutiert, sodass die Anwendung der neuen Bewertungskriterien nicht auf ein Simulationsverfahren beschränkt bleibt.

In Teil II wird eine Vielzahl von eindimensionalen Wand- und Dachaufbauten mit Hilfe der in Teil I entwickelten Kriterien analysiert. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Bemessungsverfahren und der Simulation können so miteinander verglichen werden. Ein ausgewähltes Simulationsbeispiel eines mehrdimensionalen konstruktiven Details ergänzt den Katalog, da Feuchteschäden oft zuerst an kritischen Details wie Gebäudeecken, Einbindungen oder An-

schlüssen auftreten. Eine umfassende Zusammenstellung mehrdimensionaler Details würde aber den Rahmen des Feuchteatlas sprengen.

Teil III schließlich stellt die verwendeten Material- und Klimadaten zusammen. Die Literaturverweise und das Abkürzungsverzeichnis komplettieren den Anhang.

Der Feuchteatlas ist eine Handreichung für die Praxis, um neue Wege bei der hygrothermischen Bewertung von Wand- und Dachaufbauten zu eröffnen. Die untersuchten Fälle beziehen sich neben Neubauten vor allem auf vorhandene und zu sanierende Baukonstruktionen, welche bei unsachgemäßer Ausführung ein großes Schadenspotential bergen. Der Feuchteatlas zielt darauf ab, den Leser für die hygrothermischen Belange dieser Konstruktionen zu sensibilisieren und möchte damit einen Beitrag zur Verbesserung der fachlich fundierten bauphysikalischen Beurteilung von Baukonstruktionen leisten.

2 Berechnungsverfahren

2.1 Einführung

Zielstellungen der Verfahren

Für die hygrothermische Analyse von Wand- und Dachaufbauten stehen verschiedene Bemessungs- und Simulationsverfahren zur Verfügung. Während die Bemessungsverfahren von konstanten Klimabedingungen ausgehen, wird bei Simulationsverfahren in der Regel reales Klima verwendet. Das macht die unterschiedlichen Zielstellungen der Verfahren deutlich: Mit einem Bemessungsverfahren wird bewusst nicht die Realität abgebildet, sondern man bemisst für einen Standard- oder Extremfall. Mit Simulationsverfahren wird dagegen versucht, so realitätsnah wie möglich zu rechnen ohne jedoch auf entsprechende Sicherheitsfaktoren zu verzichten.

Verfügbare Verfahren

Hygrothermische Bemessungsverfahren sind: Das Verfahren zur Bestimmung der Mindestanforderungen an den Wärmeschutz nach *DIN 4108-2*, das so genannte Glaser-Verfahren nach *DIN 4108-3*, das Monatsbilanzenverfahren nach *DIN EN ISO 13788*, welches im wesentlichen auf dem Glaser-Verfahren aufbaut, oder das an der TU Dresden entwickelte COND-Verfahren. Anhang F der zuletzt aufgeführten Richtlinie nennt auch hygrothermische Simulationsverfahren, zu denen Softwareprogramme wie WUFI (Fraunhofer Institut für Bauphysik) oder DELPHIN (Technische Universität Dresden) zählen. Diese Aufzählung ist keineswegs vollständig. Es ist davon auszugehen, dass weltweit mehr als zwei Dutzend mehr oder weniger anwenderfreundliche Simulationsverfahren auf diesem Gebiet entwickelt wurden. Die Mehrzahl davon ist allerdings im Rahmen von Forschungsprojekten oder Doktorarbeiten entstanden, was zur Folge hat, dass die Programme oft nach Projektende nicht weiter entwickelt wurden und später nicht mehr genutzt werden können.

Aufwand und Genauigkeit

Die aufgezählten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Eingabe- bzw. Rechenaufwand und Genauigkeit. Während in den Bemessungsverfahren noch „mit Hand“ gerechnet werden kann, ist das bei Simulationsverfahren durch die Vielzahl der Rechenoperationen nicht mehr möglich. Schließlich sind die Simulationsverfahren erst durch die Entwicklung der Rechentechnik und der numerischen Lösungsverfahren möglich geworden. Die Einschränkungen der Bemessungsverfahren sind aufgrund der analytischen Lösungsmethoden umfangreicher als bei den Simulationsverfahren, deren numerische Lösungsmethoden größere Freiheiten in der physikalischen Modellierung erlauben. Einige Einschränkungen der Bemessungsverfahren werden beispielsweise im Abschnitt 6.3 der *DIN EN ISO 13788* aufgezählt. Das bedingt natürlich eine potenziell höhere Genauigkeit der Simulationsverfahren, wenn entsprechend genauere Eingabedaten zur Verfügung stehen. Die größere Freiheit in der Modellierung wird aber durch einen höheren Aufwand bei der Beschaffung der Eingabewerte (Konstruktion, Materialkennwerte, Klima) erkauft. Auch die Vielfalt der Ergebnisse kann einen höheren Aufwand bei der Auswertung bedeuten.

Übersicht verwendete Verfahren

Aus den zur Verfügung stehenden Verfahren wurden neben den DIN-Verfahren, das COND-Verfahren und das Simulationsprogramm DELPHIN ausgewählt, um anhand eines Konstruktionskataloges vergleichende Berechnungen durchzuführen. In der nachfolgenden Tabelle 2.1 ist eine Übersicht zu den berücksichtigten Transport- und Speicherprozessen der ausgewählten Verfahren zusammengestellt, die in den folgenden Abschnitten diskutiert werden sollen. Von Interesse sind dabei sowohl die Voraussetzungen und die Einschränkungen als auch die eingehenden Parameter.

Tab. 2.1: Übersicht zu den Verfahren: berücksichtigte Transport- und Speicherprozesse

	DIN	COND	DELPHIN
Wärmeleitung (Latentwärme)	Konstante Wärmeleitfähigkeit (Latentwärme nicht berücksichtigt)	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit (Latentwärme nicht berücksichtigt)	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit (Latentwärme berücksichtigt)
Wärmespeicherung	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Feuchteabhängige Wärmespeicherung
Dampfdiffusion	Konstante Dampfleitfähigkeit	Konstante Dampfleitfähigkeit	Feuchteabhängige Dampfleitfähigkeit
Kapillarer Flüssigwassertransport	Nicht berücksichtigt	Linear ansteigender Flüssigwassertransport, Diffusionsmodell	Feuchteabhängiger Flüssigwassertransport, Diffusionsmodell und Kapillardruckmodell alternativ
Feuchtespeicherung	Aus Differenz der zu- und abfließenden Dampfdiffusionsströme	Aus Differenz der zu- und abfließenden Feuchteströme (Dampfdiffusion + kapillarer Transport) Hygroskopische Aufladung nach linearisierter Feuchtespeicherfunktion	Aus Differenz der zu- und abfließenden Feuchteströme (Dampfdiffusion + kapillarer Transport) Hygroskopische Aufladung nach gemessener Feuchtespeicherfunktion
Luftströmung	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Luftdruckprofilberechnung, konvektive Luftströmung durch Druckgradienten und thermischen Auftrieb
Phasenumwandlungen	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt	Bilanzierung der Verdunstungs- und Kondensationsprozesse mit Berücksichtigung der Verdunstungskühlung
Klimarandbedingungen	Konstant nach *DIN 4108*	Konstant (DIN) oder andere sinnvolle konstante Werte	Beliebig konstant, Testreferenzjahr oder real gemessenes Klima

2.2 DIN-Verfahren

Für die hygrothermische Bemessung von Umfassungskonstruktionen stehen genormte Verfahren zur Verfügung, die dem Wärmeschutz, dem Feuchteschutz und der Energieeinsparung in Gebäuden dienen. Hier sollen die Grundzüge der Verfahren so weit dargestellt werden, wie es zum Verständnis der Unterschiede zwischen den DIN-, dem COND- und dem DELPHIN-Verfahren notwendig ist.

Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2

Zum Nachweis des Mindestwärmeschutzes von Bauteilen nach DIN 4108-2 ist der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der Konstruktion aus den inneren und äußeren Wärmeübergangswiderständen der Bauteiloberflächen, R_{Si} und R_{Se}, und der Summe der Wärmedurchlasswiderstände R der Schichten zu berechnen. Als Materialparameter gehen die Schichtdicken d_k und die Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit der Materialschichten, λ_R, ein.

$$R = \sum_{k=1}^{N} \frac{d_k}{\lambda_{R,k}} \tag{2.1}$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_{k=1}^{N} \frac{d_k}{\lambda_{R,k}} + R_{se}} \tag{2.2}$$

Die Wärmedurchgangskoeffizienten zusammengesetzter Bauteile, z.B. bei Fachwerkbauweise, werden entsprechend des Flächenanteils der einzelnen Schichten berechnet (flächengewichtetes Mittel, siehe *DIN 6946*). Der mittlere U-Wert eines Gebäudes ermöglicht eine Einschätzung der winterlichen Heizenergieverluste infolge Wärmetransmission durch die Gebäudehülle. Voraussetzung dafür ist die Angabe einer winterlichen mittleren Temperaturdifferenz und einer Heizperiodendauer.

Glaser-Verfahren nach DIN 4108-3

Das Glaser-Verfahren ist eine Methode zur hygrischen Bemessung von Umfassungskonstruktionen. Eine ausführlichere Beschreibung ist in *DIN 4108-3* gegeben. Die hygrische Bemessung von Umfassungskonstruktionen erfolgt für den Winterfall (Ermittlung der Menge des ausfallenden Kondensats) und für den Sommerfall (Ermittlung der Verdunstungsmenge) in fünf Schritten:

1. Berechnung des stationären Temperaturprofils
2. Bestimmung des Sättigungsdampfdruckverlaufs aus den Temperaturen.
3. Bestimmung der Kondensatebene (grafisch oder rechnerisch)
4. Berechnung der Dampfdiffusionsströme von innen zur Kondensatebene und von der Kondensatebene nach außen (Winterfall) bzw. von der Kondensatebene nach innen und außen (Sommerfall)
5. Berechnung der Kondensat- und der Verdunstungsmenge und Vergleich mit den Kriterien.

Der Unterschied zwischen den Berechnungen für den Winterfall (Kondensationsperiode) und den Sommerfall (Verdunstungsperiode) ist durch die Randbedingungen gegeben, welche die Richtung der Dampfdiffusionsströme bestimmen.

Tab. 2.2: Klimarandbedingungen des Glaserverfahrens aus DIN 4108-3 (siehe auch Tabelle 3.1)

	Raumklima	Außenklima
Winterfall	20°C, 50% r.F.	-10°C, 80% r.F.
Sommerfall Wand	12°C, 70% r.F.	12°C, 70% r.F.
Sommerfall Dach	12°C, 70% r.F.	20°C, 70% r.F.

Berechnung des Temperaturfeldes

Die Vereinfachungen des Glaser-Verfahrens sollen hier bezüglich der Berechnung des Temperaturfeldes zusammengefasst werden:

- das Temperaturfeld bleibt konstant, es wird keine Wärmeenergie mehr gespeichert
- es wird ein eindimensionaler Wärmefluss angenommen, d.h. Wärme wird nur in x-Richtung geleitet
- die Wärmeleitfähigkeit bleibt unabhängig von anderen physikalischen Zustandsgrößen (d.h. Feuchtegehalt) konstant

Die Wärmestromdichte q ist proportional zum Temperaturgradienten $d\theta / dx$ (1. Ficksches Gesetz). Der Transportkoeffizient ist der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit des Materials, λ_R.

$$q = -\lambda_R \cdot \frac{d\theta}{dx} \qquad \textit{Wärmestromdichte in W/m}^2 \qquad (2.3)$$

Im stationären Zustand erfolgt keine Änderung der Temperatur mehr. Die Wärmestromdichte q ist demnach an allen Schichtgrenzen und daher auch an jeder Stelle innerhalb der Schicht gleich groß (Abbildung 2.1).

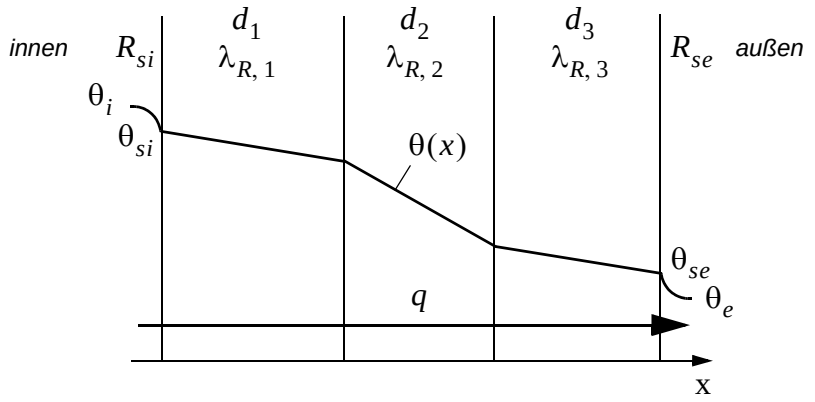

Abb. 2.1: Stationäre Wärmeleitung innerhalb einer dreischichtigen Konstruktion

Das Temperaturfeld $\theta(x)$ bzw. die Schichtgrenztemperaturen bei mehrschichtigen Konstruktionen ergeben sich aus der obigen Bedingung, dass die Wärmestromdichte konstant ist. Die Schichtgrenztemperaturen können dann mit $k = 1 \ldots N$ sukzessive mit Hilfe von Gleichung *(2.5)* und *(2.5)* bestimmt werden, wenn N die Anzahl der Schichten ist.

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \qquad (2.4)$$

$$q = \frac{1}{R_i} \cdot (\theta_i - \theta_{oi}) = \frac{\lambda_R}{d_k} \cdot (\theta_k - \theta_{k+1}) \qquad (2.5)$$

Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungsmenge

Für jede Schichtgrenze kann aus den Temperaturen der jeweilige Sättigungsdampfdruck berechnet werden. Die Berechnung des Wasserdampfpartialdruckprofils ist nicht zwingend vorgeschrieben, kann aber auf analoge Weise wie die Berechnung das Temperaturprofils durchgeführt werden, wenn man die diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken nach Gleichung *(2.6)* an Stelle der Wärmedurchlasswiderstände verwendet und die Wärmeübergangswiderstände durch Dampfübergangswiderstände ersetzt. Erreicht oder überschreitet der berechnete Partialdruck an einer oder mehreren Stellen den Sättigungsdampfdruck, so kommt es zur Kondensation.

Es existiert auch ein grafisches Verfahren zur Bestimmung der Wasserdampfpartialdrücke. Die Konstruktion wird zunächst im Maßstab der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d gezeichnet und das Sättigungsdampfdruckprofil eingetragen.

$$s_{d,k} = \mu_k d_k \qquad \textit{Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m} \qquad (2.6)$$

Die Partialdrücke zu beiden Seiten der Konstruktion werden dann auf kürzestem Weg verbunden, ohne jedoch das Sättigungsdampfdruckprofil zu schneiden. Bei diesem Verfahren werden vier Fälle nach Abbildung 2.2 unterschieden.

1. Der vorhandene Wasserdampfpartialdruck ist stets kleiner als p_{sat}, es entsteht kein Tauwasser.
2. Die Partialdrucklinie berührt das Sättigungsdampfdruckprofil an genau einer Stelle, es entsteht Tauwasser an dieser Schichtgrenze.
3. Das Sättigungsdampfdruckprofil wird zweimal berührt, es entsteht Kondensat in allen Schichten zwischen den Berührungspunkten.
4. Das Sättigungsdampfdruckprofil wird zweimal berührt, es entsteht Kondensat an zwei Schichtgrenzen. Die beiden Kondensatbereiche berühren sich nicht.

Fällt Kondensat aus wird die Tauwassermenge $m_{W,T}$ in kg/m^2 nach Gleichung *(2.7)* berechnet (siehe *Nicolai 2002* und *DIN 4108-3*). Dabei bezeichnen die Indizes k_1 und k_2 die beiden links und rechts der Berührungspunkte liegenden Schichten. Sollte nur in einer Ebene Kondensat auftreten (Fall 2), gilt $k_2 = k_1 + 1$. Die Tauwassermenge wird so als Differenz der ein- und ausdiffundierenden Wasserdampfmengen berechnet. Die Dauer der Tauperiode wird in

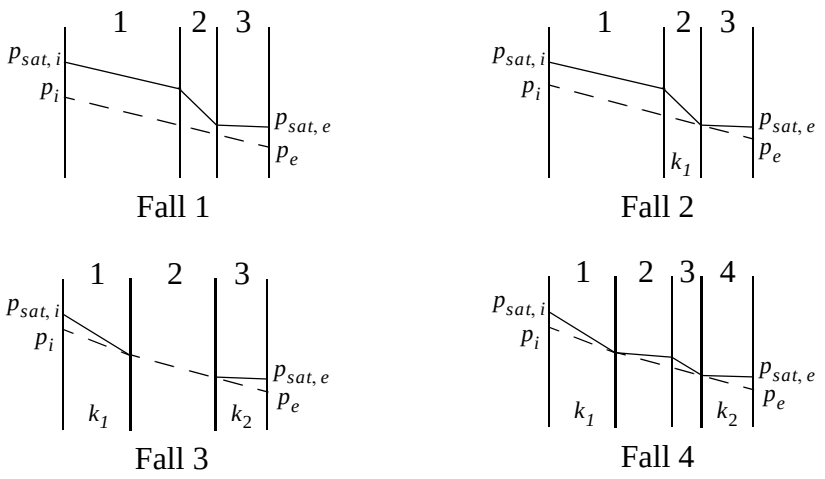

Abb. 2.2: Fallunterscheidungen beim Glaserschema

der DIN 4108-3 mit $t_T = 1440\ h$ angegeben. Die Berechnung der Verdunstungsmenge erfolgt analog, nur unter den Randbedingungen für den Sommerfall. Die Dauer der Verdunstungsperiode beträgt laut DIN 4108-3 $t_V = 2160\ h$.

$$m_{W,T} = \delta_d \cdot \left(\frac{p_i - p_{sat,k_1}}{S_i} - \frac{p_{sat,k_2} - p_e}{S_e} \right) \cdot t_T \qquad (2.7)$$

$$m_{W,V} = \delta_d \cdot \left(\frac{p_i - p_{sat,k_1}}{S_i} + \frac{p_{sat,k_2} - p_e}{S_e} \right) \cdot t_V \qquad (2.8)$$

mit $\delta_d = 1,9 \times 10^{-10} \frac{kg}{m \cdot Pa \cdot s} = \frac{1}{1,5 \times 10^{-6}} \frac{kg}{m \cdot Pa \cdot h}$

$$S_i = \sum_{k=1}^{k_1} s_{d,k} \qquad S_e = \sum_{k=k_2}^{N} s_{d,k}$$

Die berechneten Tauwasser- und Verdunstungsmengen werden dann nach Normkriterien bewertet. Das bedeutet im Normalfall eine Begrenzung der Kondensatmenge auf maximal 1 kg/m^2. Zusätzlich darf die Menge des Kondensats die Verdunstungsmenge nicht übersteigen, um die Austrocknung im Sommer zu gewährleisten. Die Gegenüberstellung der verschiedenen Kriterien der hier verwendeten Verfahren erfolgt in Kapitel 3.

An Materialparametern benötigt das Glaserverfahren dazu lediglich die Wärmeleitfähigkeit λ_R (siehe *DIN 52616*) und den Wasserdampfdiffusionswiderstandswert μ (siehe *DIN EN ISO 12572*, ohne Einheit).

2.3 COND-Verfahren

Unterschiede zum DIN-Verfahren

Die Berechnung nach dem COND-Verfahren erfolgt analog zum DIN-Verfahren unter konstantem Klimabedingungen. Es können die Randbedingungen nach Tabelle 2.2 zur Anwendung kommen oder es kann auch ein beliebiges anderes konstantes Klima verwendet werden. Das ist z.B. bei Räumen mit besonderen Nutzungsanforderungen von Bedeutung, wenn mit höheren relativen Luftfeuchten oder Temperaturen gerechnet werden muss.

Das Verfahren nach Glaser liefert auf einfache Art und Weise die Menge des zu erwartenden Kondensats, ohne dabei jedoch die Ausbreitung des anfallenden Wassers durch kapillare Transportprozesse zu berücksichtigen. Kapillare Leitung kann deutlich zur hygrischen Entspannung der Konstruktion beitragen, wenn Materialien mit einer großen kapillaren Leitfähigkeit, z.B. eine Innendämmung aus kapillaraktivem Calciumsilikat, am Konstruktionsaufbau beteiligt sind. Die Berechnung mit dem Glaserschema würde dann eine unzulässig hohe Kondensatmenge liefern, obwohl sich die Feuchte in der Realität schnell innerhalb des Dämmmaterials verteilt und damit eine zügige Austrocknung begünstigt wird.

Die Berechnung des Temperaturprofils, der Dampfdruckprofile und der Kondensatmengen erfolgt im COND-Verfahren anders als im Glaser-Verfahren. Das COND-Verfahren berücksichtigt zusätzlich:

- eine kondensat- bzw. flüssigwasserabhängige Wärmeleitfähigkeit, um den Feuchteeinfluss auf die Wärmedämmung zu quantifizieren,
- die hygroskopische Aufladung der Materialien, d.h. die Adsorption von Feuchte in den Mikroporen mit einer Feuchtespeicherfunktion und
- die schnellere Verdunstung durch Ausbreitung des Kondensats infolge kapillarer Leitung mit einer Flüssigwasserleitfunktion.

Das COND-Verfahren liefert damit eine realitätsnähere Kondensat- und Verdunstungsmenge als das Glaserschema.

Vereinfachungen für die analytische Lösung

Das COND-Verfahren beinhaltet aber auch einige notwendige Vereinfachungen, um eine analytische Lösung zu ermöglichen. Dazu werden

- eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von dem Feuchtegehalt vorausgesetzt,
- eine vereinfachte, linearisierte Sorptionsisotherme (schematischer Verlauf wie in Abbildung 2.3 dargestellt) definiert,
- eine konstante Dampfleitfähigkeit angenommen und
- eine linearisierte Funktion für den kapillaren Transport von Flüssigwasser (schematischer Verlauf wie in Abbildung 2.4 dargestellt) verwendet.

Weitere Einschränkungen resultieren aus den stationären Randbedingungen und der Wandgeometrie:

- Das Feuchtefeld bleibt konstant, die in die Konstruktion hinein- und hinaus-

strömenden Flüsse sind gleich groß.

- Es wird ein eindimensionaler Feuchtetransport angenommen, d.h. Wasserdampf und Kapillarwasser wird nur in x-Richtung geleitet.

Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

Um den Feuchteeinfluss auf die Wärmedämmung zu quantifizieren, muss eine Wärmeleitfähigkeitsfunktion $\lambda(w)$ in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt definiert werden. Gleichung *(2.9)* stellt eine lineare Funktion mit dem Parameter λ_R dar, die im COND-Algorithmus implementiert worden ist.

$$\lambda(w) = \begin{cases} \lambda_R & w < w_{95} \\ \lambda_R + 0{,}6 \cdot w & w \geq w_{95} \end{cases} \quad \text{in W/m·K} \qquad (2.9)$$

In obiger Gleichung *(2.9)* ist λ_R der feuchtebeaufschlagte Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes, wie er beispielsweise der DIN für Materialien mit einem praktischen Feuchtegehalt w_{80} entnommen werden kann. Im hygroskopischen Bereich wird mit einer kostanten Wärmeleitfähigkeit gerechnet. Tritt bei einer COND-Berechnung überhygroskopische Feuchte (Kondensat) im Wandquerschnitt auf, führt dies zu einer Neuberechnung der Wärmeleitfähigkeiten der Materialien sowie der Temperatur- und Feuchteprofile. Diese iterative Berechnung wird so lang fortgesetzt, bis die Änderung der Ergebnisse eine Toleranzschwelle unterschritten hat.

Approximation der Feuchtespeicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion hat üblicherweise einen Verlauf, der durch das Porensystem des Baustoffes bestimmt wird. Sie ist daher in dieser Form einer analytischen Lösung nicht zugänglich und wird deshalb im COND-Verfahren mit zwei Geradengleichungen nach Gleichung *(2.10)* angenähert. Damit werden die folgenden beiden Materialparameter eingeführt: der praktische Feuchtegehalt w_{80} bei einer relativen Luftfeuchte von 80% und der (effektive) Sättigungsfeuchtegehalt w_{eff}. Als Geradengleichung gilt für den gesamten Feuchtebereich (siehe Abbildung 2.3):

$$w(\varphi) = \begin{cases} w_{80} \cdot \dfrac{\varphi}{0{,}8} & 0 \leq \varphi \leq 95\% \\ \dfrac{w_{eff} - w_{95}}{\varphi - 0{,}95} \cdot (\varphi - 0{,}95) + w_{95} & 95\% \leq \varphi \leq 100\% \end{cases} \qquad (2.10)$$

mit $\quad w_{95} = w_{80} \cdot \dfrac{0{,}95}{0{,}8}$

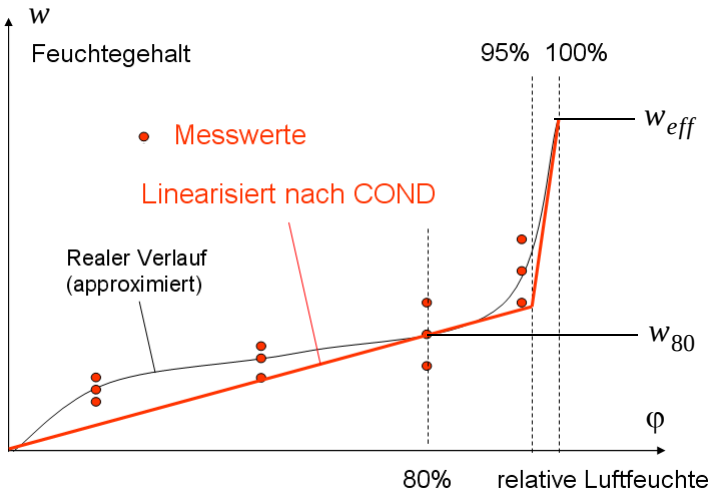

Abb. 2.3: Linearisierte Sorptionsisotherme

Feuchtetransport infolge Dampfdiffusion

Die Dampfdiffusionsstromdichte g_v im porösen Material hängt vom Dampfdruckgradienten innerhalb der Schicht und dem Dampfdiffusionskoeffizienten $D_v(\theta)$ des Materials sowie der spezifischen Gaskonstante R_V ab.

$$g_v = -\frac{D_v(\theta)}{R_v \cdot \theta} \cdot \frac{dp_v}{dx} \; i \qquad \textit{Dampfdiffusionsstromdichte in kg/m²·h} \qquad (2.11)$$

Die dimensionslose Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gibt das Verhältnis des Dampfdiffusionskoeffizienten in Luft $D_{v,\,air}(\theta)$ zu dem des Materials an.

$$\mu = \frac{D_{v,\,air}(\theta)}{D_v(\theta)} \qquad \textit{Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in -}$$

Definiert man die Dampfleitfähigkeit von Luft als temperaturunabhängige Konstante

$$\delta_{air} = \frac{D_{v,\,air}(\theta)}{R_v \cdot \theta} \cong 1,9 \times 10^{-10} \qquad \textit{Dampfleitfähigkeit von Luft in s}$$

ergibt sich die Dampfstromdichte im porösen Material zu

$$g_v = -\frac{\delta_{air}}{\mu} \cdot \frac{dp_v}{dx} \qquad \textit{Dampfstromdichte in kg/m}^2\textit{·s}$$

Feuchtetransport durch kapillare Leitung

Das Glaserschema basiert auf der konservativen Annahme, dass die Differenz zwischen den ein- und ausdiffundierenden Wasserdampfmengen vollständig als Tauwasser in den betreffenden Schichten ausfällt. Wenn es sich um poröse Materialien handelt, stellt sich parallel zum Wasserdampftransport ein kapillarer Flüssigwassertransport ein, der die Ansammlung von Kondensat verzögert und

die Austrocknung beschleunigt. Berücksichtigt man diesen Effekt in den Gleichungen, erhält man eine Reduktion der Kondensatmenge. Konstruktionen, welche beim Glaserschema als kritisch eingestuft wurden, könnten sich durch diese genauere Betrachtungsweise als praktikabel herausstellen.

Generell kann man dabei für eine Schicht folgende Fälle unterscheiden:

1. Die Schicht ist lediglich hygroskopisch durchfeuchtet, Wasser wird hauptsächlich durch Dampfdiffusion übertragen.
2. Die Schicht ist teilweise überhygroskopisch durchfeuchtet, der Feuchtetransport durch Dampfdiffusion und kapillare Leitung überlagern sich.
3. Die Schicht ist vollständig überhygroskopisch durchfeuchtet, Dampfstrom und Kapillarwasserstrom überlagern sich.
4. Die Schicht ist teilweise gesättigt, im gesättigten Bereich findet keine Dampfdiffusion statt.
5. Die Schicht ist vollständig gesättigt, es findet keine Dampfdiffusion statt.

Wird eine Schicht teilweise überhygroskopisch durchfeuchtet, stellt sich zusätzlich zum Dampfstrom auch ein Kapillarwasserstrom ein. Es bildet sich in Abhängigkeit der Materialparameter ein Feuchteprofil aus, welches nach hinreichend langer Zeit in den stationären Zustand übergeht und dann konstant bleibt.

Die Flüssigwasserstromdichte g_l nach Gleichung *(2.12)* ist abhängig vom Gradienten des Feuchtegehalts und der Flüssigwasserdiffusivität des Materials $D_l(w)$:

$$g_l = -\rho_w D_l(w) \cdot \frac{dw}{dx} \qquad \textit{Kapillarwasserstromdichte in kg/m}^2\textit{s} \qquad (2.12)$$

ρ_w ist dabei die Dichte des Wassers.

Wenn die relative Luftfeuchte an keinem Punkt der Konstruktion $\varphi = 95\%$ erreicht, sind alle Schichten der Konstruktion hygroskopisch durchfeuchtet. Im hygroskopischen Feuchtebereich dominiert die Dampfdiffusion. Die kapillare Leitung ist im hygroskopischen Bereich dagegen klein und kann vernachlässigt werden. Die Flüssigwasserdiffusivität $D_l(w)$ wird daher unterhalb des Feuchtegehalts w_{95} als Null angenommen. Die Kapillarwasserstromdichten g_l sind demnach gleich Null. Im überhygroskopischen Bereich wird der Verlauf der Flüssigwasserdiffusivität vereinfachend als lineare Funktion angenähert (siehe Abbildung 2.4). Für die Flüssigwasserdiffusivität gilt also Gleichung *(2.13)* in den jeweiligen Bereichen.

$$D_l(w) = \begin{cases} 0 & 0 \le w \le w_{95} \\ k_w \cdot (w - w_{95}) & w_{95} \le w \le w_{eff} \end{cases} \qquad (2.13)$$

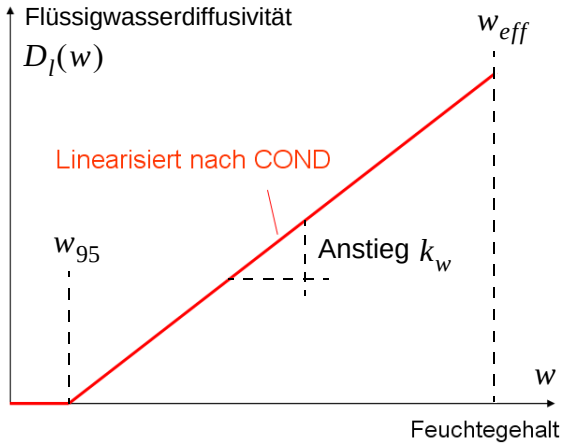

Abb. 2.4: Angenäherter Verlauf der Flüssigwasserdiffusivität

Dabei ist der Anstieg k_w ein Funktionsparameter, mit dem der Verlauf der Geraden angepasst werden kann. Die Steigung der Geraden wird aus dem Wasseraufnahmekoeffizient A_w und der Differenz zwischen Sättigungsgehalt w_{eff} und dem w_{95}-Wert berechnet (Nicolai 2002 und Häupl 2005). Die in *(2.14)* enthaltene Konstante 5×10^{-8} wurde durch Nachrechnung von Wasseraufnahmeexperimenten mehrerer Materialien mit Hilfe der Simulation und unter Verwendung von Gleichung *(2.13)* bestimmt.

$$k_w = 5 \times 10^{-8} \cdot \frac{A_w^2}{(w_{eff} - w_{95})^3} \qquad (2.14)$$

Der A_w-Wert, auch als W_w- (*DIN EN ISO 15148*) oder auch w-Wert (*DIN V 18550*) bezeichnet, wird durch ein Wasseraufnahmeexperiment bestimmt, bei dem die Unterseite einer trockenen Materialprobe dauerhaft mit Wasser benetzt wird. Er beschreibt die zeitabhängige Feuchteaufnahme des Probekörpers bei Wasserkontakt.

Berechnung der Tauwasser- und Verdunstungsmenge

Geht man davon aus, dass zu Beginn der Kondensationsperiode in der Kondensationsebene die Luftfeuchte noch nicht 100% erreicht hat, so kommt es noch nicht sofort zur Kondensation. Durch Dampfdiffusion erhöht sich der Feuchtegehalt in allen Schichten, bis in der Kondensationsebene 100% Luftfeuchte erreicht wurde. Durch den vereinfachten, linearen Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und relativer Luftfeuchte bzw. Dampfdruck nach Gleichung *(2.10)* lässt sich diese Erhöhung des Feuchtegehaltes auch durch die Änderung des Dampfdruckprofiles beschreiben. Diese Feuchtemenge wird innerhalb einer hygroskopischen Einstellzeit durch Dampfdiffusion in die Konstruktion transportiert.

In der Regel wird es von Interesse sein, die entstandene Kondensatmenge in der Konstruktion nach Ablauf einer gewählten Zeitspanne t_T zu beurteilen, während der ein konstantes Winterklima anliegt. Unter der Annahme, dass die Schichten

zu Beginn der Klimaperiode noch nicht durchfeuchtet (trocken) sind, wird die Konstruktion zunächst hygroskopisch aufgesättigt. Danach wird die Konstruktion im Kondensationsbereich nach und nach überhygroskopisch durchfeuchtet bis nach hinreichend langer Zeit ein stationärer Endzustand eintritt. Beschreibt man die Dynamik des Feuchtestransportes durch eine parabolische Differentialgleichung mit Speicher- und Transporttermen als Anfangs- und Randwertproblem, so erhält man die stationäre Lösung durch Null-setzen des Speicherterms. Unter dieser Voraussetzung läßt sich die Menge des Kondensats $m_{W,T,\infty}$ in kg/m^2 nach theoretisch unendlich langer Zeit bestimmen.

Von Interesse ist aber der Kondensationsfortschritt nach Ablauf der Zeitspanne t_T. COND berechnet daher die zu erwartende Kondensatmenge nach einer exponentiellen Aufladefunktion in Abhängigkeit der Zeit, welche den Feuchtezu- und -abtransport durch kapillare Leitung und Dampfdiffusion durch den Term $\Delta(g_l + g_v)$ in Gleichung *(2.15)* berücksichtigt.

$$m_{W,T}(t_T) = \left(1 - e^{-\frac{\Delta(g_l + g_v)}{m_{W,T,\infty}} \cdot t_T}\right) \cdot m_{W,T,\infty} \qquad (2.15)$$

Die COND-Berechnung liefert durch die Berücksichtigung des kapillaren Flüssigwassertransports eine im Vergleich zum Glaserschema kleinere Kondensatmenge. Damit steht ein Verfahren zur Verfügung, die Begrenzung der anfallenden Kondensatmenge durch die kapillaren Eigenschaften der Konstruktion nachzuweisen, auch wenn diese bei einer vergleichsweisen Berechnung nach dem Glaserschema als nicht zulässig einzustufen wäre.

Der die Austrocknung beschleunigende Effekt der kapillaren Trocknung kann in der Verdunstungsperiode auch mit berücksichtigt werden; er wird jedoch bei fortschreitender Austrocknung und dem damit abnehmenden Feuchtegradienten stets kleiner. Die Flüssigwasserstromdichte wird sehr schnell klein gegenüber der Dampfstromdichte und trägt somit nur sehr wenig zum Trocknungsprozess bei. Daher kann dieser Effekt im Allgemeinen vernachlässigt werden. Da sich die Zeit zum Austrocknen der Konstruktion rechnerisch verlängert, liefert die Berechnung ohne kapillare Trocknung stets eine auf der sicheren Seite liegende Aussage.

$$m_{W,T} = (g_{v,i} + g_{v,e}) \cdot t_V \qquad (2.16)$$

Die Verdunstungsperiode wird analog zum Glaser-Verfahren mit $t_V = 90d$ *angesetzt*. Der Trocknungsvorgang wird damit im Sinne des Glaserverfahrens bewertet werden.

2.4 Simulationsprogramm DELPHIN

2.4.1 Einführung

Die Modellierung der physikalischen Prozesse und die Entwicklung der modernen Rechentechnik erlauben es, mittels Feuchte- und Wärmetransportprozessen aus Software-Simulationsrechnungen quantitative Aussagen zum hygrisch-thermischen Verhalten von Gebäuden unter natürlichen Klimabedingungen zu treffen. Das Programm DELPHIN 4 (*Grunewald 1997*) wurde beispielsweise zur Entwicklung der kapillaraktiven Innendämmung von Fassaden erhaltenswürdiger historischer Bauwerke eingesetzt (Forschungsprojekt INSUMAT im 5. Rahmenprogramm der EU, *Grunewald et al. 2004*). Die neuere Version DELPHIN 5 (*Nicolai 2007*) wurde, basierend auf der Vorgängerversion DELPHIN 4, seit 2002 kontinuierlich verbessert und erweitert. Zur Simulation der Konstruktionen im Feuchteatlas-Projekt fanden beide Versionen Anwendung, daher wird im Weiteren nicht explizit nach Versionen unterschieden.

Was berechnet DELPHIN?

Das DELPHIN-Programm verwendet das Modell des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Lufttransports in kapillarporösen Baustoffen. Das bedeutet, es lassen sich die folgenden Transportprozesse durch die Lösung von Bilanzgleichungen numerisch analysieren:

- **Wärmetransport** durch Bauteile und in Konstruktionsdetails (z.B. Wandaufbauten, Wärmebrücken, Anschlussdetails),
- **Feuchtetransport** (Flüssigkeits- und Dampftransport) sowie Feuchtespeicherung in Konstruktionen zum Nachweis der Dauerhaftigkeit (Vermeidung von Feuchteschäden etc.), DELPHIN 5 enthält auch ein Modell zur Berechnung des Salztransportes und der Salzkristallisation,
- **Lufttransport** (Strömung feuchter und warmer Luft durch offenporige Bauteile und Undichtigkeiten, Kondensation in kälteren Zonen).

Die Rechnungen können eindimensional erfolgen (z.B. zur Analyse eines ungestörten Wandquerschnittes), aber auch zweidimensionale Schnitte durch Konstruktionsdetails können überprüft werden. Damit lassen sich z.B. die Auswirkungen von Wärmebrücken auf das Feuchteverhalten an Fensteranschlüssen bewerten. Für radialsymmetrische Geometrien und Randbedingungen sind auch dreidimensionale Berechnungen möglich. Die Berechnungen erfolgen ortsaufgelöst, d.h. durch Diskretisierung wird ein Netz von Volumenelementen erzeugt. Während der Simulation werden die Zustandsvariablen Temperatur, Wassergehalt und Luftdruck von jedem Volumenelement für jeden Zeitschritt neu ermittelt. Daraus lassen sich alle hygrothermisch relevanten Größen, wie Feuchte- und Wärmeströme, als integrale Werte und Einzelgrößen bestimmen.

In der Berechnung werden natürliche Klimabedingungen in detaillierter Form zu Grunde gelegt, d.h. die Klimakomponenten

- Temperatur, relative Luftfeuchte,
- Sonneneinstrahlung (Licht- und Wärmestrahlung) und
- Niederschlag, Windrichtung und -geschwindigkeit

kommen als Jahresverläufe auf Stundenbasis zur Anwendung. Natürlich können auch DIN-Referenzbedingungen oder beliebige selbstdefinierte Klimabedingungen angelegt werden. Die Klimadatensätze werden normalerweise in Form von Testreferenzjahren (TRY) bereitgestellt, die dann zyklisch Anwendung finden können. Testreferenzjahre sind Daten einer Klimazone, die aus einem längeren Beobachtungszeitraum zu einem für die betreffende Klimazone charakteristischen Jahr zusammengestellt wurden.

Wer benutzt das Programm?

Das DELPHIN Simulationsprogramm ist vorrangig ein Werkzeug für die Forschung und die Lehre. DELPHIN wird weltweit von Forschungsinstituten für Berechnungen von unterschiedlichsten hygrothermischen Problemstellungen verwendet. Das thermodynamische State-of-the-Art-Modell, das der Berechnung zugrunde liegt, und die freie Einstellbarkeit praktisch aller physikalischen Parameter und Randbedingungen machen das Programm auch für den spezialisierten Bauphysiker und für die Ausbildung junger Ingenieure und Architekten geeignet.

Programm-komponenten

Das DELPHIN-Programmpaket besteht aus einem Nutzerinterface (Eingabeoberfläche), einem Solver (Berechnungsmodul) und einem Postprocessing-Werkzeug zur Visualisierung der Ergebnisdaten. Angeschlossen sind Datenbanken für Klima- und Materialdatensätze. Die interaktive Projekterstellung ermöglicht eine schnelle Generierung der zu berechnenden Konstruktion und eine Definition sowie die Zuordnung der Datensätze für Randbedingungen und Materialien. Klimadatensätze und Materialdatensätze können aus den Datenbanken importiert werden.

Die Grafikausgabe erlaubt die Darstellung der Ergebnisse mit nützlichen, anschaulichen Funktionen wie zweidimensionalen farbigen Image- und Konturplots, Orts- und Zeitschnitten und einer Nach- und Weiterbearbeitung der Daten. Physikalische Einheiten, Achsenskalierungen, beliebige Wahl der Darstellungsausschnitte etc. sind integriert. Auch eine zeitaufgelöste Darstellung als Film und Export von Grafikformaten zur Einbettung in andere Programme (Textverarbeitung o.ä.) sind möglich. Die grafische Auswertung der Ergebnisse kann sowohl während der Berechnung als auch nachträglich erfolgen.

Die Materialeigenschaften werden in DELPHIN als Materialfunktionen berücksichtigt. In der Materialdatenbank sind Daten enthalten, die am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor gemessen wurden. Enthalten sind gängige Massiv- und Holzbaustoffe, Mörtel, Dämmstoffe, Abdichtungs- und Oberflächensysteme.

2.4.2 Theoretische Grundlagen

Bilanzgleichungen und numerische Lösung

Die dem Programm DELPHIN zugrunde liegende Theorie ist abgeleitet von thermodynamischen Prinzipien, welche die Speicher- und Transportprozesse sowie die Übergänge zwischen den Phasen (flüssig und gasförmig) beschreiben. Das Modell beinhaltet den porösen Baustoff selbst, die flüssige Phase mit absorbiertem Wasser und die gasförmige Phase, bestehend aus einem Gemisch aus trokkener Luft und Wasserdampf. Dabei werden die Bilanzgleichungen für flüssiges und gasförmiges Wasser addiert und man erhält eine Feuchtemassenbilanz, die durch eine Bilanz der inneren Energie und eine Luftmassenbilanz komplettiert wird. Daraus ergibt sich ein System von parabolischen Differentialgleichungen, aus dessen Lösung die instationären Variablen Wassergehalt, Temperatur und Gasdruck als Zustandsfelder berechnet werden.

Die numerische Lösung des parabolischen Differentialgleichungssystems beginnt mit der Semidiskretisierung des Ortes. Nach Vorgabe der Anfangswerte und Randbedingungen erfolgt die zeitliche Integration mit Hilfe geeigneter mathematischer Solver (CVODE, *Cohen und Hindmarsh, 1996*), wobei verschiedene Mehrschrittverfahren zum Einsatz kommen.

Vereinfachungen und Einschränkungen

Obwohl das DELPHIN-Modell als sehr detailliert bezeichnet werden kann, beinhaltet es eine Reihe von Idealisierungen, wodurch sich das ursprüngliche Modell erheblich vereinfachen lässt.

Untergeordnete Effekte, die vernachlässigt werden:

- Thermodiffusion, Diffusionsthermik (Dufour und Soret-Effekte) und die Produktion innerer Energie infolge Kompression und Reibung,
- Wirkung elektrischer Felder (Schwerkraft wirkt als einzige Volumenkraft),
- turbulente Strömungen, die Flüssigphase (Kapillarwasser) und die Gasphase bewegen sich ausschließlich laminar durch das Porensystem,
- zeitliche Änderung des Luftdruckfeldes innerhalb eines vorgebbaren Zeitschrittes (Größenordnung 1-10 min), der Luftdruckausgleich in der Gasphase vollzieht sich so schnell, dass eine stationäre Lösung des Druckfeldes innerhalb dieses Zeitschrittes hinreichende Genauigkeit liefert.

Einschränkungen, dem Stand der Modellentwicklung entsprechend:

- es sind nur laminare Luftströmungen durch Hohlräume (Fugen, Spalten, baukonstruktive kleinere Lufthohlräume) zugelassen,
- zwischen den Phasen herrscht in jedem diskretisierten Volumenelement thermodynamisches Gleichgewicht, d.h. gleiche Temperatur (z.B. bei Durchströmung), gleicher Druck und Verdunstungsgleichgewicht,
- die Hysterese der Feuchtespeicherfunktion wird vernachlässigt,
- die Materialeigenschaften sind in jedem diskretisierten Volumenelement homogen,
- die Transporteigenschaften sind isotrop, keine Richtungsabhängigkeit.

Die Einschränkungen, besonders die letzten drei mit Bezug auf die Materialei-

genschaften, müssen als relevant eingestuft werden und sind derzeit Gegenstand der Forschung. Die Implementierung geeigneter Modelle ist geplant beziehungsweise wird daran gearbeitet.

Transport-koeffizienten

Das System der Bilanzgleichungen (*Grunewald & Häupl 2003*) wird durch konstitutive Gleichungen ergänzt, welche die konvektiven und diffusiven Flüsse mit den Gradienten der Zustandsvariablen (Konzentrationen, Drücke und Temperaturen) mittels Transportkoeffizienten verknüpfen. Die konstitutiven Gleichungen *(2.17)* bis *(2.20)* sind als Definitionsgleichungen der Transportkoeffizienten anzusehen. Die Gradienten der Zustandsvariablen sind den Flüssen als thermodynamische Kräfte zugeordnet. Die additiven Dichteterme beschreiben die Wirkung der Schwerkraft auf die Flüssig- und Gasphase. Eine Ableitung dieser Zuordnungen kann auf phänomenologischem Wege erfolgen, indem man den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik mit der GIBBS-schen Fundamentalgleichung für alle beteiligten Phasen des Systems verknüpft (*Grunewald 1997*). Die Symbolik folgt im Weiteren der Nomenklatur in (*Bear & Bachmat 1991)*, da diese auf die Beschreibung von Multiphasensystemen ausgelegt ist:

$$j^{m_l}_{k,\,conv} = -K_l(\theta_l)\left[\frac{\partial p_l}{\partial x_k} + \rho_l g_k\right] \qquad \textit{Flüssigwassertransport (Kapillardruckmodell)}$$

$$= -\rho_l D_l(\theta_l)\left[\frac{\partial \theta_l}{\partial x_k}\right] \qquad \textit{(Diffusionsmodell)} \qquad (2.17)$$

$$j^{m_v}_{k,\,diff} = -\frac{D_v(\theta_l, T)}{R_v T}\frac{\partial p_v}{\partial x_k} \qquad \textit{Dampfdiffusion} \qquad (2.18)$$

$$j^{m_g}_{k,\,conv} = -K_g(\theta_l)\left[\frac{\partial p_g}{\partial x_k} + \rho_g g_k\right] \qquad \textit{Luftströmung} \qquad (2.19)$$

$$j^{Q}_{k,\,diff} = -\lambda(\theta_l)\frac{\partial T}{\partial x_k} \qquad \textit{Wärmeleitung} \qquad (2.20)$$

p_l	Druck in Flüssigphase in Pa
p_v	Wasserdampfpartialdruck in Pa
p_g	Wasserdampfpartialdruck in Pa
T	Temperatur in K
R_v	Spezifische Gaskonstante Wasserdampf in J/kgK
θ_l	Volumetrischer Wassergehalt in m³/m³
ρ_l	Dichte der Flüssigphase in kg/m^3
ρ_g	Dichte der Gasphase in kg/m^3
g_k	Gravitationskonstante in m/s^2

x_k	Ortskoordinaten (x_1=x, x_2=y, x_3=z) in m

Die Transportkoeffizienten lauten dann:

$K_l(\theta_l)$	Flüssigwasserleitfähigkeit in s
$D_l(\theta_l)$	Flüssigwasserdiffusivität in m^2/s
$D_v(\theta_l, T)$	Wasserdampfdiffusionskoeffizient in m^2/s
$K_g(\theta_l)$	Gaspermeabilität in s
$\lambda(\theta_l)$	Wärmeleitfähigkeit in W/mK

Die Transportkoeffizienten werden als feuchteabhängige Materialfunktionen aufgefasst. Sie werden durch Anwendung eines Materialmodells aus den im Labor messbaren Größen abgeleitet und mit Hilfe von Laborexperimenten kalibriert. Die Feuchtespeicherfunktion komplettiert das Set der Materialfunktionen.

2.4.3 Materialfunktionen und -parameter

Feuchte-speicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion ist eine zentrale Materialfunktion, die aus der Kombination von Sorptionsisotherme und Saugspannungskurve dargestellt werden kann (siehe Abbildung 3.8). Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt die Speicherung von Wasser im kapillarporösen Material in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bzw. dem Kapillardruck.

Die Feuchtespeicherfunktion steht mit der Porenvolumenverteilungskurve, dem „Fingerabdruck“ des Materials, in enger Beziehung (Abbildung 2.5 oben). Es ist zweckmäßig, die mathematische Formulierung der Feuchtespeicherfunktion aus der Porenvolumenverteilungskurve abzuleiten. Eine passende analytische Form der differentiellen Porenvolumenverteilungskurve, die sich leicht an Messwerte approximieren lässt, ist durch Gleichung *(2.21)* gegeben. Dazu werden GAUSS-normalverteilte Porenvolumina auf der logarithmischen Radius-Skala vorausgesetzt. Eine schematische Darstellung der differentiellen und integralen Porenvolumenverteilungskurve und eine Deutung der Formparameter sind in Abbildung 2.5 gegeben.

$$\frac{d\theta}{d\log(R)}(R) = \sum_{k=1}^{N}\left[\frac{W_k}{\sqrt{2\pi}S_k}\exp\left(-\frac{[\log(R)-\log(R_k)]^2}{2\cdot S_k^2}\right)\right] \qquad (2.21)$$

N	Modalität (Anzahl der Peaks im Porenspektrum)
θ	Porenvolumen (bezogen auf Gesamtvolumen) in m^3/m^3
R	Äquivalenter Porenradius in m
W_k, S_k, R_k	Formparameter zur Approximation von Messwerten

$$\theta_l(p_c) = \sum_{k=1}^{N} \left[\frac{W_k}{2} \left(1 + erf\left(\frac{pC_k - pC}{\sqrt{2} S_k} \right) \right) \right] \qquad (2.22)$$

mit $\quad pC = log(p_c) = log(2\sigma_l) - log(R)$

$$\theta_{eff} = \sum_{k=1}^{N} \theta_k \quad \text{und} \quad \theta_k = W_k \cdot \theta_{eff}$$

Die Feuchtespeicherfunktion *(2.22)* erhält man durch Integration obiger Gleichung *(2.21)* über den gesamten Porenbereich. Dem liegt die Vorstellung zu Grunde, dass sich das Porenvolumen bei Anliegen des Druckgleichgewichts sukzessive mit Wasser füllt (der volumetrische Wassergehalt θ_l tritt an die Stelle des Porenvolumens θ). Dabei füllen sich zuerst die kleinsten Poren und danach schrittweise immer größere. Der Betrag der Kapillarspannung p_c nimmt mit zunehmendem Porenradius R ab. Die Beziehung zwischen Kapillarspannung und Porenradius lässt sich mit Hilfe eines Kräftegleichgewichts am Kapillarmeniskus und der Oberflächenspannung des Wassers σ_l ableiten.

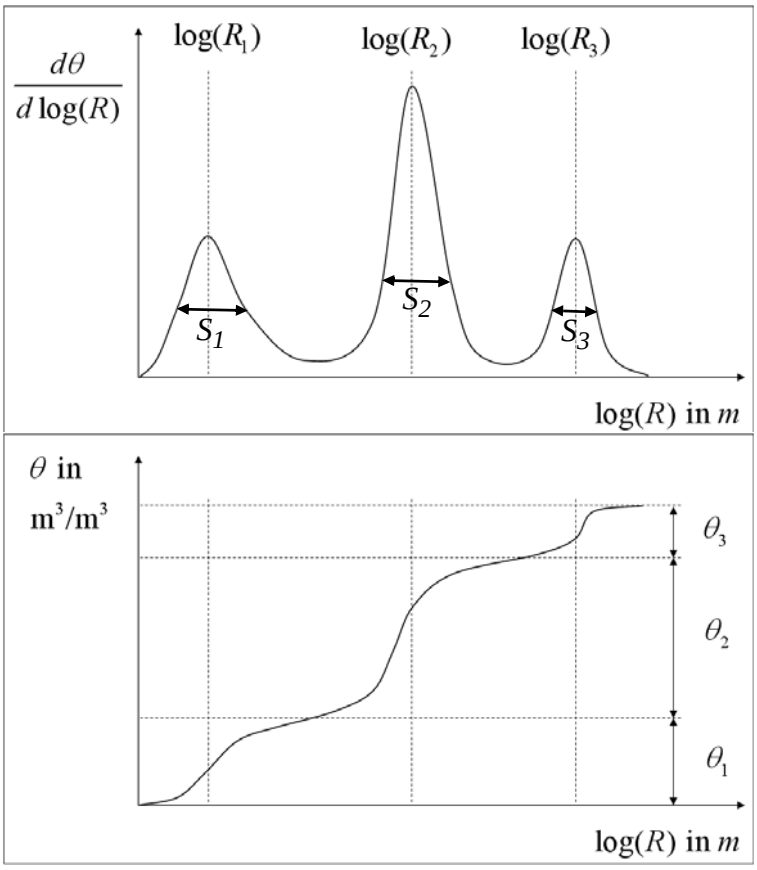

Abb. 2.5: Schematische Darstellung einer dreimodalen differentiellen und integralen Porenvolumenverteilungskurve und ihrer eingehenden Formparameter; oben die drei Porenmaxima R_1 bis R_3, übliche Baustoffe besitzen ein bis zwei Maxima

Den Zusammenhang zwischen Feuchtespeicherfunktion und Porenvolumenverteilungsfunktion stellen zwei charakteristische Parameter her, die experimentell bestimmt werden müssen:

Effektive und kapillare Sättigung

- Die effektive Sättigung θ_{eff} bezeichnet das Porenvolumen, das ohne Einsatz von destruktivem Druck mit Flüssigwasser gefüllt werden kann. Geschlossene Poren, die nicht im Austausch mit der Umgebung stehen, sind davon ausgeschlossen.
- Die kapillare Wassersättigung θ_{cap} wird durch kurzzeitige druckfreie Wasseraufnahme (kapillares Saugen) bestimmt. Die kapillare Wassersättigung markiert das Ende der ersten intensiven Phase des Wasseraufnahmeexperiments (s. u. Wasseraufnahmekoeffizient und Sättigungsleitfähigkeit).

Da Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge unterschiedlich ablaufen können, kann man bei der Feuchtespeicherfunktion zwischen einer Befeuchtungs- und einer Trocknungskurve unterscheiden. Da eingangs Hysterese als Prozess ausgeschlossen wurde, wird hier vorausgesetzt, dass Befeuchtungs- und Trocknungsvorgänge nach einer einheitlichen Feuchtespeicherfunktion ablaufen. Damit sich die Ergebnisse der Simulationen auf der sicheren Seite befinden, wurde in den Berechnungen die Desorptionskurve verwendet. So wird immer mit dem maximalen Feuchtegehalt, und damit auch mit der maximalen Feuchtemenge gerechnet.

Die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion erfolgt im bauphysikalischen Labor. Dabei kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz, um den gesamten Feuchtebereich erfassen zu können (Abbildung 2.6). Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich im Regelfall aus mehreren Messpunkten im hygroskopischen Bereich (Sorptionsisotherme oder Feuchtespeicherisotherme bis ca. 95% relativer Luftfeuchte, siehe *DIN EN ISO 12571*) und im überhygroskopischen Bereich (Saugspannungskurve ab ca. 95% relativer Luftfeuchte, siehe *DIN ISO 11274*) zusammen.

Abb. 2.6: Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion (links: Exsikkatoren zur Messung der Sorptionsisotherme, rechts: Druckplattenapparate zur Bestimmung der Saugspannungskurve) am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor der TU Dresden

Flüssigwasserleitfähigkeit

In verschiedenen Wissenschaftsgebieten – wie in der Hydrodynamik, der Bodenkunde und auch in der Bauphysik – wird die differentielle Porenvolumenverteilung benutzt, um die Flüssigwasserleitfähigkeit $K_l(\theta_l)$ poröser Stoffe in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Porenstruktur zu berechnen. In einer Reihe von wissenschaftlichen Beiträgen wurden Porenmodelle veröffentlicht (*Burdine 1953, Mualem 1976, Neiß 1982* und *Carmeliet & Roels 2001*), die sich im Wesentlichen durch die verwendete Porengeometrie und die Kopplungsbedingungen zwischen unterschiedlichen Porenklassen unterscheiden.

Die Verwendung der differentiellen Porenvolumenverteilung (PVV) führt oft zu einer Überschätzung, manchmal auch zu einer Unterschätzung der gesuchten Flüssigwasserleitfähigkeit. Es ist deshalb vorteilhaft, die aus dem Modell abgeleitete Leitfähigkeit $K_{l,\,PVV}(\theta_l)$ bei kapillarer Sättigung zu normieren und damit eine relative Flüssigwasserleitfähigkeit $K_{l,\,rel}(\theta_l)$ zu definieren. Der verbleibende Fehler ist durch die Nach-Simulation geeigneter Laborexperimente und Anpassung von offenen Parametern zu minimieren (Kalibrierung des Materialmodells, *Scheffler 2008*).

$$K_{l,\,rel}(\theta_l) = \frac{K_{l,\,PVV}(\theta_l)}{K_{l,\,PVV}(\theta_{cap})} \qquad (2.23)$$

Die Kurve der relativen Flüssigwasserleitfähigkeit wird dann mit dem experimentell bestimmten Wert der Flüssigwasserleitfähigkeit bei kapillarer Sättigung (Sättigungsleitfähigkeit) $K_{cap} = K_l(\theta_{cap})$ multipliziert und man erhält die Funktion der Flüssigwasserleitfähigkeit *(2.24)* nach dem Kapillardruckgradientenmodell.

$$K_l(\theta_l) = K_{l,\,rel}(\theta_l) \cdot K_{cap} \qquad (2.24)$$

Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient A_w (*DIN 15148*) ist der Anstieg der Kurve der kapillaren Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit während der ersten intensiven Phase des Wasseraufnahmeexperiments.

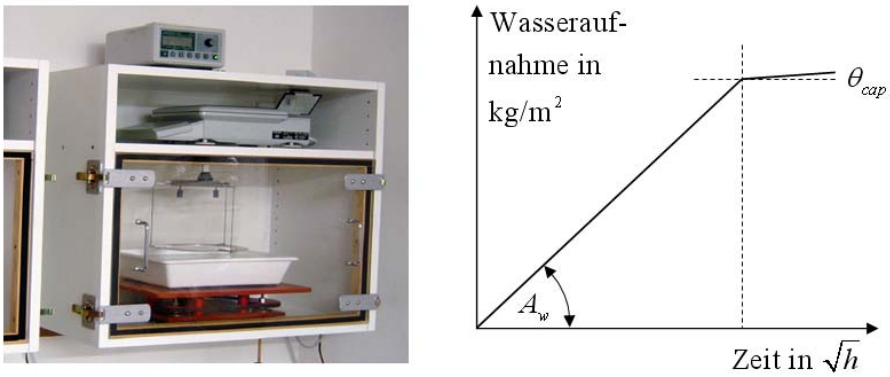

Abb. 2.7: Automatisierte Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (links: Probenhalter mit Waage, rechts: schematischer Kurvenverlauf) am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor

Sättigungs-leitfähigkeit

Die experimentelle Bestimmung der Sättigungsleitfähigkeit erfolgt mit Hilfe des Wasseraufnahmekoeffizienten A_w. Es liegt nahe, dass sich ein funktionaler Zusammenhang zwischen Sättigungsleitfähigkeit und dem Wasseraufnahmekoeffizienten darstellen lässt, der in recht einfacher Form geschrieben werden kann.

$$K_{cap} = k_w \cdot A_w^2 \qquad (2.25)$$

A_w Wasseraufnahmekoeffizient in kg/m^{2}h$^{0.5}$

k_w interner Parameter, materialabhängig, wird durch Simulation des Wasseraufnahmeexperiments bestimmt

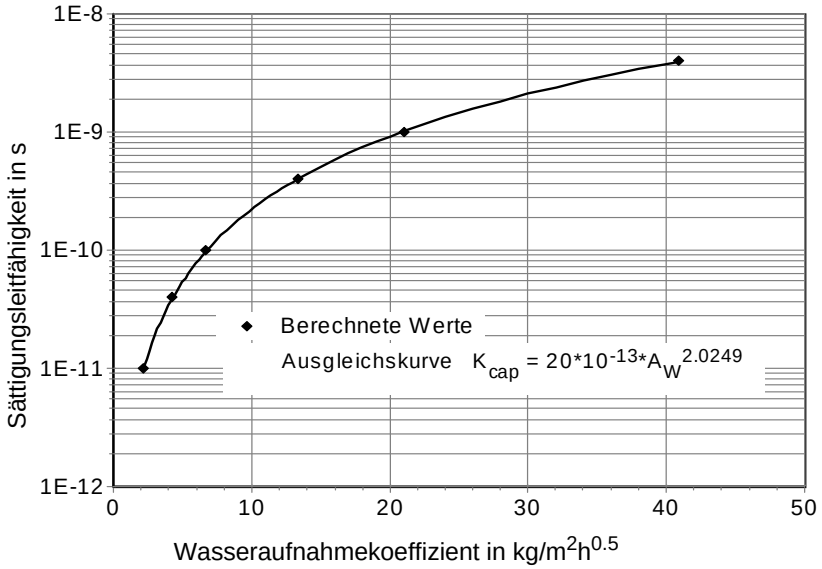

Abb. 2.8: Zusammenhang zwischen Sättigungsleitfähigkeit und Wasseraufnahmekoeffizient für ein Testmaterial

Die Beziehung nach Gleichung *(2.25)* konnte durch numerische Simulation bestätigt werden, wobei das Wasseraufnahmeexperiment für mehrere unterschiedliche Materialien mit verschiedenen Sättigungsleitfähigkeiten über einem realistischen Wertebereich simuliert wurde. Aus den resultierenden Wasseraufnahmekurven wurden die Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt. Die Ausgleichskurve ist für ein Material in Abbildung 2.8 beispielhaft dargestellt.

Flüssigwasser-diffusivität

Formal lässt sich die Flüssigwasserdiffusivität aus der Flüssigwasserleitfähigkeit ableiten, was unter Vernachlässigung der Schwerkraft und des Luftdruckeinflusses allerdings die Kenntnis der Ableitung der Umkehrfunktion der Feuchtespeicherfunktion notwendig macht.

$$\rho_l \cdot D_l(\theta_l) = \frac{\partial p_c}{\partial \theta_l} K_l(\theta_l) \qquad (2.26)$$

Die Ableitung lässt sich nur als eindeutige Funktion definieren, wenn die Originalfunktion eindeutig ist. Das ist der Fall, wenn Hysterese ausgeschlossen wird. Mit einer prozessabhängigen Feuchtespeicherfunktion lässt sich keine Beziehung zwischen Flüssigwasserdiffusivität und Flüssigwasserleitfähigkeit mehr herstellen. Deshalb erfolgt die Bestimmung der Flüssigwasserdiffusivität ebenfalls mit Hilfe des Wasseraufnahmeexperiments und durch Anpassung mit analytischen Funktionsansätzen (*Künzel 1994, Scheffler 2008*).

Wasserdampfdiffusionskoeffizient

Die Diffusion von Wasserdampf in einem kapillarporösen Material bei Ausgleichsfeuchte unterscheidet man von der Diffusion von Wasserdampf in Luft durch die Einführung des Diffusionswiderstandsfaktors μ_{dry}, den das Material durch seine Porenwindungen und -verengungen mit sich bringt und durch die Feuchteabhängigkeit des Dampfdiffusionskoeffizienten.

$$D_v(\theta_l, T) = \frac{D_{v,\,air}(T)}{\mu_{dry}} \cdot \frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}} \qquad (2.27)$$

$D_{v,\,air}(T)$ Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft in m^2/s als temperaturabhängige Funktion nach *Schirmer 1938*

$\frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}}$ Lineare Abnahme des Dampfdiffusionsflusses mit zunehmendem Feuchtegehalt nach dem Parallelmodell *Grunewald & Häupl 2002*

Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor

Der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ_{dry} des Materials erfasst den Einfluss von Porosität und Tortuosität des Materials und wird bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 25% gemessen. Ein trockenes Material hat einen μ_{dry}-mal höheren Dampfdiffusionswiderstand als ruhende Luft.

Obiger Gleichung *(2.27)* liegt die Annahme einer Adsorbatschicht mit höherer Bindungsenergie (nicht-gefrierbares Wasser) zu Grunde. Diese Schicht ist fest an die Oberfläche gebunden. Im Gegensatz dazu ist die multimolekulare Belegung der Porenwände bei höheren Feuchtegehalten relativ leicht beweglich. Der Übergang von mono- zu multimolekularer Belegung der Porenwände findet bei ca. 20 - 30% relativer Luftfeuchte statt.

Bei höheren relativen Umgebungsluftfeuchten erhöht sich auch nach hinreichend langer Zeit die relative Luftfeuchte im luftgefüllten Teil des Porensystems, bis sie gleich der Umgebungsluftfeuchte ist. Es findet in den Poren Kapillarkondensation statt, d.h. es kondensiert Wasserdampf und bildet, in den Mikroporen beginnend, Flüssigwasserinseln. Bei weiterer Erhöhung der relativen Luftfeuchte vergrößern sich die Flüssigkeitsinseln und können dadurch eine zusammenhängende Flüssigphase bilden. Dann dominiert der kapillare Flüssigkeitstransport und die Dampfdiffusion nimmt mit zunehmendem Flüssigkeitsgehalt durch Reduktion des zur Verfügung stehenden Diffusionsquerschnittes ab.

Abb. 2.9: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionskoeffizienten (links: Behälter zur Probeninstallation im Klimaschrank, rechts: Klimaschränke) am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor

Luftpermeabilität

Die Strömung von Luft durch ein kapillarporöses Material wird mit Hilfe der wassergehaltsabhängigen Permeabilitätsfunktion beschrieben. Der Parameter $K_{g,\,dry}$ gibt die Gaspermeabilität des trockenen Materials an und wird durch die Porosität des Materials bestimmt.

$$K_g(\theta_l) \;=\; K_{g,\,dry} \cdot \frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}} \qquad (2.28)$$

$\frac{\theta_{eff} - \theta_l}{\theta_{eff}}$ Lineare Abnahme des Luftmassenstroms mit zunehmendem Feuchtegehalt

Luftpermeabilitätskoeffizient

Der Luftpermeabilitätskoeffizient $K_{g,\,dry}$ erfasst beim Anliegen einer Luftdruckdifferenz die Luftdurchlässigkeit des trockenen Materials. Er kann mit Hilfe eines Perm-Porometers gemessen werden, welches den Durchfluss als Funktion der anliegenden Druckdifferenz bestimmt.

Abb. 2.10: Bestimmung des Luftpermeabilitätskoeffizienten durch ein Perm-Porometer am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor

Die Gleichung *(2.28)* geht von der Annahme aus, dass sich der Luftvolumenstrom durch das Porensystem proportional zur aufgebrachten Druckdifferenz verhält. Diese Annahme konnte durch Messungen im Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor des IBK weitgehend bestätigt werden. Lediglich für kleine Druckdifferenzen wurde eine Abweichung vom linearen Gesetz festgestellt.

Wärmeleitfähigkeit

Der Transport von Wärme in einem kapillarporösen Baustoff kann verschiedene physikalische Ursachen haben. Dazu zählen die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung, durch Strahlung (langwellig) und der Enthalpietransport (Latentwärme und sensible Wärme). Der Enthalpietransport wird im Modell als separater Fluss beschrieben, benötigt daher keinen eigenen Transportkoeffizienten. Die Wärmeleitungs- und Strahlungsvorgänge werden durch die Wärmeleitfähigkeitsfunktion $\lambda(\theta_l)$ erfasst, welche die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitung beschreibt. Gleichung *(2.29)* ist unter der Voraussetzung gültig, dass sich die Wärmeströme durch die Feststoffmatrix und durch den Porenraum (gasgefüllt oder wassergefüllt) als parallele Ströme modellieren lassen. Ersetzt man im Porensystem zunehmend Luft durch Wasser, ergibt sich damit eine lineare Funktion mit den beiden Parametern λ_{dry} und λ_l.

Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes

Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes λ_{dry} schließt alle Wärmetransportprozesse ein, die dem Temperaturgradienten folgen. Dazu gehören die Wärmeleitung im Feststoff und in der Gasphase, ein konvektiver Anteil durch Luftbewegung in geschlossenen Poren sowie der Anteil der inneren Wärmestrahlung.

$$\lambda(\theta_l) = \lambda_{dry} + \lambda_l \cdot \theta_l \qquad (2.29)$$

λ_l Feuchteabhängiger Anstieg der Wärmeleitfunktion in W/(mK), entspricht der Wärmeleitfähigkeit der Flüssigphase. Wenn die Flüssigphase nur aus Wasser besteht, ist λ_l = 0,6 W/mK

In obiger Gleichung *(2.29)* stellt λ_{dry} den Wärmeleitfähigkeitswert dar, wie er beispielsweise mit Hilfe einer Plattenapparatur (Abbildung 2.11) bestimmt werden kann. In der Praxis werden dagegen feuchtebeaufschlagte Rechenwerte der Wärmeleitfähigkeit λ_R verwendet, die auch in den einschlägigen Normen verzeichnet sind. Für die Anwendung von λ_R-Werten in der Simulation sind zumindest für Dämmstoffe die λ_R-Werte auf die λ_{dry}-Werte umzurechnen. Eine Möglichkeit dazu besteht in der Zuordnung eines Feuchtegehalts zum λ_R-Wert. Dafür bietet sich der praktische Feuchtegehalt bei einer relativen Luftfeuchte von 80% an: $\lambda(\theta_l = \theta_{80}) = \lambda_R$.

$$\lambda_{dry} = \lambda_R - \lambda_l \cdot \theta_{80} \qquad (2.30)$$

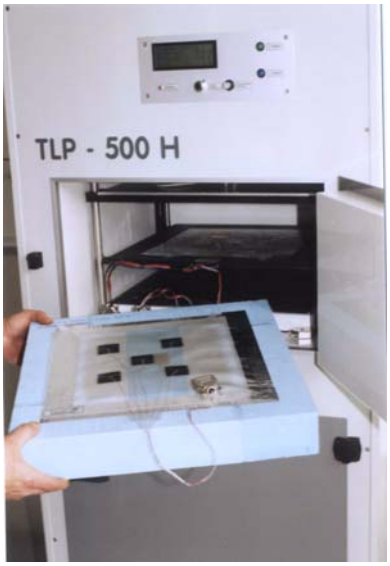

Abb. 2.11: Technologie zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (Foto: FH Lausitz)

2.4.4 Kalibrierung des DELPHIN-Materialmodells

Die oben definierten Basismaterialparameter des DELPHIN-Modells sind:

- die effektive Sättigung θ_{eff},
- die kapillare Wassersättigung θ_{cap},
- der Wasseraufnahmekoeffizient A_w,
- der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor μ_{dry},
- der Gaspermeabilitätskoeffizient K_g und
- die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes λ_{dry}.

Um das Set zu komplettieren, kommen noch hinzu:

- die Rohdichte ρ und
- die spezifische Wärmekapazität c .

Stehen alle Basismaterialparameter des DELPHIN-Materialmodells zur Verfügung, können die Materialfunktionen für die Transport- und Speichervorgänge generiert werden. Diese Prozedur wird als Kalibrierung des Materialmodells bezeichnet und umfasst folgende Teilschritte:

1. Approximation der gemessenen Feuchtegehalte der Sorptionsisotherme und Saugspannungskurve durch die multimodale GAUSS-Funktion nach Gleichung *(2.22)*,
2. Simulation des Wasseraufnahmeexperiments zur Bestimmung des internen Parameters k_w nach Gleichung *(2.25)*,
3. Simulation des Trocknungsexperiments unter Einbezug zusätzlicher μ-Werte (wenn gemessen) zur Feinjustierung der relativen Flüssigwasserleitfähigkeit nach Gleichung *(2.23)* im ungesättigten Feuchtebereich.

Nach ausreichender Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulationsergebnis wird das kalibrierte Set der Materialfunktionen in die Materialdatenbank übernommen und steht für die Verwendung in Simulationen zur Verfügung. Eine ausführliche Beschreibung des Kalibrierungsverfahrens liegt in *Scheffler 2008* vor.

Bei den im Feuchteatlas verwendeten Materialien handelt es sich überwiegend um Datensätze, die im Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor des Instituts für Bauklimatik gemessen und kalibriert wurden. Für einige Materialien wurde auch auf die MASEA-Datenbank (Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung) zurückgegriffen. Eine Zusammenstellung aller Materialien und ihrer hygrothermischen Basisparameter befindet sich im Anhang.

2.5 Zusammenstellung der Materialparameter

Vergleicht man die Ergebnisse nach dem DIN, COND und DELPHIN-Verfahren, muss man beachten, dass einerseits die (nicht) berücksichtigten Prozesse eine Rolle spielen, andererseits aber auch eine Schwierigkeit darin besteht, dass die Bedeutung der Materialparameter nicht in jedem Fall identisch ist. Eine Ursache dafür lässt sich auf die unterschiedlichen Funktionsansätze (konstant, linearisiert, beliebig) für die Transport- und Speicherkoeffizienten zurückführen. Eine andere Ursache liegt in der Bedeutung der Parameter, die teilweise die Gefahr der Verwechslung in sich birgt. Deshalb sind hier die verwendeten Materialkennwerte der Verfahren und deren Bedeutungen noch einmal in einer Übersicht zusammengestellt (Tabelle 2.3).

Tab. 2.3: Übersicht zu den verwendeten Materialkennwerten

	DIN	COND	DELPHIN
Wärmeleitfähigkeit	Rechenwert λ_R mit Feuchtezuschlag als konstante Wärmeleitfähigkeit	Rechenwert λ_R mit Feuchtezuschlag als Parameter der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit	Wert des trockenen Materials λ_{dry} als Parameter der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit
Rohdichte	-	-	Parameter ρ der Wärmespeicherung
Wärmekapazität	-	-	Parameter c der Wärmespeicherung
Dampfdiffusionswiderstandsfaktor	Parameter μ einer konstanten Wasserdampfleitfähigkeit	Parameter μ der konstanten Wasserdampfleitfähigkeit	Wert des trockenen Materials μ_{dry} als Parameter der Wasserdampfleitfähigkeit
Wasseraufnahmekoeffizient	-	Parameter A_w der linearisierten Flüssigwasserdiffusivität, korreliert mit Anstieg im überhyg. Bereich	Parameter A_w der Flüssigwasserleitfähigkeit, korreliert mit der Leitfähigkeit bei kapillarer Sättigung
Kapillare Sättigung	-	-	Parameter θ_{cap} der Feuchtespeicherfunktion
Effektive Sättigung	-	Parameter w_{eff} einer linearisierten Feuchtespeicherfunktion und der Flüssigwasserdiffusivität	Parameter θ_{eff} der Feuchtespeicherfunktion und der Flüssigwasserleitfähigkeit
Praktischer Feuchtewert bei 80% r.F.	-	Parameter w_{80} einer linearisierten Feuchtespeicherfunktion	-
Luftpermeabilität	-	-	Parameter $K_{g,dry}$ der Luftpermeabilität

2.6 Strömungen in Hohlräumen und durch luftdurchlässige Baustoffe

Der Einfluss und die Wirkung von Konvektionsströmungen durch offene oder innerhalb geschlossener Lufthohlräume auf das hygrothermische Verhalten einer Baukonstruktion lassen sich aufgrund der vielfältigen Einflüsse letztlich nur mittels numerischer Simulation beurteilen. Die Entwicklung der Strömungsmechanik und der Bauphysik vollzog sich lange Zeit getrennt voneinander, doch mit zunehmender Leistungsfähigkeit der Computersysteme und voranschreitender Entwicklung der physikalischen Modelle auf beiden Gebieten wurden Versuche gestartet, diese miteinander zu verbinden (vgl. *Rüdiger et al 2003*, *Perschk & Meinhold 2006*).

Entwicklung eines CaFD-Moduls für DELPHIN4

Innerhalb des Projektes Feuchteatlas wurde von der FH Lausitz ein Strömungsmodul in DELPHIN4 implementiert, dessen Entwicklungsumfang sich vordergründig auf die Anforderung und Rahmenbedingungen vorerst kleinerer Lufthohlräume ausrichtet (*Gnoth 2007*). Der CaFD-Code gestattet die Berechnung einer inkompressiblen, laminaren Strömung von reibungsbehafteten Fluiden in einem zweidimensionalen Lösungsgebiet. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen sich gegenüberliegenden inneren Materialoberflächen wird in dem CaFD-Code mit berücksichtigt.

Die Überprüfung des entwickelten Codes erfolgte in zwei Stufen: Zunächst wurde die Rechengenauigkeit des neuen CaFD-Moduls an Hand von bekannten und in der Literatur (z.B. *Rieger 1984*) sehr gut beschriebenen Vergleichsrechnungen kontrolliert. Das sogenannte “Driven Cavity“-Problem (Nischenströmung) zum Test isothermer erzwungener Konvektion sowie das “Thermally Driven Cavity“-Problem bezüglich natürlicher Konvektion. Die Übereinstimmung zwischen den Literaturdaten und Simulationsrechnungen erwies sich als sehr gut.
Weitere experimentelle Untersuchungen an der FH Lausitz belegten, dass die DELPHIN4-CaFD Programmversion das gekoppelte aero-hygrothermische Verhalten plausibel und nachvollziehbar berechnet. Gemessene Temperatur- und Strömungsprofile sowie Wasserdampfstromdichten an Materialschichtgrenzen konnten mit guter bzw. akzeptabler Genauigkeit rechnerisch wiedergegeben werden. Anwendungsgrenzen des Moduls werden in *Gnoth 2007* formuliert.
In anderen, ausgewählten Testbeispielen konnte beobachtet werden, wie innerhalb von Lufthohlräumen Wasserdampfmassen über größere Distanzen transportiert werden. In Abhängigkeit von der Geometrie des Hohlraums, der Strömung sowie der ortsspezifisch vorherrschenden Oberflächentemperaturen kam es in bestimmten Bereichen einer Baukonstruktion zu Kondensatausfällen, die nicht mehr örtlich direkt im Zusammenhang mit der Feuchtequelle standen. Gleichzeitig wurde demonstriert, wie durch Konvektion ortsabhängig entstandenes Kondensat vom angrenzenden Material aufgenommen und anschließend in der Materialmatrix durch Diffusion und Kapillarwasserleitung weiter bewegt wird.

Problematisch bleiben der hohe, anspruchsvolle Eingabeaufwand sowie die langen Rechenzeiten, insbesondere bei Echtzeitsimulationen, weshalb das erarbeitete CaFD-Modul für Anwender derzeit nicht freigeschaltet ist.

Vereinfachtes Modul für Luftströmungen in DELPHIN5

Das in DELPHIN5 verfügbare Modell für Luftströmungen (siehe Grunewald & Nicolai 2007 bzw. Gleichung *(2.19)*) ist implementiert worden, um den Einfluss der Luftströmung auf das hygrothermische Verhalten von Baukonstruktionen in handhabbarer Weise und mit vertretbarer Rechenzeit quantifizieren zu können. Es berücksichtigt die Durchströmung von luftdurchlässigen Materialien und auch die Strömung durch kleine Luftöffnungen wie z.B. Fugen. Es geht daher vereinfacht von laminaren, zweidimensionalen Verhältnisse aus. Der Einfluss der Schwerkraft wird ebenfalls berücksichtigt und führt zu einfachen Auftriebsströmungen. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen sich gegenüberliegenden inneren Materialoberflächen kann in DELPHIN5 mit einberechnet werden, er wird allerdings nicht automatisch berücksichtigt. Dazu ist eine Strahlungsaustausch-Feldbedingung zu spezifizieren und den inneren Oberflächen zuzuordnen.

Prinzipiell entspricht die Luftmassenstromgleichung in DELPHIN5 dem linearen Darcy-Gesetz für Strömungen, Turbulenzen werden somit nicht berücksichtigt. Die Reibung der Luftschichten untereinander und spezielle Übergangsbedingungen an den Rändern werden im Koeffizienten der Luftpermeabilität K_g zusammengefasst. Der Massentransport wird als rein konvektiv betrachtet und durch den Druckgradienten an den Rändern der Öffnung, sowie in vertikaler Richtung zusätzlich durch die Schwerkraft hervorgerufen. Eine umfassende Validierung des Modells steht noch aus. Es kann daher noch nicht für die breite praktische Anwendung empfohlen werden.

3 Bewertungskriterien

3.1 Einführung

Entwicklung neuer Bewertungskriterien

Die Interpretation der Ergebnisse der hier vorgestellten und auf den Konstruktionskatalog in Teil II angewendeten bauphysikalischen Verfahren erfolgt durch Anwendung von Bewertungskriterien. Das Rechenergebnis liefert in Verbindung mit dem Bewertungskriterium eine Aussage über die Gebrauchstauglichkeit eines Wandaufbaus. Die Bewertungskriterien unterteilen sich in Kriterien nach DIN, die entsprechend auch für das COND-Verfahren übernommen werden können und in erweiterte Kriterien für Simulationsverfahren. Das Ziel ist die Vergleichbarkeit der Kriterien der verschiedenen Verfahren. Für viele Resultate aus den Simulationsrechnungen gab es bisher allerdings keine etablierten Bewertungskriterien, was eine Motivation für die vorliegende Arbeit liefert. Daher war es notwendig, neue Kriterien zu definieren, die auf neu entwickelten Algorithmen zur Auswertung der COND- und Simulationsergebnisse basieren. Diese Bewertungskriterien reichen aber auf Grund der Vielfalt der Simulationsergebnisse auch weit über die üblichen Vorgehensweisen hinaus. In ihrer Gesamtheit ergeben die Kriterien ein neues, umfassenderes Bewertungsverfahren.

Bewertung der Verfahren

Da der Arbeitsaufwand zur Erzielung von Rechenergebnissen höherer Genauigkeit mit der Simulation größer ist, sollte und kann man einen Mehrwert daraus erwarten. Ergebnisse mit höherer Genauigkeit führen aber erst dann zu einem Mehrwert, wenn die erweiterten Kriterien Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit zulassen, die vorher nicht oder nicht so zuverlässig erzielt werden konnten. Damit besteht die Möglichkeit, dass Wandaufbauten, die als gebrauchstauglich befunden wurden, auf Grund erweiterter Kriterien als nicht geeignet eingestuft werden. Umgekehrt kann es sein, dass gebrauchstaugliche Konstruktionen verworfen werden, weil das Verfahren nicht alle relevanten Prozesse berücksichtigt. Daraus ergibt sich auch die Möglichkeit der Bewertung der Verfahren. Führt die Anwendung verschiedener Verfahren zur gleichen Entscheidung bezüglich der Zulässigkeit einer Konstruktion? Können Grenzfälle mit Hilfe der Simulation genauer bewertet werden? Wie weit liegt man dann noch auf der sicheren Seite?

Die neu entwickelten Kriterien für die Simulationsverfahren können wichtige Argumente bei einer energetischen und feuchtetechnischen Bewertung und Optimierung von Konstruktionen liefern und ermöglichen darüber hinaus eine vergleichende Bewertung von Belastungskenngrößen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Konstruktionen. Im Sinne einer hohen Gebrauchstauglichkeit und Nachhaltigkeit sollte neben energetischen und hygrischen Aspekten auch eine Betrachtung des konstruktionsimmanenten Schadenspotentials erfolgen.

3.2 Stationäre Klimabedingungen

In den stationären Berechnungsverfahren nach DIN und COND werden nur konstante Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte verwendet. Die nachfolgenden Tabellen 3.1 und 3.2 zeigen die klimatischen Randbedingungen für die Bewertungsalgorithmen zum Wärme- und Feuchteschutz aus *DIN 4108-2* und *DIN 4108-3* sowie die thermischen Übergangskoeffizienten aus *DIN 6946*.

Tab. 3.1: Klimate für stationäre Tauwasserberechnungen (DIN 4108-3) und für die (thermische) Berechnung des f_{Rsi}-Wertes nach DIN 4108-2

Klima	**Temperatur θ in °C**	**Relative Luftfeuchte φ in %**
Tauperiode (Dauer: 60 Tage)		
Außenklima	-10	80
Innenklima	20	50
Verdunstungsperiode (Dauer: 90 Tage)		
Außenklima	12	70
Innenklima	12	70
Tauwasserbereich	12	100
Dachoberfläche	20	-
Berechnung des f_{Rsi}-Wertes (*DIN 4108-2*)		
Außenklima	-5	-
Innenklima	20	(50)

Tab. 3.2: Im Feuchteatlas verwendete thermische Übergangswiderstände nach DIN 6946

Wärmeübergangswiderstand in m^2K/W	
R_{si} (Wärmeübergang innen)	0,10 / 0,13**
R_{si} (für f_{Rsi}-Wert)*	0,25
R_{se} (Wärmeübergang außen)	0,04

*nicht für Verglasungen und Rahmen
** Wärmestrom aufwärts/horizontal

Um die Vergleichbarkeit zu wahren, wurden für COND- und Glaser-Berechnungen identische Klima- und Übergangsbedingungen angesetzt.
Bei der Berechnung des f_{Rsi}-Wertes werden im Vergleich zur Untersuchung des Feuchteverhaltens andere Werte für den inneren thermischen Wärmeübergangswiderstand und die Außentemperatur verwendet. Der kritischere Übergangswiderstand bei der f_{Rsi}-Wärmeschutzberechnung impliziert ungünstigere hygrothermische Verhältnisse nahe der Oberfläche, möglicherweise hervorgerufen durch z.B. unterbundene Luftkonvektion (siehe nächster Abschnitt).

3.3 DIN- und COND-Kriterien

3.3.1 Mindestwärmeschutz

Wärmedurchlass-widerstand

Die Berechnung des Mindestwärmeschutzes von Wand-, Decken- und Dachaufbauten erfolgt nach *DIN 6946* mit Hilfe der Summe der Wärmedurchlasswiderstände der Materialschichten (R-Werte, Gleichung *(2.1)* unter Kapitel 2.3). Der Wärmedurchlasswiderstand leitet sich aus baustofflichen und baukonstruktiven Parametern ab (Wärmeleitfähigkeit, Schichtdicke) und charakterisiert als flächenbezogener Koeffizient die Wärmedämmeigenschaften einer Konstruktion.

Mindestwerte für den R-Wert, die der Verhinderung von Feuchteschäden dienen, sind in *DIN 4108-2 Tabelle 3*, beispielsweise für Außenwände von Aufenthaltsräumen zu finden.

$$R_{min} = 1{,}2\ m^2K/W \qquad \text{für Außenwände} \qquad (3.1)$$

Der Nachweis des Mindestwärmeschutzes für Außenwände ist normalerweise für sehr gering gedämmte Konstruktionen von Bedeutung. Er wäre z.B. bei einer Dämmstoffdicke von 4 cm (WLG 040 - Mineralwolle) oder 6 cm (WLG 065 - Calciumsilikat) auf 24 cm dicken Ziegelmauerwerk bereits erfüllt.

3.3.2 Transmissionswärmeverluste

Wärmedurch-gangskoeffizient

Höchstwerte für den U-Wert zur Senkung der Transmissionswärmeverluste in der Heizperiode werden durch die Energieeinsparverordnung (*EnEV 2007*) vorgeschrieben. Die EnEV 2007 fordert für Außenwände beheizter Wohngebäude allgemein einen U-Wert von 0.35 bzw. 0.45 W/m²·K, mit der EnEV 2009 werden 0.28 W/m²·K eingeführt. In der Vergangenheit wurde jedoch häufig sehr zurückhaltend auf der Innenseite gedämmt, weil unter anderem für denkmalgeschützte Häuser und Bestandsgebäude Ausnahmeregelungen geltend gemacht werden können. Im Teil II des Feuchteatlas werden deshalb innen gedämmte Wandaufbauten bewertet, deren Dämmstoffdicke eher moderat ist und 10cm nicht überschreitet. Das heißt aber nicht, dass größere Dämmstoffdicken für die Innendämmung grundsätzlich auszuschließen wären.

Im COND-Verfahren werden der U-Wert bzw. der R-Wert unter Verwendung einer feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit (siehe Gleichung *(2.9)* unter Kapitel 2.3) berechnet. Das kann bei diffusionsoffener Innendämmung zu Kondensatanfall und zu einer Verschlechterung des U- bzw. R-Wertes führen. Diese Verschlechterung ist aber im Allgemeinen gering, weil a) bei kapillaraktiven Systemen der Feuchtegehalt durch die Wirkung der Kapillarkräfte begrenzt wird oder b) nicht-kapillaraktive Systeme innenseitig mit ausreichendem Diffusionswiderstand ausgestattet werden sollten, damit es nicht zu Feuchteanreicherung kommt, wenn man Schlagregen und Havariefälle ausschließen kann.

3.3.3 Begrenzung der inneren Kondensatmenge

Kondensatmenge

Um Schäden durch Feuchteansammlungen in der Konstruktion zu verhindern, wird die berechnete Menge des winterlichen Tauwasseranfalls (Kondensat) $m_{W,T}$ begrenzt. Da im Glaser- und im COND-Verfahren vereinfachte, stationäre Klimarandbedingungen angenommen werden, tritt die berechnete Kondensatmenge nicht wirklich auf, sondern ist im Allgemeinen geringer. Die errechnete Kondensatmenge dient daher nur diesem speziellen Nachweis und sollte nicht für andere materialspezifische Bewertungen herangezogen werden.

$$m_{W,T} < 0{,}5\ kg/m^2 \quad \textit{(nicht wasseraufnahmefähig)} \qquad (3.2)$$

$$m_{W,T} < 1{,}0\ kg/m^2 \quad \textit{(wasseraufnahmefähig)} \qquad (3.3)$$

Die Forderungen und Grenzwerte in *DIN 4108-3* bzw. *DIN 68800-2* haben sich insofern in der Praxis bewährt, dass durch deren Einhaltung in der Regel Feuchteschäden in der Konstruktion vermieden werden, wenn schadhafte Feuchteansammlungen durch andere Ursachen, wie beispielsweise eindringenden Schlagregen oder eine Havarie ausgeschlossen sind.

Verdunstungsmenge und Trocknungsdauer

Wichtiger als die Unterschreitung des Grenzwerts für Tauwasser ist jedoch die Anforderung, dass die in der Heizperiode potenziell anfallende Kondensatmenge $m_{W,T}$ nicht größer werden darf als die Trocknungsmenge (Verdunstungsmenge) $m_{W,V}$ in der warmen Witterungsperiode.

$$m_{W,T} < m_{W,V} \qquad (3.4)$$

Auf diese Weise wird die jährliche Akkumulation des Kondensats, eine Zunahme des Feuchtegehaltes über Jahre hinweg, verhindert. Die *EN ISO 13788* verzichtet auf die Festlegung eines Grenzwerts für Kondensat und stellt nur die Forderung nach einer vollständigen Verdunstung des Tauwassers in den Sommermonaten. Im COND-Verfahren wird anstelle dieser Forderung überprüft, ob die Trocknungsdauer t_V des angefallenen Kondensats kleiner ist als die Dauer der Verdunstungsperiode.

$$t_V < 2160h = 90d \qquad (3.5)$$

3.3.4 Begrenzung des inneren Dampfdiffusionswiderstandes

Verbesserungen des Wärmedurchlasswiderstandes

Für Mauerwerke mit Innendämmung werden neben der *DIN 4108-3* auch in anderen, anerkannten Regelwerken wie *WTA 8-1-03* und *WTA 8-5* weitere, einfach zu ermittelnde konstruktive Kenngrößen als Kriterien für die praktische Ausführung herangezogen. Die durch das Innendämmsystem erreichte Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstandes ΔR korrespondiert mit der dampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke s_{di} der innen liegenden Schichten bis zur Kondensationsebene.

ΔR ermöglicht eine Einschätzung, inwieweit die tragende, außenseitige Konstruktion abgekühlt wird, während ein höherer s_{di}-Wert in der Heizperiode den Transport von Wasserdampf vom Innenraum in die potentielle Kondensatebene reduziert. Andrerseits verringert ein zu hoher s_{di} auch das Austrocknungsvermögen der Konstruktion zum Innenraum, wodurch sich ebenfalls eine zu hohe Feuchtebelastung einstellen kann. Diesem Sachverhalt soll mit der Forderung nach einer Begrenzung des s_{di}-Wertes Rechnung getragen (siehe auch *WTA 8-1-03*).

Die Festlegung entsprechender Grenzwerte basiert auf der Begrenzung der relativen Luftfeuchte auf der alten Innenwandoberfläche und der Forderung, dass das Trocknungspotenzial erhalten bleibt.

$\varphi_{si} \leq \varphi_{si,\,max}$ *Luftfeuchte auf der alten Innenwandoberfläche* *(3.6)*

$m_{W,\,V} \geq m_{W,\,V,\,min}$ *Potenziell mögliche Verdunstungsmenge* *(3.7)*

Die Forderung *(3.6)* bedeutet, dass die vorhandene Konstruktion nicht durch anfallendes Kondensat in Folge das Innendämmsystems belastet werden darf. Das Innendämmsystem hat die Feuchte von der bestehenden Konstruktion fern zu halten. Forderung *(3.7)* trägt dem Fakt Rechnung, dass im Fall von Feuchteeinträgen durch Regen oder kleinere Havarien die Trocknungsfähigkeit der Konstruktion gewährleistet bleiben muss. Eine Auswertung des Konstruktionskataloges in Teil II bezüglich der Forderungen *(3.6)* und *(3.7)* muss erfolgen, um die Kriterien $\varphi_{si,\,max}$ und $m_{W,\,V,\,min}$ zu bestimmen. Auf dieser Basis können vorläufige Grenzwerte für $s_{di}(\Delta R)$ vorgeschlagen werden.

Im Zusammenspiel dieser Grenzwerte soll besonders bei organischen, feuchtesensiblen Materialien wie Fachwerkhölzern oder Deckenbalken ein hohes Wassergehaltsniveau vermieden werden, was auch bezüglich der Vermeidung von Frostschäden von Bedeutung ist. Die gewünschte Reduzierung der Transmissionswärmeverluste und die Anforderungen des Feuchteschutzes müssen hier sinnvoll austariert werden.

3.3.5 Vermeidung von Tauwasser und Schimmel

Wärmebrücken

Schimmel an Bauteiloberflächen bildet sich in der Regel zuerst im Bereich von Wärmebrücken, welche in eindimensionalen Verfahren nicht abgebildet werden können. Durch den inneren Wärmeübergangswiderstand besteht die Möglichkeit, klimatisch ungünstigere Verhältnisse nahe bzw. auf der Bauteiloberfläche zu berücksichtigen, wie sie im Bereich von Wärmebrücken auftreten. Allerdings liegt die erhöhte Schimmelgefahr von Winkeln oft weniger in der Geometrie begründet, schließlich führen niedrigere Oberflächentemperaturen in einem nicht verstellten Gebäudewinkel zu erhöhter Luftbewegung (Konvektion) (*Erhorn et al. 1988*). Einen größeren Einfluss kann vielmehr die Gestaltung des Gebäudewin-

kels ausüben, wenn beispielweise durch die Dämmwirkung von Gardinen oder Möbeln die Wandoberflächentemperatur stark herabgesetzt wird.

Schimmelpilzbefall

Für die Vermeidung von Schimmelpilzwachstum auf Bauteiloberflächen wird in *DIN 4108-3* ein Grenzwert eingeführt.

$$\varphi_{si} < 80\% \qquad \textit{Grenzwert zur Schimmelvermeidung in DIN 4108-3} \qquad (3.8)$$

Auch laut *EN ISO 13788* „sollte die relative Luftfeuchte an der Oberfläche über mehrere Tage den Wert von 80% nicht übersteigen“. Das Merkblatt *WTA 6-3-05* führt hierzu aus, dass auf biologisch gut verwertbarem Substrat (z.B. stark verschmutzten Oberflächen, Tapeten aus organischen Materialien) ab einer Luftfeuchte von 75% Schimmelpilze auskeimen und wachsen können. Ein 75%-Kriterium auf der „ungestörten“, eindimensionalen Wandoberfläche würde also noch einen gewissen Sicherheitszuschlag für Wandecken beinhalten.

Temperaturfaktor

Der Temperaturfaktor (f_{Rsi}-Wert nach *DIN EN ISO 10211-2* oder Θ in *Hauser & Stiegel 1992* bzw. ζ_{Ri} nach *CEN TC 89 1991*) wurde eingeführt, um eine Aussage über die Gefahr von Feuchteschäden an der Oberfläche (in erster Linie Schimmel) treffen zu können. Die Kenntnis der Temperaturen auf der Innenwandoberfläche soll für eine Beurteilung der hygrothermischen Situation genutzt werden. Die anliegenden Umgebungstemperaturen und die Wandoberflächentemperatur im Gebäudewinkel (oder an anderen Wärmebrücken) werden zu diesem Zwecke durch den f_{Rsi}-Wert miteinander in Beziehung gesetzt.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si,\,winkel} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \qquad \textit{Temperaturfaktor im Gebäudewinkel} \qquad (3.9)$$

Die Temperaturrandbedingungen für die Berechnung des f_{Rsi}-Wertes sind in *DIN 4108-2* mit $\theta_i = 20°C$ und $\theta_e \geq -5°C$ festgeschrieben. Es gilt die Vereinbarung aus *DIN 4108-2* und *EN ISO 13788*, dass ein Grenzwert von

$$f_{Rsi} \geq 0{,}7 \qquad \textit{Mindestwert für Temperaturfaktor} \qquad (3.10)$$

nicht unterschritten werden darf. Das bedeutet, dass die Oberflächentemperatur $\theta_{si,\,winkel} \geq 12{,}6°C$ sein muss, was die relative Luftfeuchte auf der (neuen) Wandoberfläche (bei Innendämmung) unter stationären Bedingungen auf $\varphi_{si} \leq 80\%$ limitiert, wenn im Innenraum $\varphi_i = 50\%$ herrschen. Das Kriterium *(3.10)* zielt also darauf ab, den Schimmelbefall bis zu einer Außenlufttemperatur von $\theta_e \geq -5°C$ auszuschließen, wobei kurzzeitige Unterschreitungen wegen des thermischen Beharrungsvermögens der Konstruktion abgepuffert werden können.

Während sich der Temperaturfaktor für ungestörte Wandaufbauten leicht per Handrechnung bestimmen lässt, ist zur Berechnung im Gebäudewinkel ein Wärmebrückenprogramm erforderlich. Da DELPHIN auch über einen rein thermischen Berechnungsmodus verfügt, wird es hier ersatzweise als Wärmebrückenprogramm eingesetzt.

Luftfeuchte an der Wandoberfläche

Eine direkte Aussage über die Feuchtebelastung der Wandoberfläche liefert natürlich die Angabe der relativen Luftfeuchte auf der Innenwandoberfläche. Das erfordert die Bestimmung des Wasserdampfdruckprofils, wie es beispielsweise bei den COND-Ergebnissen ausgewiesen wird. Die Festlegung in *DIN 4108-2* und *EN ISO 13788* auf 80% relative Luftfeuchte bezieht sich auch auf den Gebäudewinkel. Weil COND eindimensionale Wandquerschnitte berechnet, wird deshalb nicht eine relative Luftfeuchte von 80% als Schimmelpilzkriterium herangezogen: Damit würde nicht der geometrische Wärmebrückeneffekt im Gebäudewinkel berücksichtigt. Die Auswertung des Konstruktionskataloges in Teil II ergab, dass erst bei Luftfeuchten von

$$\varphi_{si} \leq 60\% \qquad \textit{Maximalwert für Oberflächenluftfeuchte} \qquad (3.11)$$

auf der ungestörten, eindimensionalen Wandoberfläche Schimmelpilzwachstum im Gebäudewinkel ausgeschlossen werden kann. Dabei sind die in Tabelle 3.1 und 3.2 definierten Randbedingungen anzuwenden. Dieser Grenzwert ist nur gültig bei Gebäudewinkeln, in denen zwei baugleiche, homogene Bestandskonstruktionen aufeinander stoßen. In historischen Holzfachwerkhäusern zum Beispiel kann der Luftfeuchteverlauf im Gebäudewinkel sogar niedriger verlaufen als in der Mitte eines Gefachbereichs. Für diesen Fall können höhere Grenzwerte als Schimmelpilzkriterium festgelegt werden.

3.3.6 Wärmespeicherkapazität der innen liegenden Schichten

Wärmespeicherkapazität

Die Berechnung einer flächenbezogenen wirksamen Wärmespeicherkapazität C_{wirk} analog zu *DIN 4108-6* bietet die Möglichkeit, die Fähigkeit der jeweiligen Konstruktion zu bewerten, Wärmebelastungen der Raumluft abzumildern bzw. zu verzögern. Hierzu werden die Wärmespeicherkapazitäten der innen liegenden Schichten aufsummiert. Entsprechend dem Vorschlag der *DIN 4108-6* gehen nur die „wirksamen“, ersten zehn Zentimeter des Bauteils in die Bewertung ein („10-cm-Regel“).

$$C_{wirk} = \sum_k (c_k \cdot \rho_k \cdot d_k) \qquad \textit{in J/m}^2\textit{K} \qquad (3.12)$$

Dämmstoffe sind zwar durch ihre hohe Porosität in Bezug auf die Verringerung der Heizenergieverluste sehr effektiv, verfügen jedoch nur über eine geringe Dichte und somit über eine niedrige Wärmekapazität. Zudem schotten Innendämmsysteme die Raumluft von den gut Wärme speichernden Schichten der bestehenden, tragenden Konstruktion ab. Wegen des geringen Wärmespeichervermögens können die Innendämmsysteme plötzlich auftretende Temperaturspitzen in der Raumluft schlecht abpuffern.

Eine höhere Wärmespeicherkapazität kann dagegen wegen geringerer Heiz- und Kühllasten zu Energieeinspareffekten führen. C_{wirk} wird in den COND-Ergebnissen mit ausgewiesen, es kann dafür aber derzeit noch kein Ausschlusskri-

terium definiert werden. Vergleiche zwischen verschiedenen Dämmvarianten und Dämmstoffdicken sind aber möglich. Ein Effekt von C_{wirk} ließe sich quantifizieren, wenn man ein konkretes Szenario (Klima, Raumgeometrie, Wandeigenschaften, Nutzung der thermischen Zone) definiert.

3.3.7 Beispielkonstruktion zur Demonstration der Kriterien

Die bisher erläuterten Bewertungskriterien für das DIN- und das COND-Verfahren sollen anhand eines Anwendungsbeispiels demonstriert werden. Dabei handelt es sich um ein einschaliges Mauerwerk aus Altbauziegeln, beidseitig verputzt, das innen mit Calciumsilikatplatten unterschiedlicher Dicke gedämmt wurde. Die Calciumsilikatplatten weisen eine hohe kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit auf und werden vollflächig verklebt (Abbildung 3.1). Den Abschluss bildet eine dünne Schicht Innenputz. Wegen der diffusionsoffene Ausführung der Innendämmung ist in der Tauperiode mit Kondensat zu rechnen.

Die nachfolgende Materialtabelle 3.3 enthält die Materialkennwerte des Beispielwandaufbaus, die für das DIN und das COND-Verfahren verwendet wurden. Gleichzeitig entspricht das dem Set der Basismaterialparameter für DELPHIN.

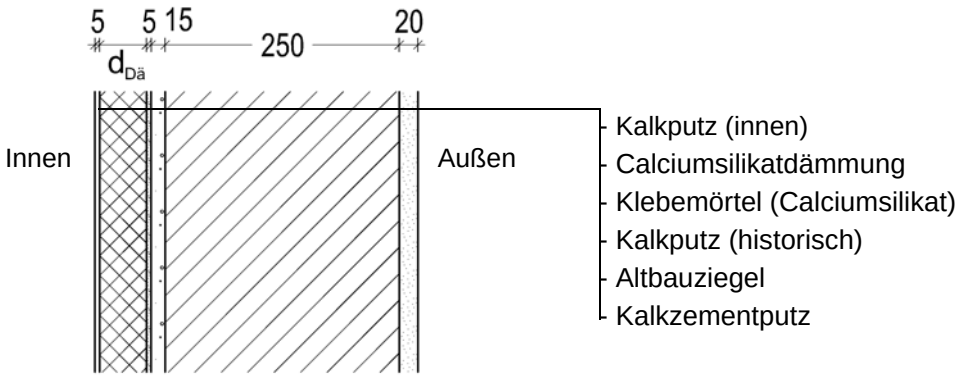

Abb. 3.1: Beispielwandaufbau zur Demonstration der Bewertungskriterien

Tab. 3.3: Materialkennwerte des Beispielwandaufbaus

Material	ρ	λ_R	μ	w_{80}	w_{eff}	A_w
	kg/m^3	W/mK	-	Vol%	Vol%	kg/m^{2}s$^{0.5}$
Kalkputz	1600	0,75	11	5,4	34,4	0,081
Calciumsilikat	270	0,065	3,9	0,5	90,0	1,172
Klebemörtel	1520	1,00	32	7,9	32,9	0,020
Kalkputz (hist.)	1800	0,82	12	1,1	28,5	0,127
Altbauziegel	1710	0,80	8,3	0,5	31,9	0,333
Kalkzementputz	1900	0,80	15	4,9	22,0	0,033

Die Ergebnisse des DIN- und des COND-Verfahrens für die Beispielkonstruktion werden in den Tabellen 3.4 und 3.5 zusammengefasst. Sie geben jeweils die R- und U-Werte wieder, sowie die Werte für Kondensat- und Verdunstungsmengen, $m_{W,T}$ und $m_{W,V}$. Die DIN-Tabelle schließt mit dem f_{Rsi}-Wert für den zweidimensionalen Gebäudewinkel, der mit Hilfe einer rein thermischen DELPHIN4-Berechnung unter konstanten Randbedingungen bestimmt wurde. Die COND-Tabelle führt stattdessen die Luftfeuchte an der neuen Innenwandoberfläche φ_{si}, die Verbesserung des Wärmedurchlasswiderstandes ΔR und die dampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_{di}, sowie die flächenbezogene wirksame Wärmespeicherkapazität C_{wirk} auf.

Die Werte für die unsanierte Variante werden mit den Ergebnissen für verschiedene Dämmstoffdicken verglichen. Die Dickenangaben beziehen sich immer nur auf die eigentlich wärmedämmende Schicht. Kleber- oder Deckschichten des Dämmsystems sind darin nicht enthalten. Bei Konstruktionen mit inhomogenem Wandaufbau wie Innendämmungen mit punktueller Verklebung, Konstruktionen mit Holzträgerkonstruktion oder Fachwerk, werden die Ergebnisse flächenanteilig berechnet.

3.3.8 Ergebnisse nach DIN 4108

Die DIN-Ergebnistabelle 3.4 zeigt, wie der Wärmedurchlasswiderstand erwartungsgemäß mit der Dicke der Dämmschicht steigt bzw. der Wärmedurchgangskoeffizient sinkt. Sowohl der Mindestwärmeschutz R_{min} als auch Temperaturfaktor f_{Rsi} zielen auf eine Vermeidung von Feuchteschäden nicht nur auf der ungestörten inneren Wandoberfläche ab, sondern auch besonders im kritischeren Gebäudewinkel. Dementsprechend streng sind die Grenzwerte angelegt. Der f_{Rsi}-Wert für den Gebäudewinkel zeigt an, dass Schimmel erst ab einer Dämmstoffdicke von 50 mm ausgeschlossen werden kann. Der Mindestwärmeschutz stellt dabei offensichtlich noch höhere Ansprüche, da mit 1,14 m^2K/W bei 50 mm Dämmung die erforderlichen 1,20 m^2K/W noch nicht eingehalten werden. Aus der Sicht des Mindestwärmeschutzes wären hier also 60 mm Dämmung erforderlich.

Tab. 3.4: Zusammenstellung der Ergebnisse nach DIN: U- und R-Wert (DIN 6946), Kondensat- und Verdunstungsmenge nach dem Glaserverfahren (DIN 4108-3), sowie Temperaturfaktor (DIN 4108-2)

Ergebnisse nach DIN 4108

	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand	*R*	m^2·K/W	0,36	0,83	1,14	1,60
Wärmedurchgangskoeffizient	*U*	W/m^2·K	1,90	1,00	0,77	0,57
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m^2	-	2,397	2,160	1,741
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m^2	-	3,749	2,649	1,876
Temperaturfaktor* (Gebäudewinkel)	f_{Rsi}	-	0,46	0,67	0,73	0,78

* mit R_{si}= 0,25 m^2·K/W und θ_e= -5°C

Die Verdunstungsmenge liegt zwar immer über der berechneten Kondensatmenge, jedoch überschreiten alle ermittelten Werte die geforderte maximale Kondensatmenge von (hier) 1,0 kg/m^2 (*DIN 4108-3*). Dabei nimmt die Tauwassermenge bei Verwendung des Glaserverfahrens mit steigender Dämmdicke ab, da der höhere Dampfdiffusionswiderstand der dickeren Dämmschichten die Bildung von Kondensat reduziert. Der höhere Dampfdiffusionswiderstand der dickeren Dämmschichten verringert auch die Verdunstungsmenge. Das bedeutet, dass bei höher gedämmten Konstruktionen das Verdunstungspotenzial herabgesetzt wird und der Wandaufbau damit anfälliger für Schlagregen oder andere Feuchtequellen wird.

3.3.9 Ergebnisse nach COND

Die Tabelle 3.5 beinhaltet den Hinweis, dass die Berechnungen mit einer feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit ausgeführt wurden. Deshalb können sich bei den gedämmten Varianten je nach Menge des Kondensatausfalls andere R- und U-Werte als in der DIN-Tabelle ergeben. Im Glaser-Verfahren wurde ausschließlich der Rechenwert λ_R verwendet, während im COND-Verfahren, basierend auf λ_R eine kondensatabhängige Korrektur der R- und U-Werte erfolgte. Der Vergleich des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem DIN und COND-Verfahren erbringt eine feuchteabhängige Verschlechterung für die drei Dämmvarianten von 2,4%, 3.5% bzw. 4.3%.

Tab. 3.5: Zusammenstellung der Ergebnisse nach dem COND-Verfahren

Ergebnisse nach COND

	Symbol	Einheit	Unsaniert	30 mm	50 mm	80 mm
Wärmedurchlasswiderstand**	R	m^2·K/W	0,36	0,81	1,10	1,53
Wärmedurchgangskoeffizient**	U	W/m^2·K	1,90	1,02	0,79	0,59
Kondensatmenge	$m_{W,T}$	kg/m^2	-	0,162	0,332	0,563
Verdunstungsmenge	$m_{W,V}$	kg/m^2	-	3,749	2,649	1,876
Luftfeuchte an der Oberfläche	φ_{si}	%	80,2	64,2	60,6	57,7
Innendämmsystem:						**feuchteabhängig
s_d-Wert	s_{di}	m	-	0,33	0,41	0,53
Wärmedurchlasswiderstand	ΔR	m^2·K/W	-	0,47	0,78	1,24
Wirksame Wärmespeicherkapazität	C_{wirk}	W·h/K	46,8	34,7	26,9	15,5

Genauso deutlich, wie die Tauwassermengen mit dem Glaserverfahren über dem Grenzwert liegen, bleiben sie durch die Berücksichtigung der Flüssigwasserleitfähigkeit in dem COND-Verfahren unter 1,0 kg/m^2. Auffallend ist, dass die Kondensatmengen mit der Dämmdicke ansteigen, sich also gegenläufig zu den Ergebnissen in Tabelle 3.4 verhalten. Das hat seine Ursache im zunehmenden Widerstand der Dämmschicht gegen den kapillaren Transport. Die kapillar transportierte Feuchte braucht länger, um die Innenseite zu erreichen um dort zu ver-

dunsten. Die Verdunstungsmenge nimmt auch nach dem COND-Verfahren mit größerer Dämmstoffdicke ab. Die Zahlenwerte sind identisch zum DIN-Verfahren, weil im COND-Verfahren der kapillare Flüssigwassertransport nur bei der Berechnung des Kondensats berücksichtigt wird.

Das Temperatur- und das Wassergehaltsprofil in dem Diagramm in Abbildung 3.2 illustrieren die Werte aus Tabelle 3.5. Die rote Linie veranschaulicht, wie die Temperatur durch den thermischen Übergangskoeffizienten in der Nähe der Wandoberfläche abnimmt und sich in einem starken Abfall über die Wärmedämmschicht fortsetzt.

Die hellblau eingefärbten Bereiche zeigen die hygroskopische Aufladung an. Die maximale hygroskopische Feuchte wird aus dem praktischen Feuchtegehalt w_{80} mit Hilfe der die linearisierten Sorptionsisotherme nach COND bei einer relativen Luftfeuchte von 95% ermittelt und als blaue, waagerechte, in der Bildschirmdarstellung gestrichelte Linie im Diagramm angezeigt. Erreicht die hellblaue Fläche die waagerechte Linie, ist des Material hygroskopisch aufgeladen. Je höher die maximale hygroskopische Feuchte liegt, um so mehr Feuchte speichert das Material bei einer Änderung der Luftfeuchte; je höher ist die Feuchtepufferkapazität. Besonders der zementhaltige, 5 mm dicke Calciumsilikat-Klebemörtel und der Kalkzement-Außenputz speichern große Mengen Feuchte, bevor es zur Kondensation kommt. Die Dämmung und der Altbauziegel dagegen weisen bei einer ähnlichen Luftfeuchte nur einen geringen Feuchtegehalt auf.

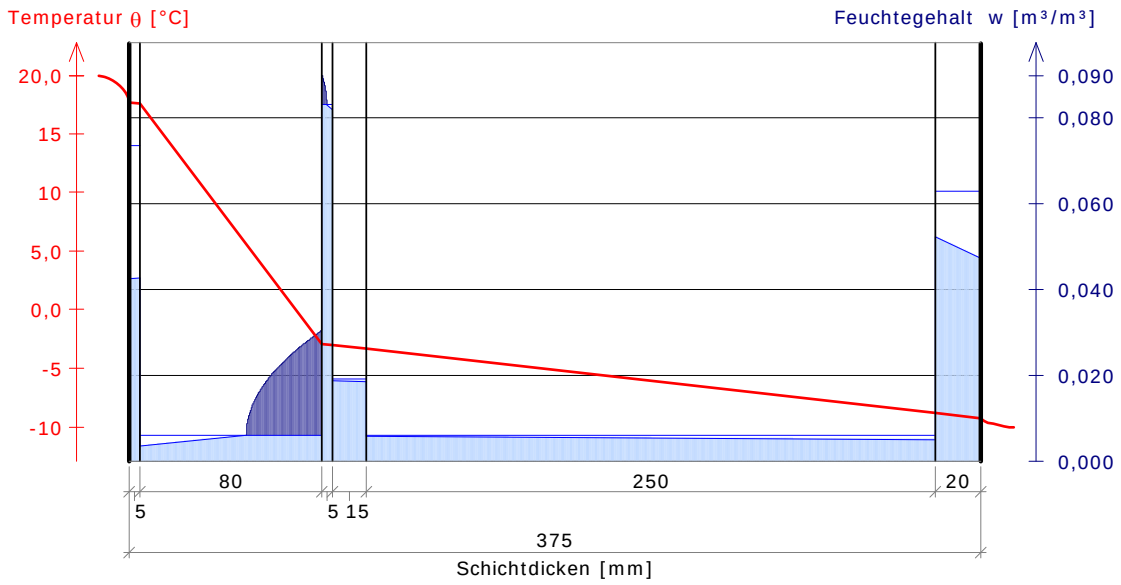

Abb. 3.2: COND-Diagramm für die Beispielkonstruktion mit 80 mm Dämmschichtdicke: Temperatur- und Wassergehaltsprofil nach einer Kondensationsperiode von 60 Tagen

Der überhygroskopische Wassergehalt wird dunkelblau angezeigt. Die Summe der überhygroskopischen Wassermassen der Materialschichten wird als Kondensatmenge von COND ausgewiesen. Oft ist es von Bedeutung zu wissen, wo

das Kondensat ausfällt. In Abbildung 3.2 ist das der Bereich zwischen Calciumsilikat und der Kleberschicht. Die vorhandene Konstruktion kommt nicht mit Kondensat in Berührung.

Im Wassergehaltsprofil sind an den Schichtgrenzen zum Teil deutliche Sprünge festzustellen. Jeder gegebenen Luftfeuchte kann über die Feuchtespeicherfunktion des Materials ein Wassergehalt zugeordnet werden (siehe Kapitel 2.3 und Abschnitt 2.4.3). Das Profil der relativer Luftfeuchte ist wie das Temperaturprofil eine stetige Funktion. Bei gleicher relativer Luftfeuchte entstehen dadurch unterschiedliche Wassergehalte an den Materialschichtgrenzen.

3.3.10 Zusammenstellung der Nachweise

Bei der Zusammenstellung der Nachweise ist der direkte Ergebnisvergleich des DIN- und COND-Verfahrens von Interesse. In Tabelle 3.6 wird veranschaulicht, für welche Dämmschichtdicken welche Nachweise mit welchem Verfahren erbracht werden können und die nicht eingehaltenen Grenzwerte sind deutlich gekennzeichnet.

Tab. 3.6: Zusammenstellung der Nachweise für das DIN und das COND-Verfahren

Nachweise unter stationären Bedingungen

	Bedingung	Unsaniert		30 mm		50 mm		80 mm	
		DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND	DIN	COND
Mindestwärmeschutz (DIN 4108-2:2003-07)	$R \geq 1.2\ m^2 \cdot K/W$	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Zulässige Kondensatmenge (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq 1.0\ kg/m^2$	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
Verdunstung des Kondensats (DIN 4108-3:2001-07)	$m_{W,T} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz (DIN 4108-2:2003-07)	$f_{Rsi} \geq 0.7$/ $\varphi_{si} \leq 60\%$ (COND)	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓

Bezüglich des Mindestwärmeschutzes liefern beide Algorithmen gleiche Bewertungen: Nur mit einer 80 mm dicken Dämmung wird die Forderung der *DIN 4108-2* erfüllt. Diskrepanzen treten erwartungsgemäß bei der Beurteilung der zulässigen Kondensatmenge auf. Mit dem Glaserverfahren gelingt es nicht, den Nachweis nach *DIN 4108-2*3 zu erbringen, während mit dem COND-Verfahren für alle drei Dämmstoffdicken ein positives Ergebnis ausgewiesen werden kann. Mit einem Blick in Tabelle 3.4 lässt sich abschätzen, dass auch mit einer Dicke von beispielsweise 100 mm die Kondensatmenge nach Glaser immer noch zu hoch wäre, auch wenn die Tauwassermengen mit der Dicke kontinuierlich abnehmen. Der Nachweis der Verdunstung des Kondensats erfolgt bei beiden Verfahren in gleicher Weise und gelingt problemlos. Oberflächenkondensat tritt nicht auf. Die Vermeidung von Schimmelpilzbefall im Gebäudewinkel wird bei der Bewertung mit dem Temperaturfaktor ab einer Dämmschichtdicke von 50 mm erfüllt, wohin-

gegen φ_{si} in Übereinstimmung mit dem Mindestwärmeschutz erst mit 80 mm Dämmung eingehalten wird.

Um die Nachweise in Tabelle 3.6 führen zu können, mussten stark vereinfachende Annahmen bezüglich der Klimabedingungen und der Materialparameter getroffen werden. Das birgt die Gefahr in sich, dass die Sicherheitszuschläge zu groß gewählt werden und funktionsfähige Lösungen nicht zur Anwendung kommen. Auch der umgekehrte Fall ist denkbar: die Wirkung der Kapillarität kann auf Grund der vereinfachten Flüssigwasserleitfunktion überschätzt werden. Damit bestünde die Gefahr, dass die zulässige Kondensatmenge trotzdem überschritten wird, obwohl man mit COND-Verfahren zur gegenteiligen Aussage gelangt.

Daher soll der Vergleich mit potenziell genaueren Verfahren zum einen zeigen, wo noch Reserven bezüglich der Optimierung von Wandaufbauten bestehen. Das ist in Hinblick auf die kommenden Anforderungen an die Energieeffizienz von Gebäuden besonders wichtig. Zweitens sollen verbleibende Restrisiken aufdeckt werden, um die Rechenverfahren und Bewertungskriterien noch zuverlässiger zu gestalten.

3.4 Klimadaten für Simulationsverfahren

3.4.1 Auswahl der Testreferenzjahre (TRY)

Für das instationäre Außenklima wurden die Stundenwerte eines Testreferenzjahres, üblicherweise mit TRY (Test Reference Year) abgekürzt, mit durchschnittlichen Witterungsverhältnissen verwendet. Der Deutsche Wetterdienst, ansässig in Offenbach, hat Deutschland in 15 verschiedene Klimaregionen eingeteilt (*Christoffer et al. 2004*). Testreferenzjahre sind aus realen Witterungsabschnitten zusammengesetzt. Die Zeitabschnitte wurden so bestimmt, dass die Jahreszeitenmittelwerte der einzelnen Elemente aller Regionen möglichst gut mit den dreißigjährigen Mittelwerten übereinstimmen.

Abb. 3.3: Deutschlandkarte mit TRY-Regionen; TRY-Region 13 mit Referenzstandort Passau in rot (bearbeitetes Bild: Christoffer et al 2004, DWD Offenbach)

Testreferenzjahre in Deutschland

Für die instationären Berechnungen wurde das Klima der Testreferenzregion 13 mit dem Referenzstandort Passau ausgewählt (Abbildung). Die Wahl liegt zum einen in der großen territorialen Ausdehnung, der Bevölkerungsdichte als auch in den Klimawerten begründet.

Mit einer winterlichen Durchschnittstemperatur von -1°C ist es vergleichsweise kalt, nur recht kleine Gebiete, wie die TRY-Region 10 (Hof), TRY-Region 11 (Fichtelberg) und TRY-Region 15 (Garmisch-Partenkirchen) weisen niedrigere Durchschnittstemperaturen im Winter auf. Mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 8,2°C liegt das verwendete Klima über dem Durchschnitt aller Gebiete. Werden wiederum sehr kleine Klimaregionen vernachlässigt, die allesamt durch ein sehr kaltes durchschnittliches Jahresklima charakterisiert sind (TRY-Region

8 (Braunlage), TRY-Region 11 (Fichtelberg), TRY-Region 14 (Stötten) und TRY-Region 15 (Garmisch-Partenkirchen)), beläuft sich die Jahresdurchschnittstemperatur der verbliebenen Gebiete auf 8,5°C.

Zu Vergleichszwecken wurde in einigen Simulationen auch ein anderes Außenklima, TRY-Region 04 mit dem Referenzstandort Potsdam, angeordnet.

Da in den Datenreihen des Deutschen Wetterdienstes keine Werte mehr für die stündliche Niederschlagsmenge enthalten sind, wurden diese mit Hilfe der detaillierten meteorologischen Informationen in *Christoffer et al. 2004* sowie aus langjährigen Monatsmittelwerten des Testreferenzortes generiert. Die gesamte Schlagregenmenge auf eine horizontale Fläche der in den Simulationen verwendeten Regendaten summiert sich im Jahr für TRY-Region 13 auf 952,3 l/(m^2a).

3.4.2 Klimaelemente

Zu den üblicherweise in Simulationen verwendeten Klimaelementen zählen die Datensätze auf Stundenbasis der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der direkten und diffusen Strahlung, der langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung sowie der Windgeschwindigkeit, -richtung und der Niederschlagsmenge. Eine grafische Darstellungen Verläufe der im Feuchteatlas verwendeten Klimadaten ist im Anhang zu finden.

Die Außenlufttemperatur und die relative Luftfeuchte werden in den Simulationen direkt als Randbedingung (3.Art) unter Beachtung der Übergangswiderstände berücksichtigt. Es erfolgt bisher keine spezielle Umrechnung der TRY-Daten auf die gebäudespezifische Umgebung. Der Einfluss der Strahlung und des Schlagregens wird dagegen durch Modelle beschrieben, die eine Umrechnung der im freien Feld gemessenen Daten auf die Wandoberfläche erlauben. Die Modelle für Strahlung und des Schlagregen sollten daher kurz diskutiert werden.

Kurzwellige Strahlung

In der Bauphysik unterscheidet man im Spektrum der elektromagnetischen Strahlung den kurzwelligen Bereich von $\lambda_{sw} = 0.3 - 3\ \mu m$, der auch das sichtbare Licht enthält, und den langwelligen Bereich von $\lambda_{lw} = 3 - 30\ \mu m$. Die kurzwellige Einstrahlung unterteilt sich in den Anteil der direkten, gerichteten Sonnenstrahlung und einen Anteil diffuser, ungerichteter Strahlung, der aus der Wolkendecke emittiert werden kann oder aber auch auf diffuse reflexion aus der Umgebung zurückgeht. Die kurzwellige direkte Strahlung ist in den TRY-Daten als Strahlung auf eine Horizontalfläche gegeben, die vom Standort, der Bedekkung, und den Eigenschaften der Atmosphäre (Trübungsfaktor) abhängt. Sie muss daher auf die Wandfläche umgerechnet werden, wobei Wandrichtung, Wandneigung und auch Datum/Tageszeit und die Standortdaten (geografische Breite, Höhe über N.N.) eingehen. Auch bei der Umrechnung der diffusen Strahlung muss die Wandneigung beachtet werden. Die absorbierte Wärmestromdichte schließlich ergibt sich durch Multiplikation der senkrecht auf die Wand einfallenden Strahlungsstromdichte und dem Absorptionskoeffizienten, der von

der Farbe bzw. dem Farbsättigungsgrad der Oberfläche abhängt. Für den Absorptionsfaktor des kurzwelligen Strahlungsaustauschs wurden einheitlich 0,65 gewählt. Damit entspricht der Faktor einer mittleren bis dunklen Oberfläche bzw. einer leicht rauen Oberfläche (*Fischer et al. 2008*).

Langwellige Strahlung

Die langwellige Abstrahlung von Körpern läßt sich nach der *Stefan-Boltzmann*-Gleichung berechnen, in welches die Wandoberflächentemperatur zur vierten Potenz eingeht. Die langwellige Abstrahlung kann bei klarem Himmel zur Unterkühlung der Bauteiloberfläche führen. Bei bedecktem Himmel kompensiert die atmosphärische Gegenstrahlung die langwelligen Strahlungsverluste. Die Abstrahlung ist abhängig von der Neigung der untersuchten Konstruktion gegen den Himmel und das Erdreich. Flachdächer stehen mit dem Himmel im Strahlungsaustausch, Überhänge mit dem Boden. Vertikale Wände erhalten sowohl vom bedecken Himmel aus auch von der Umgebung und dem Boden eine langwellige Zustrahlung.

Emissionskoeffizienten für langwellige Abstrahlung liegen üblicherweise im Bereich von $\varepsilon_{lw} = 0{,}9$. Deshalb wird dieser Wert als Standardwert für den Emissionskoeffizient der langwelligen Abstrahlung bei mineralischen Oberflächen gesetzt. Metallische Oberflächen weisen einen Emissionskoeffizienten von ungefähr bis zu 0,2 auf.

Schlagregen

Die derzeit genaueste Methode zur Berechnung des auf eine Wand auftreffenden Schlagregens stellt die Modellierung mittels CFD-Strömungssimulationen dar, welche jedoch nur sehr aufwändig für vorher genau definierte Regenereignisse durchgeführt werden kann (*Blocken 2004*). Lage und Geometrie der untersuchten Stelle und des Gebäudes sowie einige Umgebungsfaktoren (andere Häuser, Vegetation) üben dabei einen großen Einfluss aus, sodass streng genommen immer nur Modellfälle betrachtet werden können. Die *DIN EN ISO 15927-3* versucht diesem Umstand mit der Berechnung eines Schlagregenindexes gerecht zu werden. Zu den makroskopischen Randbedingungen müssen bei der Berechnung der eindringenden Schlagregenmenge für mikroskopische Einflüsse ebenfalls Festlegungen getroffen werden: Die Oberflächenstruktur und Beschaffenheit der Oberfläche (benetzbare Fläche, Verschmutzung) oder die zu große Schlagregenmenge, von der ein Teil von der Fassade wieder abspritzt bzw. herabfließt, bewirken, dass nur ein Teil des tatsächlich auftreffenden Niederschlags aufgenommen wird.

Das Verfahren der *DIN EN ISO 15927-3*, das zur Berechnung der stündlichen Schlagregendichte herangezogen wurde, berechnet zuerst mit den gemessenen stündlichen Werten von Windrichtung, -geschwindigkeit und stündlichen Gesamtniederschlagmenge sowie der Wandausrichtung den jährlichen Windfeldindex

$$I_A = \frac{2}{9} \cdot \frac{\sum v \cdot r^{8/9} \cdot \cos(D - \Theta)}{N} \qquad \text{in l/m²·a} \qquad (3.13)$$

mit den Variablen

v	Stundenwerte der Windgeschwindigkeit in m/s
r	Stündliche Gesamtniederschlagsmenge in mm
D	Stundenmittel der Windrichtung (°)
Θ	Winkel zwischen Norden und der Wandnormalen (°).

Da es sich in diesem Fall bei den Eingangswerten um bearbeitete Klimadaten eines Jahres und nicht um langjährige Klimamessreihen handelt, beträgt die Anzahl der Jahre mit verfügbaren Messdaten $N = 1$. Mit der Winkelfunktion in Gleichung *(3.13)* geht nur der senkrecht auf die Wand auftreffende Anteil des Niederschlags in die Berechnung mit ein.

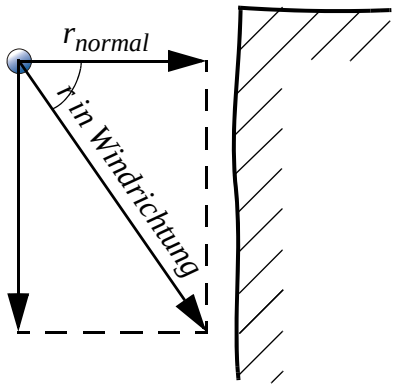

Abb. 3.4: Horizontalschnitt mit Gesamtniederschlagsmenge in Richtung des Niederschlags (Windrichtung) und der auf die Wandoberfläche auftreffende Niederschlag

Gemäß Definition umfasst I_A die jährliche „Schlagregenmenge auf eine senkrechte Wand der angegebenen Ausrichtung in 10 m Höhe über dem angrenzenden Erdboden in der Mitte des Windfeldes am geographischen Ort der Wand je Quadratmeter Wandfläche“ (*DIN EN ISO 15927-3*). Der Wandindex I_{WA} schließlich beinhaltet Standortfaktoren wie Topographie, örtlicher Windschutz und die Art des Gebäudes. Mit Hilfe der Gleichung des Wandindex I_{WA} wurden für die Simulationen die Stundenwerte des Schlagregens festgelegt:

$$I_{WA} = I_A \cdot C_R \cdot C_T \cdot O \cdot W \qquad \text{in l/m²·a} \qquad (3.14)$$

Der Geländeerhöhungsfaktor C_R bezieht die Höhe des untersuchten Punktes über dem Erdboden und die Beschaffenheit der Geländeoberfläche auf der Anströmseite mit ein. Für den Feuchteatlas wurden grundsätzlich eine Höhe von 5 Meter für den untersuchten Punkt und die Geländekategorie II (landwirtschaftlich

Nutzfläche mit Heckenbegrenzung, gelegentliche kleine landwirtschaftlich Bauten, Häuser oder Bäume) ausgewählt.
Der Topographiefaktor C_T berücksichtigt spezielle, sehr exponierte Standorte wie frei stehende Bergkuppen und Steilhänge und betrug immer $C_T = 1$.
Der Hindernisfaktor O erfasst den Einfluss von Hindernissen (Bäumen, Gebäuden oder Monumenten) mit mindestens derselben Höhe wie die untersuchte Wand. Für O wurde einheitlich ein Wert von 0,6 festgelegt, was einer Entfernung Wand-Hindernis von 40 bis 60 m entspricht.
In den Wandfaktor W gehen sowohl die Gebäudeform, die ungefähre Gebäudehöhe bzw. die Höhe der untersuchten Stelle als auch insbesondere das Vorhandensein eines Traufüberstandes ein (siehe Abbildung 3.5). Hierfür wurde $W = 0{,}4$ gewählt.

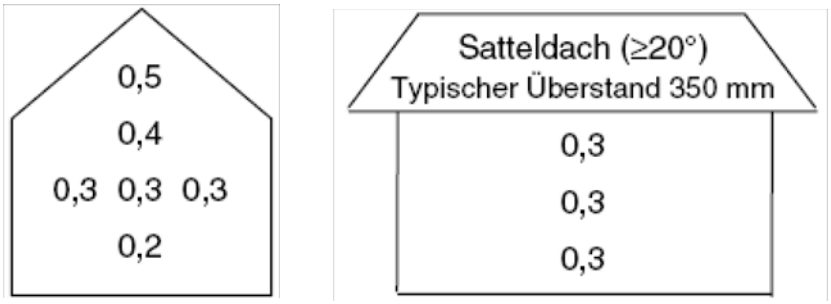

Abb. 3.5: Wandfaktor W in Abhängigkeit von der Position der untersuchten Stelle
Links: Dreigeschossige Giebelwand ohne Traufüberstand
Rechts: Dreigeschossige Giebelwand mit Traufüberstand

In den Simulationen wird unterschieden zwischen Berechnungen mit und ohne Schlagregeneinfluss:

1.) Ohne Schlagregeneinfluss: Hier war die Konstruktion nach Norden ausgerichtet: Die „strahlungsärmste“ Ausrichtung führte auf den Innenoberflächen zu den ungünstigsten Klimaverhältnissen.

2.) Mit Schlagregeneinfluss: In diesen Simulationen wurde die Konstruktion nach Westen ausgerichtet, da hier die größte Schlagregenmenge verzeichnet werden konnte.

Diese Auswahl zielte bewusst darauf ab, jeweils zwei Maximalfälle zu untersuchen, mit denen ein Korridor wiedergegeben wird, innerhalb dessen sich das hygrothermische Verhalten der Konstruktionen abspielt.
Bei der Simulation mit Schlagregeneinfluss wurden Oberflächeneffekte, die das Eindringen von Schlagregen herabsetzen, wie z.B. das Abfließen des Regens und die durch (Staub-)Ablagerungen verminderte Benetzbarkeit auf ein Minimum reduziert, sodass ein „worst-case“-Szenario geschaffen wurde.

Mit dem Schlagregen wurde die potenziell größte Feuchtequelle berücksichtigt. Es ist nicht ungewöhnlich, dass die Menge des eindringenden Schlagregens die des Kondensats, dass sich auf Grund von Diffusionserscheinungen im Winter an der Innendämmung bildet, um ein Vielfaches übersteigt. Diese eindringende Feuchte wird in erster Linie in den außen liegenden Schichten gespeichert und kann von dort aus wieder gefahrlos verdunsten. Bei Konstruktionen mit diffusionsdichten Innendämmsystemen, die den Wasserdampftransport vom Innenraum in die Konstruktion zum Teil vollständig unterbinden, lässt sich erst nach der Berücksichtigung von Schlagregenereignissen die wahre Feuchtebelastung feststellen. Dies gilt in besonderem Maße für historische Bauten mit Sichtmauerwerk, die nicht über einen ausreichenden Schlagregenschutz verfügen, oder bei historischen Fachwerkkonstruktionen, die das Austrocknungspotential zum Innenraum hin unbedingt benötigen (*Ruisinger & Plagge 2008*).

In den zweidimensionalen Simulationen von Gebäudeecken wurde grundsätzlich die Nordwestecke mit Schlagregeneinfluss ausgewählt.

3.4.3 Raumklima

Die Stundenwerte des Innenklimas wurden mit Hilfe der im Anhang der *DIN EN 15026* enthaltenen Diagramme entwickelt. Dabei kann aus den Außenlufttemperaturen (Abbildung D.1 im Anhang) die Innenraumtemperatur und -luftfeuchte bestimmt werden. Um Spitzenbelastungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Tagesverlauf nicht herauszumitteln, wurden die eigentlich für Tagesmittelwerte angegebenen Diagramme für die Bildung von Stundenwerten verwendet.

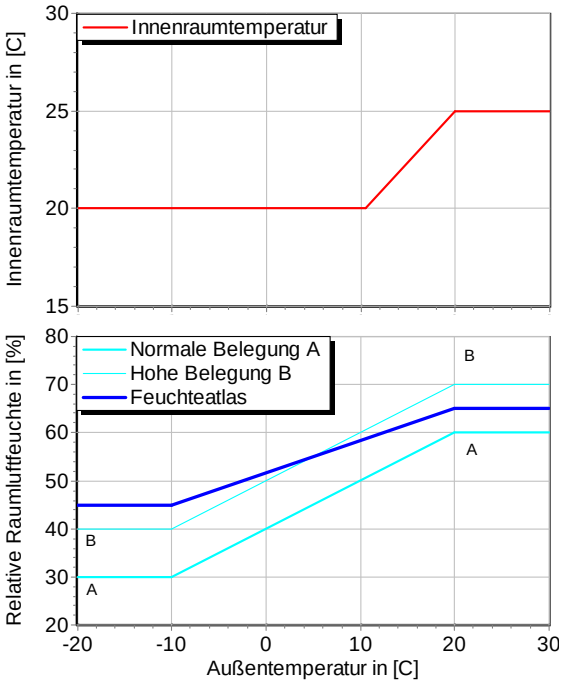

Abb. 3.6: Diagramme zur Berechnung des Innenklimas auf Basis der Außentemperatur (DIN EN 15026): Raumseitige Temperatur (oben) und relative Luftfeuchte (unten)

Damit sich die Ergebnisse auf der sicheren Seite befinden, wurde der Berechnung der Raumluftfeuchte die Kurve der hohen Belegung (Kurve B) zu Grunde gelegt, jedoch in modifizierter Form: Statt zwischen 40 und 70% verläuft sie zwischen 45 und 65%. Die ursprüngliche Kurve B würde zu hohe Luftfeuchten im Sommer und zu unkritische Luftfeuchten im Winter bewirken. Es würde ein Auftreten von Schimmelpilzen prognostiziert, wie es nicht den üblichen Beobachtungen im mitteleuropäischen Raum entspricht: Statt im Winter und in der Übergangszeit würde hauptsächlich im Hochsommer das Auskeimen von Schimmelpilzen vorhergesagt, zudem würde die niedrige Raumluftfeuchte im Winter zu einem geringeren Eintrag von Luftfeuchte in die Konstruktion führen. Die Ergebnisse lägen nicht mehr eindeutig auf der sicheren Seite.

Mit obigem Ansatz (siehe Abbildung 3.6) für den stündlichen Verlauf der Innentemperatur und der relativen Luftfeuchte ergeben sich die in Abbildung 3.7 abgebildeten Verläufe des Innenklimas.

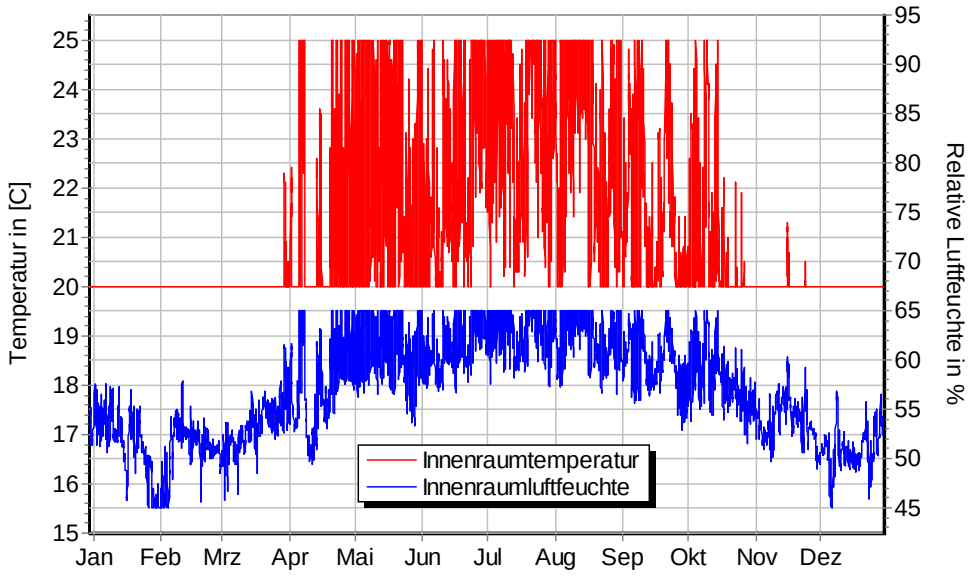

Abb. 3.7: Gang der Stundenwerte von Innenraumtemperatur und -luftfeuchte

Die Entwicklung des Innenraumklimas aus der Außentemperatur führt dazu, dass im Winter die Außentemperaturen sehr häufig die Heizgrenztemperatur von ca. 10°C unterschreiten, die Innenraumtemperatur beträgt deshalb von Ende Oktober bis Ende März nahezu konstant 20°C. In den wärmeren Monaten zeichnen sich jedoch die täglichen Außentemperaturschwankungen deutlich ab, weil dann Innenraumtemperaturen bis 25°C erreicht werden.

Übergangs-koeffizienten

Der thermische Übergangskoeffizient übt einen großen Einfluss auf die hygrothermischen Verhältnisse auf der Bauteiloberfläche aus. Die in den eindimensionalen Simulationen verwendeten Werte sind der *DIN 6946* (siehe Tabelle 3.2) entlehnt: Für eine vertikale Außenwand 7,7 W/m^{2}K im Innen- und 25,0 W/m^{2}K im Außenbereich.

Bei der Wahl des Übergangskoeffizienten im Winkelbereich flossen folgende Betrachtungen ein: In praktischen Messungen (*Erhorn et al. 1988*) wurde im unverstellten Winkelbereich ein minimaler Wärmeübergangskoeffizient von 5,8 W/ m^2K festgestellt. Dabei nimmt der Strahlungsanteil am Wärmeübergangkoeffizienten zur Ecke hin ab. Der strömungsbedingte, konvektive Anteil am Übergangkoeffizienten dagegen nimmt zur zweidimensionalen Ecke hin sogar zu! Wie in *Erhorn et al. 1988* erläutert wird entsteht durch die niedrigeren Oberflächentemperaturen in der zweidimensionalen Ecke ein größeres Temperaturgefälle zur Raumtemperatur, wodurch der höhere Gradient eine stärkere Luftströmung erzeugt.

Wird an Außenwänden die Luftkonvektion durch Einrichtungsgegenstände wie Gardinen oder Einbauschränke herabgesetzt, wirken die Gegenstände wie eine zusätzliche Innendämmung. In Gebäudewinkeln wird so die ohnehin niedrigere Oberflächentemperatur weiter abgesenkt. *Rudolphi & Kirchner 2000* oder *Sedlbauer 2001* berufen sich auf *Ciezielski 1999* und übertragen diesen zusätzlichen Dämmeffekt auf den thermischen Übergangswiderstand. *Ciezielski 1999* propagiert in Abhängigkeit von der Möblierung folgende Werte:

Einbauschränke: R_{si} = 1,0 m^2K/W,

Freistehende Schränke: R_{si} = 0,5 m^2K/W,

Gardinen: R_{si} = 0,25 m^2K/W.

Im Feuchteatlas wurde bei zweidimensionalen Berechnungen im unmittelbaren Eckbereich, d. h. ungefähr bis zur Hälfte der Außenmauerdicke, ein Wärmeübergangswiderstand von 0,20 m^2K/W angeordnet, im übrigen Bereich gelten 0,13 m^2K/W. Gegenüber *Erhorn et al. 1988* bewegen sich die Berechnungsergebnisse somit auf der sicheren Seite, berücksichtigen jedoch nicht beispielsweise einen Einbauschrank. Damit wurde beabsichtigt, dass die Verwendung eines zu niedrigen Übergangskoeffizienten letztlich nicht einen überzogenen baulichen Aufwand nach sich zieht. Der gewählte Wert folgt somit der Argumentation in *Mainka & Paschen 1986.* Im Umkehrschluss bedeutet dies aber auch, dass bei einem unangemessenem Nutzerverhalten oder durch Fehler bei der Inneneinrichtung kritischere Werte im Gebäudewinkel zu erwarten sind. Ein fachkundiger Planer sollte in der Lage sein, Bauherren oder Mietern diesen Sachverhalt zu vermitteln wie er auch andere, durch die Nutzung bedingte erhöhte Feuchtelasten erkennen sollte, um dann geeignete Gegenmaßnahmen, wie die Verwendung eines Dämmkeils oder einer Zwangslüftung zu treffen.

Der Dampfübergangskoeffizient betrug raumseitig konstant $5{,}88 \cdot 10^{-8}$ s/m und auf der Außenwandoberfläche konstant $1{,}84 \cdot 10^{-7}$ s/m.

3.5 Neue Kriterien für Simulationsverfahren

3.5.1 Kondensations- und Trocknungszyklen

Kapillar-kondensation

Das Porensystem von kapillarporösen Baustoffen speichert Wasser bei jeder relativen Luftfeuchte in absorbierter (flüssiger) Form. Der Anteil der Feuchtespeicherung in Form von Wasserdampf ist dagegen vernachlässigbar klein. Die ursächlichen Wirkmechanismen, die zur Speicherung in flüssiger Form führen, werden als Dampfdruckabsenkung und Kapillarkondensation bezeichnet. Über dem Meniskus, der gekrümmten Wasseroberfläche einer gefüllten Baustoffpore, bildet sich ein Dampfdruck aus, der kleiner als der Sättigungsdampfdruck ist. Dadurch liegt in den luftgefüllten Poren eines kapillarporösen Baustoffes üblicherweise eine relative Luftfeuchte von weniger als 100% vor, obwohl gleichzeitig flüssiges Wasser vorhanden ist. Die Kapillarkondensation setzt schon bei Luftfeuchten um 30% ein.

Definition der Fechtebereiche

Die zeitliche Veränderung der Koexistenz von wasser- und luftgefüllten Poren einschließlich der Phasenumwandlungsprozesse (Verdunstung, Kondensation) wird von Simulationsprogrammen durch ein Feuchtespeichermodell beschrieben. Diese realitätsnahe Modellierung bringt auch eine Schwierigkeit mit sich: Es kann nicht das gesamte in flüssiger Form vorliegende Wasser als Kondensat aufgefasst werden. Als hygroskopischen Feuchtebereich definiert man daher den Bereich von 5% - 95% relativer Luftfeuchte. An der unteren Grenze des hygroskopischen Feuchtebereichs liegen die Bindungsenergien des absorbierten Wassers in der Größenordnung der thermischen Energien. Mit zunehmendem Feuchtegehalt (und relativer Luftfeuchte) werden der Betrag der Kapillarspannung und damit die Bindungsenergien geringer. Oberhalb von 95% relativer Luftfeuchte beschleunigt sich die Abnahme der Bindungsenergien überproportional, sodass man davon ausgehen kann, dass das Wasser nun als „nahezu“ freies bzw. frei bewegliches Wasser vorliegt (vergleiche auch *DIN 15148*). Das freie Wasser im Porensystem bezeichnet man auch als überhygroskopische Feuchte oder Kondensat bzw. Tauwasser, das stärker absorbierte Wasser nennt man hygroskopische Feuchte. Die Grenze zwischen beiden Feuchtebereichen wird durch den maximalen hygroskopischen Feuchtegehalt θ_{95} definiert. Oft wird auch der praktische Feuchtegehalt θ_{80} bei einer relativen Luftfeuchte von 80% als Materialparameter angegeben (siehe Abbildung 3.8).

Feuchte-speicherfunktion

Während im hygroskopischen Bereich die Feuchtespeicherfunktion mit Salzlösungen ermittelt wird, wird sie im überhygroskopischen Bereich üblicherweise mit Hilfe von Druckplattenapparaturen bestimmt (siehe Abschnitt 2.4.3). Die gesamte Feuchtespeicherfunktion wird deshalb zweckmäßig in den hygroskopischen Bereich, die Sorptionsisotherme, und den überhygroskopischen Bereich, die Saugspannungskurve, unterteilt. Letztere wird nicht über der relativen Luftfeuchte sondern über dem Kapillardruck aufgetragen (siehe Abbildung 3.8).

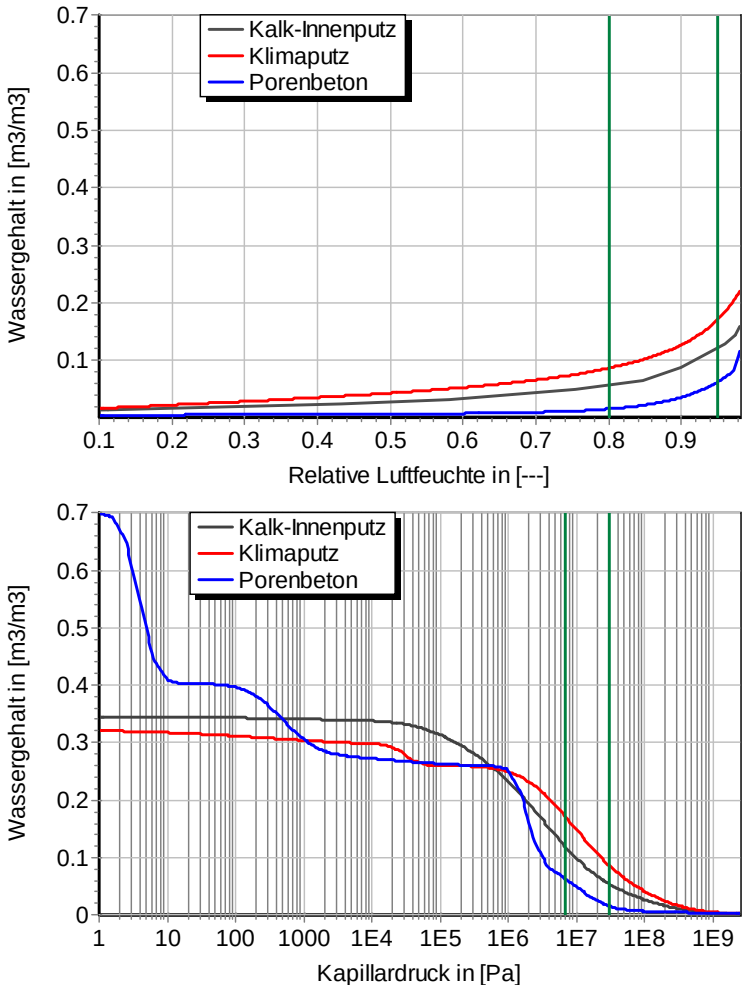

Abb. 3.8: Materialfunktionen verschiedener Materialien im Vergleich: oben Sorptionsisothermen, unten Saugspannungskurven. Die senkrechten Linien entsprechen jeweils 80% und 95% Luftfeuchte. Zusammen ergeben Sorptionsisotherme und Saugspannungskurve die Feuchtespeicherfunktion.

Zeitlicher Verlauf der Transportprozesse

Die Bewertung von Umfassungskonstruktionen mit Hilfe der Simulation bildet den zeitlichen Verlauf der Transport- und Akkumulationsprozesse bezüglich Wärme und Feuchte ab. Diese Prozesse laufen unter dem Einfluss von definierten, sich üblicherweise zyklisch wiederholenden Klimabedingungen ab. Für die Simulationen ist die Festlegung von Anfangsbedingungen notwendig. In den vorliegenden Simulationen wurden eine relative Luftfeuchte von 80% und eine Temperatur von 10°C vereinbart. Der Anfangsfeuchtegehalt der Materialien entspricht dann dem praktischen Feuchtegehalt θ_{80}.

Soll eine Konstruktion mit einer erhöhten Anfangsfeuchte berechnet werden, z.B. durch Einbaufeuchte verursacht, muss im Zuge der Auswertung das erste bzw. müssen die ersten Jahre gesondert betrachtet werden. Diese Anfangssituation kann nicht durch stationäre Verfahren abgebildet werden.

Bei der Ergebnisdarstellung ist zu beachten, dass die Profile oder Kurvenverläufe nicht aller Dämmvarianten abgebildet werden können. Die kritischste Dämmvariante ist jeweils im Schaubild zu sehen, fehlende Varianten werden jeweils am Ende der Besprechung kurz schriftlich beurteilt.

Kondensatmengen ohne Schlagregeneinfluss

Die DELPHIN-Ausgabe in Abbildung 3.9 zeigt ausgehend vom Anfangszustand die zeitliche Veränderung der integralen Feuchtemasse bzw. die jährlichen Kondensations- und Trocknungszyklen. Der Verlauf der integralen Feuchtemenge vermittelt einen Eindruck, wie schnell sich eine Konstruktion auf äußere Einflüsse einstellt. Aufbauten mit leichten, diffusionsoffenen Materialien reagieren im Allgemeinen schneller als massive, diffusionsdichte Konstruktionen. Die Einschwingdauer, d. h. die Zeitdauer, bis sich die integrale Feuchtemasse von Jahr zu Jahr nicht mehr ändert, ist in obigem Beispiel schon im dritten Jahr erreicht. Es ist aber möglich, dass dieser Vorgang noch nach 30 Jahren, der maximal durchgeführten Simulationsdauer, nicht vollständig abgeschlossen ist. Durchschnittlich niedrigere integrale Feuchtemengen im Vergleich zum Anfangszustand deuten auf eine geringere Feuchtebelastung hin. Allerdings kann erst die Untersuchung der örtlichen Verteilung der Feuchte in Verbindung mit den Materialfunktionen klären, ob wirklich von einer Schadensfreiheit ausgegangen werden darf.

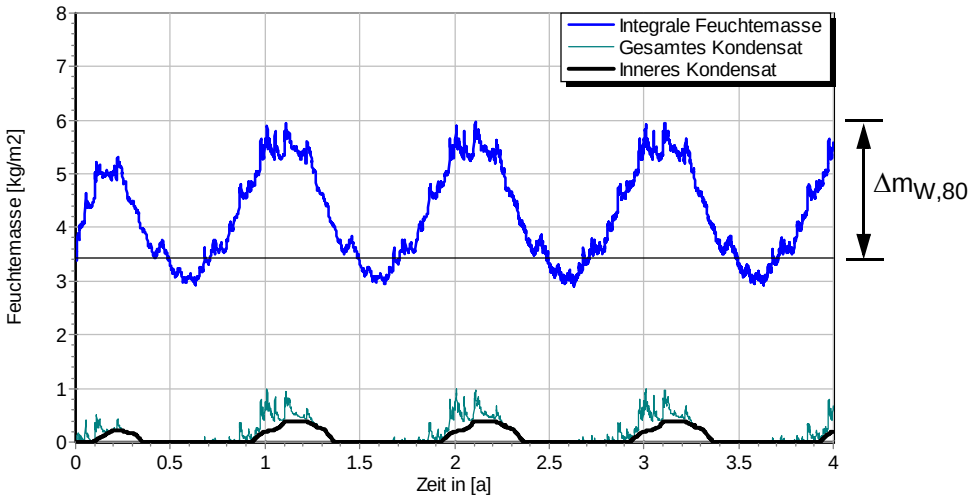

Abb. 3.9: Beispielwandaufbau in Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss: Verlauf der integralen Feuchtemasse, des gesamten und inneren Kondensats mit 80 mm Dämmung

Tab. 3.7: Ergebnistabelle für Beispielwandaufbau in Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss

Ohne Schlagregen (Nord)	**Symbol**	**Einheit**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m^2	0,727	1,800	2,200	2,527
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m^2	0,0	0,166	0,270	0,398

Zur Orientierung wird die Differenz zwischen der Wassermenge am Anfang der Simulation und der maximal auftretenden Wassermenge ($\Delta m_{w,80}$) im einge-

schwungenen, quasi-stationären Zustand angegeben. Dass diese Werte bei verschiedenen Konstruktionen zum Teil stark voneinander abweichen, liegt hauptsächlich an dem unterschiedlichem Speicherverhalten der Materialien: Massive Konstruktionen oder poröse Materialien vermögen mehr Wasser zu speichern als dünne Wände bzw. dichte Baustoffe.

Die grünblaue Linie in Abbildung 3.9 gibt den Verlauf der gesamten Kondensatmenge wieder. Sie beinhaltet auch Kondensat, das sich durch die nächtliche Auskühlung in den äußeren Schichten bildet (langwellige Abstrahlung). Das innere Kondensat (dicke schwarze Linie) bezeichnet dagegen nur Kondensat in den innen liegenden Schichten, d.h. im Innendämmsystem, dem alten vorhandenen Putz und der inneren Ziegel- oder Steinschicht. Sollte der Wandbildner nur aus einer Steinschicht oder beispielweise aus Beton bestehen, umfasst das innere Kondensat nur das „freie Wasser“ in der inneren Hälfte des Wandbildners, also beispielsweise in der inneren Hälfte der Ziegelschicht. In Tabelle 3.7 sind die maximalen inneren Kondensatmengen dokumentiert. Bei Simulationen ohne Schlagregeneinfluss kann der Wert der inneren Kondensatmenge $m_{W,T,int}$ gut mit dem Grenzwert der *DIN 4108-3* verglichen werden.

Kondensatmengen mit Schlagregeneinfluss

Abbildung 3.10 gibt die Feuchtemengen mit Schlagregeneinfluss einer nach Westen ausgerichteter Fassade wieder. Die Kurven setzen sich deutlich von den Verläufen ohne Schlagregeneinfluss ab. Das Gros des eindringenden Regens wird in der äußeren Schicht gespeichert. Der extreme Anstieg am 15. Januar wird durch ein Regenereignis bei Temperaturen über 0°C verursacht. Eine höhere Feuchte verursacht nicht nur eine höhere Wärmeleitfähigkeit sondern auch eine höhere Flüssigwasserleitfähigkeit, sodass mehr eindringender Schlagregen schneller zur inneren Steinhälfte gelangt. Trotz der hohen Schlagregenbelastung trocknet der innere Bereich des Wandaufbaus im Sommer wieder aus. Eine Phase mit häufigen Regenfällen Ende November führt einen weiteren charakteristischen Anstieg herbei.

Bei den Maximalwerten des inneren Kondensats ist hier der Umstand berücksichtigt, dass auch in die unsanierte Konstruktion Schlagregen bis tief in die Konstruktion eindringen kann. Die orangenfarbene Linie in Abbildung 3.10 kennzeichnet daher den Maximalwert bei der unsanierten Variante, der nur 0,141 kg/m^2 beträgt. Weil aber nur die Feuchtemenge erfasst werden soll, die zusätzlich durch das Dämmsystem verursacht wird, wird der Kondensat-Maximalwert der unsanierten Variante jeweils von dem Maximalwert der sanierten Variante abgezogen und in die Tabelle eingetragen. Die inneren Kondensatmengen aller unsanierten Varianten sind im Anhang aufgeführt.

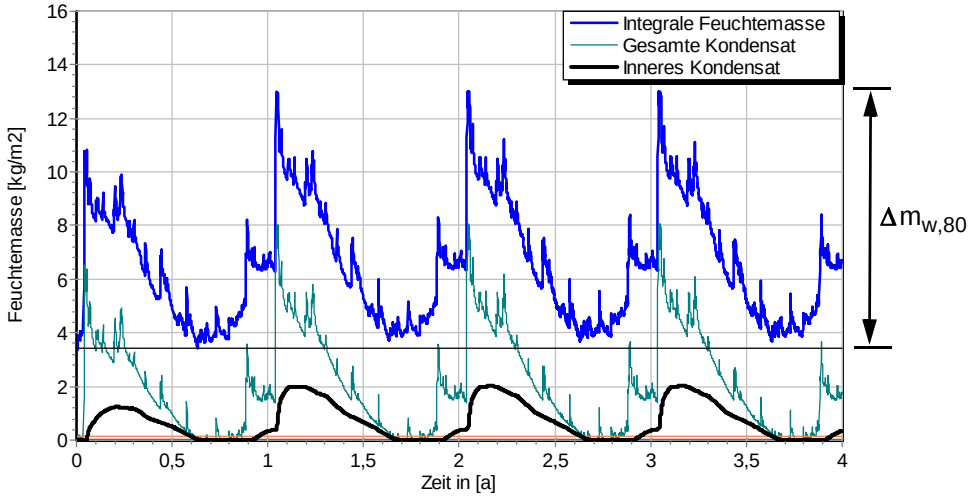

Abb. 3.10: Beispielwandaufbau in Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss: Verlauf der integralen Feuchtemasse, des gesamten und inneren Kondensats mit Schlagregen mit 80 mm Dämmung. Maximale innere Kondensatmenge der unsanierten Variante in orange.

Tab. 3.8: Ergebnistabelle für Beispielwandaufbau in Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss

Schlagregenexponiert (West)	**Symbol**	**Einheit**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Differenz zwischen Anfangsfeuchte (80%) und maximaler Feuchte	$\Delta m_{W,80}$	kg/m^2	6,701	8,426	9,021	9,574
Maximales inneres Kondensat	$m_{W,T,int}$	kg/m^2	0,141	1,090*	1,628*	2,012*

Beim Vergleich mit Abbildung 3.9 fällt auf, dass trotz eines gemäß *DIN 4108-3* immerhin wasserhemmenden Kalkzementputzes die Feuchtemengen mit Schlagregeneinfluss sehr viel größer sind: Die integrale Feuchtemasse ist kurzzeitig mehr als doppelt so hoch, die maximale gesamte Kondensatmenge (jeweils türkisfarbene Linie) summiert sich mit 8 kg/m^2 zum ungefähr achtfachen und die maximale innere Kondensatmenge beträgt zeitweise um 2,0 kg/m^2! Bei der Einschätzung der Feuchtemengen sollten jedoch folgende Punkte noch einmal in Erinnerung gerufen werden:

- In den Simulationen mit schlagregenexponierten Wandaufbauten wird immer die Ausrichtung mit der höchsten Schlagregenmenge gewählt, zusätzlich wird ein sehr hoher Übergangskoeffizient angeordnet.
- In Gebieten mit einer Schlagregenbeanspruchungsgruppe III (über 800 mm/a) empfiehlt die *DIN 4108-3* die Applikation eines wasserabweisenden statt eines wasserhemmenden Putzes.
- Bei einlagigen Konstruktionen (Breite des Wandbildners bei Ziegel 250 mm/ 240 mm, bei Kalksandstein 175 mm) gelangt eindringender Schlagregen relativ schnell in den „Bereich des inneren Kondensats“.
- Durch die Verwendung der Desorptionskurve bei der Feuchtespeicherung

(siehe Abschnitt 2.4.3) wird immer die maximal mögliche Menge an Kondensat ausgewiesen.

- Da immer die Speicherfunktionskurve mit dem maximalen Wassergehalt verwendet wird, erhöht sich zusätzlich auch die vom Wassergehalt abhängige Flüssigwasser- sowie die Wärmeleitfähigkeit.

Im Sinne einer allgemeinen Einschätzung auf der sicheren Seite ist die Verwendung dieser Sicherheitsfaktoren sinnvoll, bei der Untersuchung eines bestimmten Objektes sollten natürlich die Faktoren bezüglich Klima und Material den örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Zum Vergleich: Eine gesättigte Ziegelwand von 250 mm Dicke kann ohne weitere Putzschichten oder Mörtel ca. 70 kg/m^2 flüssiges Wasser speichern; in Abbildung 3.10 werden ca. 8 kg/m^2 erreicht.

Bei einem ausreichenden Schlagregenschutz, beispielsweise durch geeignete Putze oder Fassadenelemente, unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen schlagregenexponierten und Simulationen ohne Schlagregen kaum. Um diesen Sachverhalt zu demonstrieren, wurde in einigen Simulationen wurde des wasserhemmenden Kalkzementputzes ein wasserabweisender Kunstharzputz angeordnet.

3.5.2 Wärmeverluste durch Transmission

Zur Bilanzierung der instationären Transmissionswärmeverluste durch das Bauteil werden die Wärmestromdichte und die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft als zeitabhängige Größen ausgewertet. Der instationäre Wärmedurchgangskoeffizient kann nach Gleichung *(3.15)* als Quotient der Wärmestromdichte q_{HP} über die Innenoberfläche und der Differenz von Innen- und Außenlufttemperatur $\theta_{i,\,HP} - \theta_{e,\,HP}$ definiert werden. Dabei fließen jeweils die zeitlichen Mittelwerte über die Heizperiode (HP) in die Berechnung ein.

$$U_{inst,\,HP} = \frac{q_{HP}}{\theta_{i,\,HP} - \theta_{e,\,HP}} = \frac{\int_{HP} q(t) \cdot dt}{\int_{HP} (\theta_i - \theta_e) \cdot dt} \qquad (3.15)$$

Die Summe aus den Wärmeübergangswiderständen nach *DIN 6946* und dem Wärmedurchlasswiderstand entspricht dem reziproken U-Wert. Damit erhält man den instationären Wärmedurchlasswiderstand $R_{inst,HP}$ während der Heizperiode:

$$R_{inst,\,HP} = \frac{1}{U_{inst,\,HP}} - R_{si} - R_{se}\,. \qquad (3.16)$$

Für die Bestimmung einer durchgehenden Heizperiode wird zunächst der Verlauf der Außentemperaturen mit einer Cosinus-Funktion approximiert (schwarze Kur-

ve in Abbildung 3.11). Analog zur Vorgabe in der *EnEV 2007* wurden als Heizgrenztemperatur in der Auswertung 10°C festgelegt. Bezogen auf die TRY-Region 13 mit dem Referenzort Passau erstreckt sich dann die Heizperiode vom 8. Oktober bis zum 29. April und umfasst insgesamt 203 Tage.

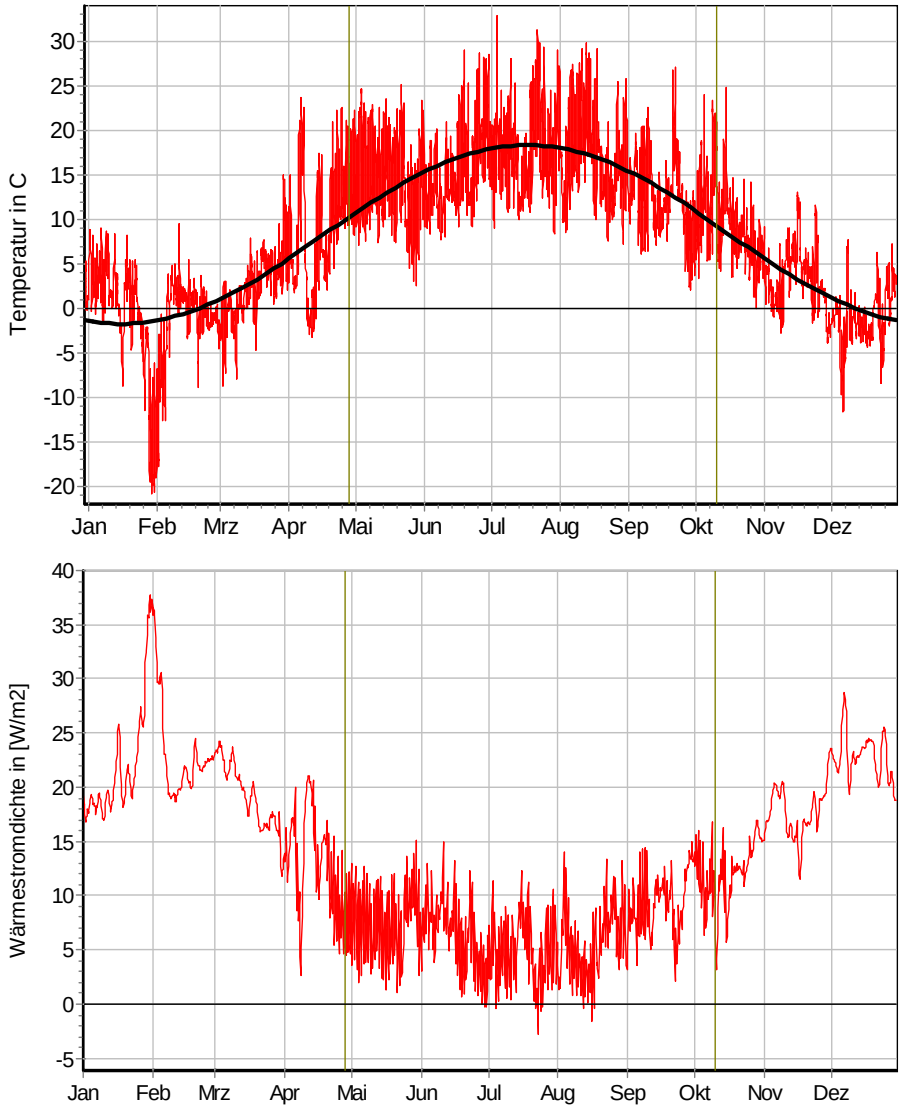

Abb. 3.11: Oben: Verlauf der Außentemperatur, approximiert durch eine Cosinus-Funktion. Unten: Jahresverlauf der Wärmestromdichte über die Wandinnenoberfläche (Nordausrichtung). Die vertikalen, ockerfarbenen Linien kennzeichnen den Anfang und das Ende der Heizperiode, 8. Oktober bis 29. April.

Neben der direkten Berechnung des U-Wertes aus den Wärmestromdichten ergeben sich zusätzliche Vorteile des instationären Verfahrens: Neben den bei schweren Wänden relevanten Wärmespeichervorgängen, der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit und solaren Gewinnen wird auch die langwellige Abstrahlung als Effekt mit berücksichtigt. Außerdem besteht die Möglichkeit, regionsspezifische Klimadaten zu berücksichtigen. Der instationäre U-Wert gibt

somit eine genauere Auskunft über die tatsächlich zu erwartende Größe der Transmissionswärmeverluste.

Tab. 3.9: Tabelle mit den mittleren Wärmestromdichten und den berechneten U- und R-Werten während der Heizperiode vom 29. April bis 8. Oktober

Ohne Schlagregen (Nord)	**Symbol**	**Einheit**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Mittlere Wärmestromdichte (Heizperiode)	q_{HP}	W/m^2	34,90	18,73	14,41	10,68
Instationärer Wärmedurchgangskoeffizient	$U_{inst,HP}$	$W/m^2 \cdot K$	1,98	1,06	0,82	0,61
Instationärer Wärmedurchlasswiderstand	$R_{inst,HP}$	$m^2 \cdot K/W$	0,34	0,77	1,05	1,48

Die so ermittelten Werte für den Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmedurchlasswiderstand weichen von den Ergebnissen der vereinfachten stationären Verfahren ab (siehe Tabellen 3.4 und 3.5), wobei sich die auf die DIN-Werte bezogene prozentuale Änderung mit der Dicke der Dämmschicht vergrößert. Ein direkter Vergleich zeigt, dass für den Beispielwandaufbau eine Erhöhung des U-Wertes um 4.2%, 6.0%, 6.5% und 7.0% für die unsanierte Variante und die Dämmvarianten 30/50/80 mm zu verzeichnen ist.

3.5.3 Mikroklima auf der Innenwandoberfläche

Temperatur und Feuchte auf Wandoberfläche

Das wandnahe Mikroklima, d.h. die zeitlichen Verläufe von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf der Innenwandoberfläche, lässt sich mit Hilfe der hygrothermischen Simulation berechnen. Aus der Kenntnis des Mikroklimas auf der Innenwandoberfläche kann dann auf die Gefahr einer Auskeimung von Schimmelpilzen geschlossen werden, da ein „günstiges“ Mikroklima eine notwendige Bedingung für das Schimmelwachstum darstellt.

Die Kurven der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf der Wandoberfläche in Abbildung 3.12 lassen auch eine Einschätzung zu, ob durch einen geringen Wärmedurchlasswiderstand von Wand- oder Dachaufbauten ein thermischer Diskomfort zu erwarten ist. Bis zu drei Kelvin Differenz zwischen Raumlufttemperatur und der Temperatur der Raumumschließungsfläche gelten als optimal, bis zu fünf Kelvin Differenz - dies wäre bei einer Raumtemperatur von 20°C eine Wandoberflächentemperatur von 15°C - werden als erträglich eingestuft (*Roloff 2007*).

Einfluss der Wandausrichtung

Meistens ist die Situation in Gebäudewinkeln oder anderen konstruktiven Details kritischer als im ungestörten Bereich. Deshalb wird der Bereich des Gebäudewinkels analysiert. Hier ist der kritischste Fall der Nordwestwinkel: Die Ausrichtung mit der niedrigsten Sonneneinstrahlung trifft dort auf die Fassade mit der höchsten Schlagregebelastung. Aus Abbildung 3.13 lässt sich entnehmen, dass es im Winkel zur Auskeimung von Schimmelpilzsporen kommen würde, bedingt durch den geringen Wärmewiderstand von 30 mm Dämmung, wegen der geometrischen Wärmebrücke und auf Grund des niedrigeren Übergangskoeffizien-

ten, reichen die 30 mm dicken Dämmplatten eindeutig nicht aus, um Feuchteschäden zu verhindern (Abbildung 3.13).

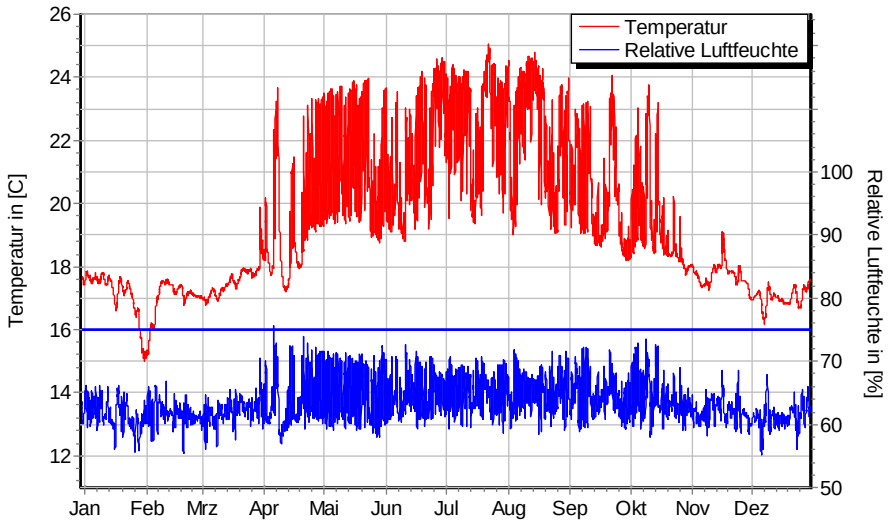

Abb. 3.12: Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf der Wandinnenoberfläche mit 30 mm Dämmung (blaue Linie bei 75% relativer Luftfeuchte, Nordausrichtung, ohne Schlagregen)

Auf bauüblichen Materialien kann erst ab einer Luftfeuchte von $\varphi_{si} = 75\%$ Schimmelpilzwachstum (*WTA-Merkblatt 6-3-05*) auftreten. Die zusätzlich abgebildete Gerade bei 75% Luftfeuchte in Abbildung 3.12 dient deshalb der Orientierung. Für die Bewertung des Schimmelpilzrisikos ist es zunächst ausreichend, den Verlauf der relativen Luftfeuchte auf Überschreitungen des 75%-Wertes zu überprüfen. Ist das nicht der Fall, kann, nur für die untersuchte Fläche bzw. Position, Schimmelgefahr unter den angenommenen Nutzungsbedingungen ausgeschlossen werden.

Vergleich mit Isoplethen für Schimmelpilze

Wird der Grenzwert von $\varphi_{si} = 75\%$ überschritten, ist der Temperaturverlauf mit in die Bewertung einzubeziehen, da Auskeimung und Wachstum von Schimmelpilzen auch stark von der Temperatur abhängig sind. In Abbildung 3.13 ist deshalb der Jahresverlauf der relativen Luftfeuchte über der Temperatur aufgetragen worden. Jedes Kreuz stellt einen Zwölf-Stunden-Mittelwert des Wertepaares Luftfeuchte über Temperatur dar. Dieser Zeitintervall wurde gewählt, weil kürzere Überschreitungen der Grenze für Keimung normalerweise noch kein Schimmelpilzwachstum verursachen können.

Die durchgezogenen Linien in Abbildung 3.13, die Isoplethen, stellen Grenzwerte für die Auskeimung dar. Isoplethen sind Linien gleichen Wachstums und gestatten eine Einschätzung, wie wahrscheinlich die Auskeimung von Schimmelpilzen auf der Wandoberfläche ist. Würden sich zum Beispiel die kombinierten Werte von Temperatur und Luftfeuchte länger als 16 Tage genau auf dem Isoplethen

für Auskeimung nach 16 Tagen bewegen (Abbildung 3.13, schwarze Linie), würde es tatsächlich zu einer Auskeimung kommen.

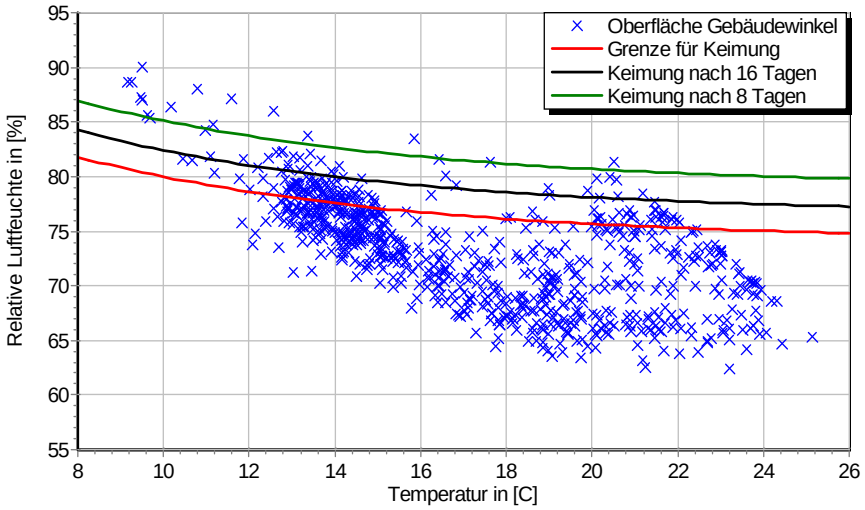

Abb. 3.13: Beispielkonstruktion mit 30 mm Dämmung: Temperatur- und Luftfeuchtewerte im Gebäudewinkel (Nordwestwinkel, mit Schlagregen) gegen Isoplethen (Linien gleichen Wachstums) aufgetragen.

Nach der Auswertung der Simulationen mit den verschiedenen Dämmdicken wird deutlich, dass erst eine 50 mm dicke Wärmedämmung (Abbildung 3.14) eine ausreichende Sicherheit gegen organisches Schädlingswachstum bietet. Die Grenze für Keimung (LIM) wird zwar mehrere Male überschritten, jedoch ist die Dauer der Überschreitungen nicht ausreichend für das Auskeimen von Schimmelpilzen.

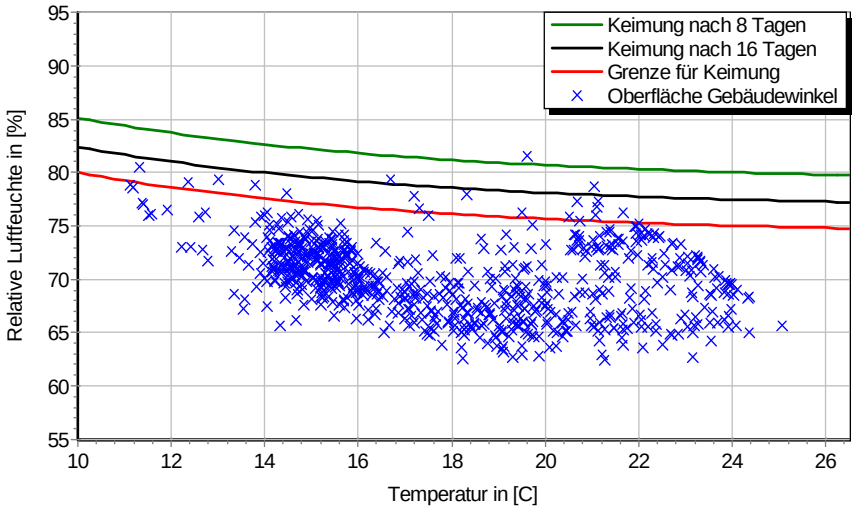

Abb. 3.14: Beispielkonstruktion mit 50 mm Dämmung: Temperatur- und Luftfeuchtewerte im Gebäudewinkel (Nordwestwinkel, mit Schlagregen).

3.5.4 Temperatur- und Feuchteprofile, Frost-Tauwechsel

Neben den bauphysikalischen Verhältnissen auf Innenwandoberflächen sind auch die Verteilungen der Feuchte und Temperatur im Wandquerschnitt von Interesse. Die Abbildungen der Temperatur- und Luftfeuchteprofile zeigen charakteristische Verteilungen, die im Jahresverlauf auftreten. Dazu gehören die maximalen, minimalen und die durchschnittlichen Profile. Bei der Darstellung der Temperatur- und Luftfeuchteprofile deuten die vertikalen schwarzen Striche die Grenzen der Materialschichten an.

Temperaturprofile

In Abbildung 3.15 sind die im Jahresverlauf maximalen und minimalen Temperaturprofile dargestellt. Zusätzlich ist auch das minimale Temperaturprofil der ungedämmten Variante in oranger Farbe eingefügt. Der Vergleich der minimalen Temperaturprofile vor und nach Anbringung einer Innendämmung verdeutlicht die Temperaturerhöhung auf der neuen inneren Wandoberfläche und die Temperaturabsenkung in der bestehenden Wandkonstruktion. Die Auskühlung der Wandkonstruktion kann zu einer Verminderung des Trocknungspotentials führen und die Frostgefahr erhöhen.

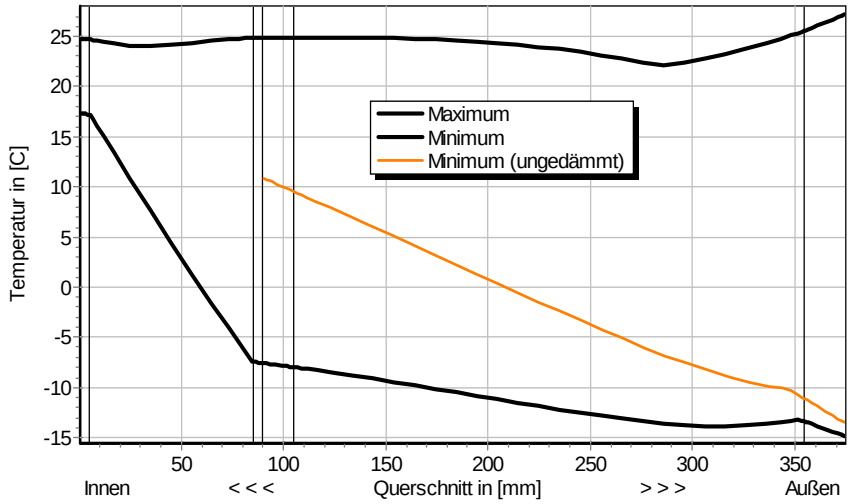

Abb. 3.15: Beispielkonstruktion (80 mm Dämmung, Nordseite, ohne Schlagregen): Minimale und maximale Temperaturen sowie die minimalen Temperaturen der ungedämmten Wand in orange

Zwischen Simulationen mit und ohne Einwirkung von Schlagregen sind beim Temperaturprofil meistens nur marginale Unterschiede auszumachen, weswegen meistens (Ausnahme: Teil II Wandaufbauten 6.5 und 6.6) nur die nach Norden ausgerichtete Wand ohne Schlagregen abgebildet wird.

Luftfeuchteprofile

Die Feuchteprofile in Abbildung 3.16 werden als Profile der relativen Luftfeuchte ausgewiesen. Anhand des Feuchteprofils wird illustriert, wie weit sich die Feuchte der Innenoberfläche nähern kann, was gemeinhin als „Durchschlagen“ bezeichnet wird. Das durchschnittliche Profil gewährt eine Einschätzung, ob sich

die relative Luftfeuchte vornehmlich am maximalen oder minimalen Profil bewegt.

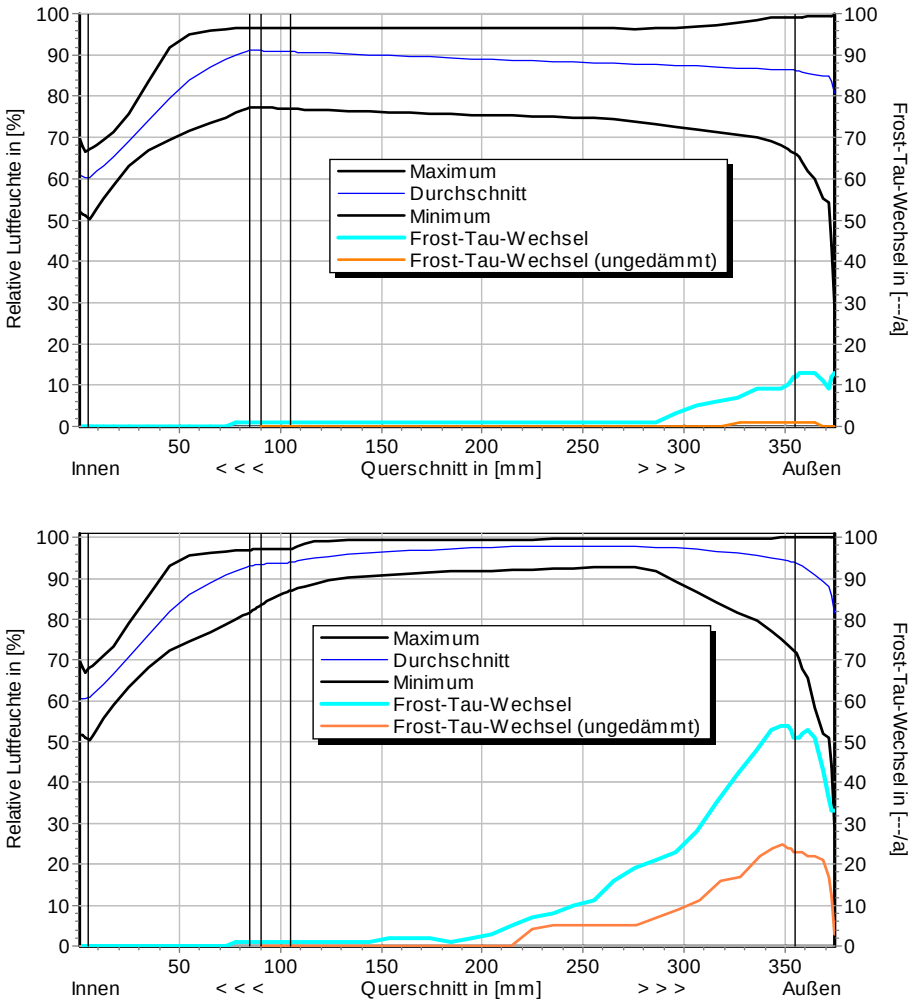

Abb. 3.16: Beispielkonstruktion (80 mm Dämmung, Westseite): Charakteristische Luftfeuchteprofile im Verlauf eines Jahres sowie das Profil der Frost-Tau-Wechsel, Oben: ohne Schlagregen, Unten: mit Schlagregen

Die Luftfeuchteprofile zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Simulationen mit und ohne Schlagregeneinfluss. Bei dem Vergleich der zeitlichen Verläufe der integralen Feuchtemassen (Abbildungen 3.9 und 3.10) war bereits absehbar, dass die Luftfeuchteprofile mit Schlagregeneinfluss höher liegen werden. Abbildung 3.16 illustriert, dass bei sehr hohem Schlagregeneintrag der gesamte Mauerwerksziegel immer wieder hoher Feuchte über 95% ausgesetzt wird. Zur kapillaraktiven Innendämmung hin fällt das Feuchteniveau zunächst leicht, in der Innendämmung dann jedoch stetig ab.

Frost-Tauwechsel

Das Profil mit der Anzahl der jährlichen Frost-Tau-Wechsel (FTC) ist in das Schaubild der Luftfeuchteprofile integriert. Die Berechnung der jährlichen FTC erfolgt durch Auswertung der Temperatur und Wassergehaltsprofile. Dazu wird

zunächst die Gefrierpunkttemperaturabsenkung nach dem Modell von *Xu 1999* in Abhängigkeit vom Wassergehalt berechnet. Unterschreitet die Temperatur an einem Punkt die Gefrierpunkttemperatur und steigt dort später wieder über 0°C wird dies als ein Frost-Tau Wechsel registriert.

Die FTC müssen sich im Falle einer Innendämmung nicht zwangsweise ausschließlich nahe der Außenoberfläche befinden. Bereits auf der kalten Seite der Dämmschicht kann es zu einem höheren Feuchtegehalt kommen, sodass bei gleichzeitig niedrigen Temperaturen auch dort FTC prinzipiell möglich sind, wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist. Nahe der Oberfläche sind die strukturellen Voraussetzungen für Materialabsprengungen gegeben, z. B. durch den geschwächten Verbund des Deckputzes mit der darunter liegenden Schicht oder durch schon vorhandene, kleinere Risse. Sinnvoll ist bei den Frost-Tau-Wechseln ist der Vergleich mit anderen Sanierungsvarianten, welcher eine Einschätzung gestattet, inwieweit durch die Baumaßnahme die Gefahr von Frostschäden *potentiell* erhöht wird.

3.5.5 Belastungskennzahlen für biologische Schädigung

Die Sicherung einer wirtschaftlich sinnvollen Nutzungsdauer von Gebäuden beinhaltet auch die Vermeidung von Schäden durch biologischen Befall (Schimmelpilze, Schwämme, Algen, Flechten). Die Kenntnis von Feuchte- und Temperatur als orts- und zeitabhängige Größen kann in diesem Zusammenhang nützliche Anhaltspunkte liefern. Der Grundgedanke besteht darin, notwendige physikalische Bedingungen für das Entstehen von Schäden auszuschließen oder zu reduzieren, um die Schadenswahrscheinlichkeit zu senken. Durch vergleichende Analyse von Konstruktionsvarianten sollen die Schadensrisiken minimiert werden. Dazu war es notwendig, neue Belastungskennzahlen einzuführen.

Pilzbefall, Hausschwamm

Bei organischen Materialien, wie Holz oder Holzwerkstoffen, wurden die Bedingungen untersucht, unter denen die Baustoffe in der Konstruktion mit zerstörenden Organismen, allen voran der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*), befallen werden können. Der Echte Hausschwamm gilt wegen seiner Verbreitung, Zähigkeit und wegen seines Zerstörungspotentials als gefährlichster und effektivster biologischer Schädling. Gleichzeitig sind seine Anforderungen an die Baufeuchte vergleichsweise gering. Leider existieren für den Echten Hausschwamm derzeit noch keine vergleichbaren Untersuchungen wie für das Schimmelpilzwachstum auf Wandoberflächen. Jedoch bestehen auch für diesen Schädling limitierende Faktoren für Auskeimung und Wachstum. Durch die Auswertung des Feuchteangebotes und der Temperatur können Kenndaten ermittelt werden, der einen qualitativen Vergleich verschiedener Varianten zulassen.

Die Angaben, ab welcher Temperatur das Wachstum von Echtem Hausschwamm beginnt, schwanken zwischen 3°C und 5°C (*Sutter 2007, Colling 2000, Müller 2005*). Für den Feuchtegehalt in Bauholz wird häufig angegeben, dass 20 Massenprozent langfristig nicht überschritten werden sollten (*Mönck &*

Erler 2004, DIN 68800-3, WTA 8-1-03). Dabei handelt es sich allerdings um einen Wert auf der sicheren Seite, der nur gültig ist, wenn schon ein großer Bereich befallen wurde und der Pilz seine „eigene Wasserversorgung“ aufbauen konnte. Dagegen muss für das anfängliche Auskeimen und auch für die eigentliche Zerstörung des Holzes der Fasersättigungspunkt des Holzes erreicht sein (*Sutter 2007, Colling 2000, Müller 2005*). Dieser bewegt sich bei bauüblichen Hölzern zwischen 28 und 30 Masseprozent. Der Belastungskennwert $t_{PGV,\,20}$ bzw. $t_{PGV,\,26}$ (PGV = Possible Growth of Vermins/mögliches Schädlingswachstum) summiert deshalb die Zeit auf, bei welcher der Wassergehalt des organischen Materials in der Konstruktion über 20 bzw. 26 Masseprozent liegt und gleichzeitig eine Temperatur über 2°C gegeben ist.

$$t_{PGV,\,XX} = Dauer((w > XX\,\%) \wedge (\theta > 2°C)) \qquad (3.17)$$

Für die Auskeimung von biologischen Schädlingen ist die Zeitspanne besonders wichtig, in der die Voraussetzungen für Keimung durchgängig gegeben sind. Deshalb wird mit $t_{PGV,\,20,\,max}$ bzw. $t_{PGV,\,26,\,max}$ auch die jährliche, maximale Zeitdauer angegeben, in der die Grenzwerte für Wassergehalt und Temperatur durchgehend überschritten werden.

$$t_{PGV,\,XX,\,max} = MaxDauer((w > XX\,\%) \wedge (\theta > 2°C)) \qquad (3.18)$$

Die Verwendung einer solchen Belastungskennzahl hat Vorteile: Da die Information über die zeitliche und örtliche Verteilung von Feuchte w und Temperatur θ zur Verfügung steht, kann die Auswertung von *(3.17)* und *(3.18)* auf besonders kritische Punkte in der Konstruktion, z.B. Anschlussdetails, fokussiert werden. Allerdings gibt es auch Einschränkungen: Die Belastungskennzahl t_{PGV} charakterisiert lediglich physikalische Belastungsgrößen. Sie beinhaltet keine Informationen über die materialspezifische Anfälligkeit für Pilze und Schwämme; es wird z.B. nicht zwischen verschiedenen Holzsorten oder anderen organischen Materialien unterschieden und chemischer oder sonstiger Schädlingsschutz wird nicht berücksichtigt.

Pilze, Algen und Flechten

Mit der Erhöhung der Wärmedämmstandards kann verstärkt biologisches Wachstum auf Außenoberflächen in Form von Pilzen, Algen und Flechten registriert werden. Die durch die Wärmedämmung und die langwellige Abstrahlung bedingten, niedrigeren Temperaturen in den äußeren Schichten führen dort zu erhöhten Luftfeuchten und häufigerer Unterschreitung der Taupunkttemperatur. Dieser Effekt wird durch das geringere Wärmespeichervermögen von dünnen, äußeren Putzschichten bei WDVS-Systemen begünstigt. Nutznießer sind die genannten biologischen Organismen, deren Wachstumsbedingungen durch die höhere Feuchte verbessert werden. Auf diesen Zusammenhang weist inzwischen

eine Reihe von Veröffentlichungen hin, die diese Problematik untersuchen: z. B. *Fitz et al. 2007* oder *Raschle & Büchli 2006* oder *Venzmer et al. 2008*.

Für die Abschätzung der Neigung einer Konstruktion zu Pilz- und Algenbefall kann die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche Hinweise liefern.

$$t_{cond,\,e} = Dauer\Big((\varphi_{se} > 98\ \%) \wedge (\theta_{se} > 0°C)\Big) \qquad (3.19)$$

Sie erlaubt einen Vergleich der Wahrscheinlichkeit von biologischem Wachstum bei verschiedenen Konstruktionsvarianten: Je länger frei verfügbares Wasser vorhanden ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Algen, Pilze oder Flechten auftreten. Die kumulierte Kondensationsdauer beinhaltet deshalb die Zeitspanne, bei der die relative Luftfeuchte über 98% und gleichzeitig die Temperatur über 0°C verläuft.

3.5.6 Belastungskennzahlen für mechanische Schädigung

Die Sicherung einer wirtschaftlich sinnvollen Nutzungsdauer von Gebäuden beinhaltet auch die Vermeidung von Schäden durch mechanische Belastungen infolge klimatischer Einflüsse (Verwitterung, Rissbildung). Der Bewertung liegt die Vorstellung zu Grunde, dass sowohl zeitliche als auch örtliche Änderungen von Feuchte und Temperatur zur mechanischen Schädigung beitragen können. Zeitliche Änderungen bewirken hygrisches Quellen und Schwinden und thermische Dehnungen. Dadurch kann es selbst bei nicht starr verbundenen Materialschichten zu Spannungsaufbau im Porengefüge kommen. Mikrorisse und Absandung können die Folge sein. Bei starr verbundenen Materialschichten (z.B. Putz auf Ziegel) sind zusätzlich die Unterschiede in den Formänderungen benachbarter Materialschichten zu beachten, die sich für die Induktion von Scherspannungen verantwortlich zeichnen. Auch innerhalb einer homogenen Materialschicht können Scherspannungen auf diese Weise erzeugt werden, was zum Abriss von Schichten führen kann. Aus diesem Grund werden neben den Zustandsgrößen Feuchte und Temperatur auch deren Gradienten im oberflächennahen Bereich in die Auswertung einbezogen.

Die hygrothermischen Verwitterungs- und Rissinduktionsbelastungskennwerte sind ein Maß für die durch Temperatur- und Feuchteänderungen hervorgerufenen mechanischen Zerstörungen der äußeren Materialschichten. Dafür werden die Kurvenlängen von Temperatur, Luftfeuchte oder Wassergehalt bzw. deren Gradienten im Oberflächenbereich aufsummiert. Das heißt, die Wegstrecke, die z. B. der Temperaturverlauf in einem Jahr zurücklegt, wird hierfür mit berücksichtigt. Dabei werden sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der „Temperaturschwingung“ erfasst. Ein Temperaturverlauf mit großen Differenzen zwischen Tageshöchst- und den tiefsten Temperaturen in der Nacht oder mit häufigeren Temperaturwechseln führt zu einer größeren Kurvenlänge als gleichmäßigere

Oberflächentemperaturen. Bei diesen Belastungskennzahlen wurde das Intervall für die Ausgabezeitschritte einheitlich auf eine Stunde festgelegt. Alle ermittelten Kurvenlängen werden jeweils auf die unsanierte Variante bezogen und in Prozent ausgedrückt.

Bei mechanischen Belastungskennzahlen wird immer der Bezug auf die jeweilige unsanierte (vorhandene) Konstruktion hergestellt. Auf diese Weise können Sanierungsvarianten mit unterschiedlichen Materialien bzw. Dämmsystemen verglichen werden. Aufbauten mit unterschiedlichen Wandbildnern, z.B. Kalksandstein und Ziegel, lassen sich hingegen nicht vergleichen.

Verwitterung

Die hygrothermischen Witterungsbelastungskennzahlen, WL_θ und WL_w (WL = Weathering Load) integrieren die Kurvenlänge des jährlichen Temperatur- bzw. Wassergehaltsverlaufs auf der Außenoberfläche. Ein häufiger wechselhafter Verlauf von Temperatur und Feuchte auf der äußeren Bauteiloberfläche resultiert in einer längeren Kurve.

$$WL_\theta = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{\Delta\theta_{se,i}^2 + \Delta t_i^2} \quad \textit{thermische Witterungsbelastung} \qquad (3.20)$$

$$WL_w = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{\Delta w_{se,i}^2 + \Delta t_i^2} \quad \textit{hygrische Witterungsbelastung} \qquad (3.21)$$

$\Delta\theta_{se,i}^2$ Temperaturdifferenz über das Zeitintervall Δt_i (hier $\Delta t = 1h$)

$\Delta w_{se,i}^2$ Wassergehaltsdifferenz über das Zeitintervall Δt_i (hier $\Delta t = 1h$)

Die hygrothermische Witterungsbelastung gestattet Rückschlüsse auf die Häufigkeit und Intensität von hygrischen Quell- und Schwindvorgängen sowie thermischen Dehnprozessen.

Rissinduktion

Die hygrothermischen Rissinduktionsbelastungskennzahlen CIL_θ und CIL_φ (CIL = Crack Induction Load/Rissinduktionsbelastung) integrieren die Kurvenlänge des jährlichen Verläufen der Temperatur- bzw. Wassergehaltsunterschiede in den oberflächennahen Bereichen.

$$CIL_\theta = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{(\Delta(\overline{\theta_{se,i}} - \overline{\theta_{xmm,i}}))^2 + \Delta t_i^2} \qquad (3.22)$$

$$CIL_\varphi = \sum_{i=1}^{8760} \sqrt{(\Delta(\overline{\varphi_{se,i}} - \overline{\varphi_{xmm,i}}))^2 + \Delta t_i^2} \qquad (3.23)$$

$\Delta(\overline{\theta_{se,i}} - \overline{\theta_{xmm,i}})$ *Differenz des gemittelten Temperaturgradienten zwischen der Außenoberfläche und in x mm Tiefe über Δt_i (hier Δt= 1h)*

$\Delta(\overline{\varphi_{se,i}} - \overline{\varphi_{xmm,i}})$ *Differenz des gemittelten Luftfeuchtegradienten zwischen der Außenoberfläche und in x mm Tiefe über Δt_i (hier Δt= 1h)*

Ist beispielsweise ein Deckputz von auf einem Altbauziegel aufgebracht, wird der jährliche Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Außenoberfläche und Materialschichtgrenze bewertet. Besteht die äußerste Materialschicht beispielsweise aus einem Mauerziegel, wird der Verlauf in einer Tiefe von ungefähr 10 mm eingesetzt. Eine hohe Differenz von Temperatur und Wassergehalt in unterschiedlichen Tiefen weist auf eine erhöhte Gefahr von Ablösungen bzw. Absprengungen der obersten Materialschicht hin.

3.5.7 Belastungskennzahlen für die Beispielkonstruktion

Die Ergebnisse der Belastungskennzahlen für die Beispielkonstruktion wurden in Tabelle 3.10 für die Berechnungen ohne und mit Schlagregneinfluss zusammengefasst. Dokumentiert werden die biologischen und mechanischen Belastungskennzahlen, wie die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche und die hygrothermische Witterungs- und Rissinduktionsbelastung. Da bei der untersuchten Beispielkonstruktion keine Materialien vorliegen, welche durch organische Schädlinge wie den *Echten Hausschwamm* befallen werden könnten, bleiben die Zeilen für das mögliche Schädlingswachstum unbesetzt.

Tab. 3.10: Belastungskennzahlen für Beispielkonstruktion mit Nordausrichtung ohne Schlagregenenfluss (oben), Westausrichtung mit Schlagregenenfluss (unten)

Ohne Schlagregen (Nord)	**Symbol**	**Einheit**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche (φ_{se} > 98%)	$t_{cond,e}$	d	1	13	20	28
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_θ	%	100	97,4	96,8	96,3
	WL_w	%	100	92,6	88,3	84,0
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_θ	%	100	103,9	103,6	103,3
	CIL_φ	%	100	97,8	97,5	96,0

Schlagregenexponiert (West)	**Symbol**	**Einheit**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Gesamte/längste Dauer möglichen Schädlingswachstums (20/26M%)	$t_{PGV,20/max}$	d	-	-	-	-
	$t_{PGV,26/max}$		-	-	-	-
Kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenoberfläche (φ_{se} > 98%)	$t_{cond,e}$	d	24	40	48	53
Hygrothermische Witterungsbelastung	WL_θ	%	100	98,1	97,5	96,4
	WL_w	%	100	105,4	107,1	108,7
Hygrothermische Rissinduktionsbelastung	CIL_θ	%	100	98,3	97,2	96,2
	CIL_φ	%	100	106,4	109,1	109,2

Diskussion der Ergebnisse

Tabelle 3.10 dokumentiert deutlich, wie die kumulierte Kondensationsdauer auf der Außenwandoberfläche sowohl ohne als auch mit Regenbelastung mit der Dämmstoffdicke zunimmt. Die Innendämmung führt zu einer kälteren Außenoberfläche, die häufiger den Taupunkt unterschreitet, obwohl die massive Wandkonstruktion außen liegt. Bei einer Außendämmung mit geringer äußerer Wärmekapazität dürfte dieser Effekt noch etwas größer sein.

Die hygrothermische Witterungsbelastung der Variante ohne Schlagregen entwickelt sich dagegen positiv. Die Temperatur- und Feuchteamplituden auf der Wandoberfläche nehmen mit zunehmender Dämmstoffdicke ab. Besonders die Feuchteschwankungen werden kleiner. Insgesamt sind die Änderungen der mechanischen Belastungskennzahlen bei Anwendung der Innendämmung moderat. Das Beispiel Wärmedämmverbundsystem aus Teil II zeigt, dass bei Außendämmung größere Änderungen zu erwarten sind.

3.5.8 Bewertung der Simulationsergebnisse

Mindestwärmeschutz, Kondensat

Die Bewertung der Simulationsergebnisse erfolgt, soweit möglich, analog zu den Nachweisen der stationären Berechnungen. Bezüglich des Mindestwärmeschutzes, der Überschreitung der zulässigen Kondensatmenge und Verdunstung des Kondensats werden identische Grenzwerte wie in den stationären Berechnungen angelegt, wobei sich die Verdunstung nur auf das Abtrocknen des inneren Kondensats bezieht.

Die gedämmten, schlagregenexponierten Westwände (Tabelle 3.11 unten) enthalten zu hohe Kondensatmengen, was auch auf die unter Abschnitt 3.3.3 erwähnten Annahmen und Randbedingungen zurückgeführt werden kann. Trotz der hohen Kondensatmenge verdunstet das gesamte innere Kondensat während der warmen Witterungsperiode auch in allen westorientierten Konstruktionen (siehe Abbildung 3.10).

Schimmelpilzkriterium

Die Bedingung für das Schimmelpilzkriterium unterscheidet sich durch die Einbeziehung der Temperatur und durch die Verwendung der Isoplethen von den bisherigen Anforderungen. Für das Schimmelpilzkriterium wird ein weiteres Symbol eingeführt (Tabelle 3.11 unten). Der gelbe Kreis bedeutet, dass zwar die Bedingung $\varphi_{si}(\theta)_{Co} < LIM$ nicht eingehalten wurde, die Dauer der Überschreitungen des LIM allerdings nicht ausreichend für das Auskeimen von Schimmelpilzen war.

Frost-Tau-Wechsel, Belastungskennzahlen

Für die in Abbildung 3.16 dokumentierten Frost-Tau-Wechsel und die Belastungskennzahlen aus Tabelle 3.10 existieren bisher keine Grenzwerte für die Simulationsergebnisse. Da aber der Quervergleich von Konstruktionsvarianten

möglich ist, können diese Ergebnisse als zusätzliche Entscheidungshilfe bei der Bewertung mit herangezogen werden.

Tab. 3.11: Bewertung der Simulationsergebnisse der Beispielkonstruktion. Oben: Nordausrichtung ohne Schlagregeneinfluss. Unten: Westausrichtung mit Schlagregeneinfluss.

Ohne Schlagregen (Nord)	**Bedingung**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Mindestwärmeschutz	$R_{inst} \geq 1.2\ m^2 \cdot K/W$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge	$m_{W,T,int} \leq 1.0\ kg/m^2$	✓	✓	✓	✓
Verdunstung des Kondensats	$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	$\varphi_{si}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓

Schlagregenexponiert (West)		**Bedingung**	**Unsaniert**	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
Mindestwärmeschutz		$R_{inst} \geq 1.2\ m^2 \cdot K/W$	✗	✗	✗	✓
Zulässige Kondensatmenge		$m_{W,T,int} \leq 1.0\ kg/m^2$	✓	✗	✗	✗
Verdunstung des Kondensats		$m_{W,T,int} \leq m_{W,V}$	✓	✓	✓	✓
Vermeidung Schimmelpilz	- Wand	$\varphi_{si}(\theta) < LIM$	✗	✓	✓	✓
	- Nordwestwinkel	$\varphi_{si}(\theta)_{Co} < LIM$	✗	✗	○	○

Abschließende Zusammenfassung

Eine abschließende Zusammenfassung in einer kleinen Matrix in Tabelle 3.12 komprimiert die Ergebnisse der Berechnungsverfahren nach DIN, COND (Tabelle 3.6) und DELPHIN (Tabelle 3.11) für die verschiedenen Dämmstoffdicken. Für das untersuchte Beispiel ergeben sich in Abhängigkeit vom Verfahren unterschiedliche Bewertungen: Gemäß den Nachweismethoden der *DIN 4108* wäre jede der Konstruktionen abzulehnen - auf Grund des Mindestwärmeschutzes und/oder der zu hohen Kondensatmengen. Das COND-Verfahren und die Simulationsergebnisse lassen immerhin die 80 mm dicke Dämmvariante zu, alle anderen Konstruktionen bestehen die Anforderung des Mindestwärmeschutzes nicht.

Tab. 3.12: Abschlussbewertung der Konstruktionen, getrennt nach Bewertungsverfahren und Klimabedingungen

	Unsaniert	**30 mm**	**50 mm**	**80 mm**
DIN 4108	■	■	■	■
COND	■	■	■	■
DELPHIN - ohne Schlagregen	■	■	■	■
DELPHIN - schlagregenexponiert	■	■	■	■

Das grüne Recheck bescheinigt, dass alle hier diskutierten Nachweise mit dem gewählten Verfahren erbracht werden konnten. Ein rotes Recheck weist darauf hin, dass maßgebliche Anforderungen des jeweiligen Bewertungsverfahrens

nicht erfüllt worden sind und die Konstruktion für eine Ausführung unter den gewählten Bedingungen nicht geeignet ist. Die gelbe Markierung zeigt an, dass die Anforderungen unter den schlagregenexponierten Bedingungen, einem „worst case“-Szenario, nicht eingehalten werden konnten. Allerdings kann die Konstruktion unter weniger ungünstigen Randbedingungen durchaus funktionieren und sollte daher nicht grundsätzlich verworfen werden.

3.5.9 Hinweise für den Konstruktionskatalog

Im Rahmen des Projektes „Feuchteatlas“ wurde die hier an einem Beispielwandaufbau gezeigte Vorgehensweise auf einen Katalog von Konstruktionen angewendet. Zum Verständnis und zur Handhabung des Konstruktionskataloges seinen hier noch einige Hinweise angebracht.

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse hygrothermischer Simulationen und die daraus getroffenen Schlussfolgerungen sind immer nur für die jeweils verwendeten Materialkennwerte in Zusammenhang mit den angeordneten Klimarandbedingungen gültig. Die Übertragbarkeit auf „ähnliche“ Konstruktionen oder andere Klimabereiche ist nur eingeschränkt möglich und erfordert im Allgemeinen eine Neubewertung.

Simulationen mit Schlagregeneinfluss

Die Auswertung der Matrix von Simulationen mit Schlagregeneinfluss (Tabelle 3.11 unten) gestaltet sich folgendermaßen. Die große Menge eindringenden Regens beruht auf einigen, sehr ungünstigen Randbedingungen (Abschnitt 3.4). Deshalb ziehen das Nichteinhalten der maximalen inneren Kondensatmenge und die unvollständige Verdunstung des inneren Kondensats nur eine gelbe Warnung nach sich. Wurde jedoch schon bei der Simulation ohne Schlagregeneinfluss die innere Kondensatmenge überschritten oder war die Verdunstung des Kondensats nicht gegeben, wurden solche Konstruktionen auch als negativ bewertet. Am konkreten Objekt muss dann der Planer entscheiden, ob in konstruktiven Details Schwachstellen vorliegen, die eingehender untersucht werden müssen oder ob der Schlagregenschutz eine langfristig ausreichende Sicherheit gegen eindringende Feuchte garantiert. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass die Verwendung eines anderen Klimas zu abweichenden Beurteilungen führen kann.

Abschlussbewertung

Eine einzige negative Bewertung bei den stationären Berechnungen (z.B. Tabelle 3.6) oder bei den Simulationen ohne Schlagregeneinfluss (siehe Tabelle 3.11 oben) führt zu einem negativen Urteil (rotes Kästchen) in der Abschlussbewertung. Wird bei der Betrachtung des Schimmelpilzwachstums im Gebäudewinkel festgestellt, dass der Isopleth für Auskeimung zwar überschritten wurde, aber die Häufigkeit der Überschreitungen des LIM nicht ausreichend für das Auskeimen von Schimmelpilzen ist (gelber Kreis in Tabelle 3.11), wird dies trotzdem mit einer grünen Markierung bewertet.

Als Vorzugsvarianten werden auf Grund der niedrigeren Wärmeenergieverluste höhere Dämmdicken bevorzugt, sofern die überprüften Kriterien eingehalten werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Konstruktionskatalog in Teil II enthält eine detaillierte Dokumentation der Ergebnisse und Bewertungen für verschiedene Wandaufbauten und Innendämmsysteme, welche in diesem abschließenden Kapitel diskutiert werden sollen. Das hygrothermische Verhalten einer Auswahl von innen gedämmten Wandaufbauten wurde mit den in Kapitel 2 vorgestellten Verfahren nach DIN 4108, COND und DELPHIN berechnet und die Rechenergebnisse wurden unter Anwendung der Kriterien in Kapitel 3 bewertet.

Der Konstruktionskatalog ist auch als Handreichung für die Praxis gedacht. Die Dämmstoffdicken sind moderat gewählt worden, um die Balance zwischen Wärme- und Feuchteschutz zu halten. Um die zukünftigen Anforderungen der EnEV zu erfüllen, wird man allerdings größere Dämmstoffdicken bemessen müssen, wenn keine Ausnahmegenehmigung vorliegt. Die kritischen Werte der Kondensatmenge und die biomechanischen Belastungskennwerte steigen aber mit zunehmender Dämmstoffdicke, so dass für Dämmstoffdicken, die nicht im Katalog enthalten sind, entsprechende Nachweise mit der Simulation zu empfehlen sind.

Konstruktionen mit diffusionsoffener kapillaraktiver Innendämmung

Beidseitig diffusionsoffene Konstruktionen wiesen auch bei Simulationen mit Niederschlag nur geringe Mengen an innerem Kondensat auf, wenngleich auf Grund verschiedener Ursachen. Bei Calciumsilikatplatten (z.B. Wandaufbau 1.2) sorgt die hohe Flüssigwasserleitfähigkeit für eine kapillare Entspannung, der niedrige Diffusionswiderstand gewährleistet zusätzlich ein hohes Austrocknungspotential nach innen. Wenn zusätzlich noch ein historischer Kalkputz mit vergleichsweise hohem A_w-Wert und niedrigem Diffusionswiderstand auf der Außenseite angebracht war (Wandaufbau 1.4), konnte der insgesamt niedrigste Kondensatverlauf erzielt werden. Auch mit Wärmedämmlehm (z.B. Wandaufbau 10.2), Wärmedämmlehmplatten (z.B. Wandaufbau 10.5) oder einer Kombination aus wasserabweisendem, diffusionsdichtem Außenputz und kapillaraktivem Innendämmmaterial (Wandaufbau 1.5) wurden vergleichsweise geringe Kondensatmengen erreicht. Wird eine diffusionsoffene Innendämmung mit hoher Flüssigwasserleitfähigkeit dagegen bei einer Konstruktion mit völlig unzureichendem Schlagregenschutz eingesetzt (Wandaufbau 1.7, Calciumsilikat mit unverputztem Altbauziegel) kann dies trotz des kapillaraktiven Dämmmaterials zu hohen Feuchtebelastungen führen. Die Ergreifung weiterer Maßnahmen, z.B. einer Hydrophobierung (Wandaufbau 8.6) erscheint dann für diesen Fall ratsam.

Dass eine sachgerechte Verarbeitung gemäß den Herstellerangaben entscheidend für die Funktionsfähigkeit einer Innendämmung sein kann, wird mit der Besprechung in Wandaufbau 1.8 aufgezeigt. Statt einer flächigen Verklebung wurde hier nur eine punktuelle Verklebung vorgenommen, weshalb die kapillare Leitfähigkeit nicht wirksam werden kann. Der durch die Innendämmung diffundierende Wasserdampf kondensiert dann an der kalten Seite der Luftschicht aus, in diesem Beispiel auf dem bestehenden Kalkputz, und kann somit nur an den par-

tiell verklebten Stellen von der Dämmung aufgenommen werden. In der Folge nimmt die Tauwassermenge stark zu.

Konstruktionen mit externem Wärmedämmputz

Die Gegenüberstellung der Ergebnisdaten der Wandaufbauten 1.1 bis 1.3 mit 1.6 zeigt, dass durch den in 1.6 außen zusätzlich angebrachten Wärmedämmputz die Einspareffekte bezüglich der Heizenergie nur gering sind: Der U-Wert wird maximal um 0,09 W/m^{2}K reduziert. Dennoch erhöht die zusätzliche Putzschicht die Sicherheit vor Feuchteschäden, da das Feuchtelevel im Wandquerschnitt deutlich sinkt. Dies veranschaulichen die Kondensatmengen und Feuchteprofile. Der Effekt der zusätzlichen Wärmedämmschicht auf die Aufnahme von Niederschlag ist vergleichbar mit der Verwendung eines wasserabweisenden statt eines nur wasserhemmenden Putzes. Jedoch beeinträchtigt die diffusionsoffene Ausbildung des Dämmputzes im Gegensatz zu diffusionsdichten Schichten die Austrocknung kaum.

Konstruktionen mit Dampfbremse

Die Wandaufbauten 2.1 und 2.2 bestehen aus einer Innendämmung mit Cellulose zwischen einer mit Gipskarton kaschierten Holzständerkonstruktion. In Wandaufbau 2.1 ist zwischen Dämmschicht und Gipskarton eine Dampfbremse mit konstantem s_d-Wert verarbeitet, Wandaufbau 2.2 ist mit einer feuchteadaptiven Dampfbremse versehen. Erst die Verwendung des Simulationsverfahrens kann deutlich machen, dass bei hoher eindringender Schlagregenmenge bei dieser Konstruktion selbst die Anwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse die Feuchtebelastung nicht ausreichend reduzieren kann, was sich z.B. mit Schlagregeneinfluss an der Kondensatmenge und an der Zeitdauer möglichen Schädlingwachstums abzeichnet. Die an der Dampfbremse anliegenden Luftfeuchten sind nicht ausreichend, um die positiven Diffusionseigenschaften der Dampfbremse zu aktivieren.

Konstruktionen mit innenseitiger diffusionshemmender Schicht

In allen Wandaufbauten mit diffusionshemmenden Dämmmaterialien, die keine oder nur eine sehr geringe Flüssigwasserleitfähigkeit aufwiesen, wurde bei Westausrichtung und Schlagregeneinwirkung eine sehr hohe Feuchtebelastung errechnet, beispielsweise mit PUR-Platten (Wandaufbauten 8.1 bis 8.3), Porenbetonsteinen mit Luftschicht zwischen Wand und Dämmung (Wandaufbau 7.1), Holzweichfaserdämmplatten (Wandaufbauten 3.1 bis 3.3) und Schaumglas (Wandaufbauten 9.1 bis 9.3).

Wird durch die Anwendung eines wasserabweisenden, diffusionsdichten Kunstharzputzes das Eindringen von Schlagregen weitgehend verhindert, sind in „den ersten Jahren“ der Simulation tatsächlich deutlich niedrigere, innere Kondensatmengen zu verzeichnen. Trotzdem kann es bei einer entsprechenden Materialkombination wie in Wandaufbau 8.5, Innendämmung mit PUR-Platten und außen Kunstharzputz, vorkommen, dass der Wassergehalt im Lauf der Jahre langsam aber kontinuierlich ansteigt. Hauptgrund für dieses Verhalten ist der zu hohe Dampfdiffusionswiderstand der Außenputzschicht, der das Austrocknungspotential nach außen zu stark einschränkt. Auf diese Weise kann Innenraumfeuchte, die in den Wandaufbau diffundiert oder die trotz der niedrigen Leitfähigkeit ein-

dringende geringe Schlagregenmenge, nicht ausreichend durch die diffusionsdichte Putzschicht verdunsten. Die diffusionshemmende PUR-Platte auf der Innenseite reduziert nicht nur die vom Raum eindiffundierende Wasserdampfmenge, sondern auch das wichtige Austrocknungspotenzial nach innen.

Ebenso wurden diffusionsoffene Innendämmmaterialien mit geringer Kapillarwirkung eingesetzt, z. B. Wandaufbau 3.1 und 4.3 mit HWL- bzw. Holzweichfaserdämmplatten. Von einigen Herstellern wird dabei die Verwendung einer stark dampfdiffusionshemmenden Schicht auf der Raumseite vorgeschrieben. In Wandaufbau 3.4, Innendämmung mit Holzweichfaserdämmplatten, wird dies durch einen Putz realisiert, der den Dampftransport in die Konstruktion und somit auch zur Kondensationsebene stark begrenzt. Dass diese Maßnahme notwendig ist, bestätigt der Vergleich der Konstruktionen in Wandaufbau 3.4 mit 3.1 bis 3.3. Die Tauwassermenge kann (ohne Schlagregeneinfluss) praktisch auf Null reduziert werden. Dennoch bleibt auch mit dem Wandaufbau 3.4 die innere Kondensatmenge auf einem sehr hohen Niveau, wenn der Regen auf die Konstruktion aufgeprägt wird. Auch hier führt die stark eingeschränkte Austrocknungsfähigkeit nach innen zum Versagen des Systems.

Konstruktion mit Wärmedämmverbundsystem

Wenn keine denkmalschutzrechtlichen oder andere speziellen Gründe gegen eine Außendämmung sprechen, wird diese üblicherweise einer Innendämmung vorgezogen. Zu Vergleichszwecken wurden deshalb auch Konstruktionen mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) untersucht. Die Konstruktionen in Wandaufbau 8.5 (Innendämmung mit PUR-Platten) und 12.1 (Außendämmung mit PUR-Platten) weisen praktisch dieselben Materialien auf, in Wandaufbau 12.1 ist jedoch die PUR-Platte als Außendämmung mit entsprechenden Putzen angeordnet. Die eindringende Schlagregenmenge ist bei Innendämmung (Wandaufbau 8.5) weitaus größer, da bei intakter Außendämmung durch den dichten Außenputz und die äußere Dämmschicht kein Regenwasser in die Konstruktion gelangen kann.

Die äußeren Putzschichten des WDVS-Systems unterliegen höheren biomechanischen Belastungen. Das Profil der Frost-Tau Wechsel konzentriert sich auffallend nahe der Außenoberfläche und weist mit über 90 die insgesamt höchste Anzahl von Frost-Tau Wechseln auf. Mit Ausnahme der thermischen Rissinduktionsbelastung steigen auch die Belastungskennzahlen im Vergleich zur unsanierten Variante zum Teil drastisch an: Die hygrische Witterungslast (Feuchteschwankungen) auf der Bauteiloberfläche verstärkt sich bei den Varianten mit Schlagregen sogar um mehr als das Doppelte. Aus diesem Grund müssen diffusionsdichte Außenputze von WDVS-Systemen - im Zusammenspiel mit den eingelegten Armierungsgeweben - über eine hohe Witterungsbeständigkeit verfügen. Auch für den Schädlingsbefall sind die insgesamt längsten Perioden mit günstigen Wachstumsbedingungen festzustellen, vorwiegend bedingt durch die fehlende Wärmespeicherkapazität der oberflächennahen Schichten. Auf den

Zusammenhang zwischen dem Wärmespeicherverhalten von WDVS-Systemen und Algenwachstum wurde in mehreren Publikationen hingewiesen.

Vergleich der Wandbildner

In den Wandaufbauten 6.1, Altbauziegel mit Mineraldämmplatten, und 6.6, Kalksandstein mit Mineraldämmplatten, weisen die Konstruktionsvarianten eine ungefähr gleiche Dicke und einen ähnlichen Wärmedurchlasswiderstand auf. Es zeigte sich, dass mit Kalksandstein das maximale innere Kondensat ungefähr um den Faktor 6 höher verläuft, obwohl beide Aufbauten praktisch dieselbe Niederschlagsmenge aufnehmen. Der ungefähr dreimal höhere Diffusionswiderstand und die viel niedrigere Kapillarität des Kalksandsteins verzögern jedoch das Abtrocknen erheblich, wodurch sich im Verlauf der Jahre ein weitaus höheres Feuchtelevel ausbildet.
Dass sich bei den Simulationen ohne eindringenden Schlagregen mit Kalksandstein (Wandaufbau 6.6) eine geringere Menge Kondensat als mit Altbauziegelmauerwerk bildet, liegt weniger am Wandbildner, sondern vielmehr an dem vorhandenen historischen (Innen-)Kalkputz bei Wandaufbau 6.1: Der bestehende Altputz, der Kleber und die Dämmung speichern fast das gesamte Kondensat, im Altbauziegel ist praktisch kein Kondensat vorzufinden.

Beim Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Altbauziegeln (Wandaufbauten 1.1 bis 1.3) und Norm-Vollziegeln (Wandaufbauten 1.9 bis 1.11) konnte beobachtet werden, dass die Wärmeverluste mit dem historischen Mauerwerk wegen des niedrigeren Wärmedurchlasswiderstands des Altbauziegels bei gleicher Wanddicke signifikant höher sind. Gleichwohl waren analog zum vorherigen Vergleich von Altbauziegeln mit Kalksandstein feuchtetechnische Vorteile des historischen Gemäuers zu erkennen: Wiederum lassen sich wegen der höheren Flüssigwasserleitfähigkeit und dem niedrigeren Dampfdiffusionswiderstand bei Schlagregeneinwirkung niedrigere Kondensatmengen mit dem Altbauziegel registrieren.

Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

Die Unterschiede zwischen den R- und U-Werten aus den DIN- und COND-Berechnungen und aus den Simulationen mit DELPHIN sind - in Abhängigkeit vom Wandbildner - relativ klein. Hauptsächlich die nächtliche Abstrahlung und die genauere Berücksichtigung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit verursachen den erhöhten Wärmestrom. Der schlagregenbedingte Feuchteeinfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, und damit auch auf die thermischen Konstruktionskennwerte, ist bei dem hauptsächlich verwendeten Altbauziegel und dem Norm-Vollziegel klein. Erst bei sehr hoher Luftfeuchte über 98 % nehmen die Ziegel nennenswerte Feuchtemengen auf. Die Feuchte wird jedoch schnell weitergegeben bzw. verdunstet wieder, sodass die Wärmeleitfähigkeit nur für kurze Zeitabschnitte durch das gespeicherte Flüssigwasser erhöht wird. Lediglich bei Wandaufbauten, die sehr viel Schlagregen aufnehmen, kommt es zu nennenswerten Differenzen, z.B. in Wandaufbau 8.1 (Innendämmung mit PUR-Platten): Mit 30 mm Innendämmung sinkt der instationäre Wärmedurchlasswiderstand der

schlagregenexponierten Wand um 0,09 auf 1,37 m^{2}K/W bzw. steigt $U_{inst,HP}$ von 0,61 auf immerhin 0,65 W/m^{2}K.

Besteht der Wandbildner aus Kalksandsteinen anstatt Ziegelmauerwerk konnte dagegen eine deutliche Abhängigkeit vom Wassergehalt festgestellt werden (Wandaufbauten 6.5 und 6.6). Der verwendete Kalksandstein weist mit 6,0 Vol% als Ausgleichsfeuchte zu 90 % relativer Luftfeuchte den 10-fachen Wassergehalt im Vergleich zu dem Altbauziegel (0,6 Vol%) auf, entsprechend höher ist die Wärmeleitfähigkeit. Der U-Wert erhöht sich beispielsweise in Wandaufbau 6.5 mit 50 mm Dämmung (Westseite mit Schlagregen) durch die sehr hohe eindringende Schlagregenmenge von 0,67 auf 0,76 W/m^{2}K. Der stationäre U-Wert beträgt dagegen ohne Berücksichtigung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit 0,64 W/m^{2}K. Bei der genannten Konstruktion führte der hohe Feuchteeinfluss weiter zu der Bewertung, dass der Mindestwärmeschutz von $R_{min} \geq$ 1,2 m^{2}K/W mit Schlagregeneinfluss nicht eingehalten werden konnte (1,15 m^{2}K/W), ohne Schlagregeneinwirkung jedoch mit 1,32 m^{2}K/W erfüllt wird.

Es konnten auch einige weitere Konstruktionen identifiziert werden, bei denen der Mindestwärmeschutz R_{min} mit den stationären Berechnungen eingehalten wurde, wohingegen $R_{inst,HP}$ bei der Verwendung der Simulationssoftware und realer Klimawerte den Grenzwert, wenn auch knapp, überschritt (z.B. Wandaufbauten 7.1, 10.6, 1.9 und 1.10).

Innere Kondensatmenge

Da der wesentliche Unterschied zwischen den Berechnungsmethoden nach DIN und COND in der Berücksichtigung der Flüssigwasserleitfähigkeit liegt, kommt es vielfach zu abweichenden Bewertungen, wenn Tauwasser an kapillar leitfähigen Schichten ausfällt. Viele Konstruktionen mit diffusionsoffener, kapillaraktiver Innendämmung, z.B. in den Wandaufbauten 1.1 bis 1.4, waren erst durch die Anwendung des COND-Verfahrens bzw. durch die Simulation nachweisbar gemäß den Anforderungen der *DIN 4108-3*. Die Gruppe der diffusionsoffenen Innendämmsysteme stellt offenkundig den wichtigsten Einsatzbereich für das COND-Verfahren dar.

Die COND-Ergebnisse erfuhren durch die Simulationsergebnisse eine Bestätigung. Es zeigte sich, dass die durch COND (konstantes Klima) und DELPHIN (Realklima) berechneten Kondensatmengen vergleichsweise nah beieinander lagen. Sofern in der Simulation kein eindringender Schlagregen mit einberechnet wurde, waren durch die Verwendung realer Klimadaten und genauerer Material- und Prozessmodellierung noch niedrigere Kondensatmengen zu verzeichnen.

Gleichwohl konnten einige Wandaufbauten nur mit Hilfe der Simulation nachgewiesen werden. Erst die Verwendung des realitätsnäheren Verlaufs der Flüssigwasserleitfähigkeit in den Simulationen führte dazu, dass bestimmte Konstruktionsvarianten die Kondensatmenge von 1,0 kg/m^2 nicht überschritten (ohne Schlagregeneinfluss). Hierzu zählen viele Wandaufbauten mit Mineral-

dämmplatten, z.B. 6.1 bis 6.3 sowie 6.5 und 6.6. Die berechnete Tauwassermenge unterschritt dann allerdings den Grenzwert von 1,0 kg/m^2 zumeist deutlich.

Vermeidung von Schimmelbefall

Die Anforderung des Mindestwärmeschutzes für den eindimensionalen Wandbereich zielt auch darauf ab, Schimmelbefall im Gebäudewinkel zu vermeiden. Folgerichtig korrespondiert R_{min} mit dem f_{Rsi}-Wert sowie mit der Untersuchung eines möglichen Schimmelpilzwachstums im Gebäudewinkel, welche durch Simulationsverfahren bereit gestellt werden kann.
In der Mehrzahl der hier vorgestellten Berechnungsergebnisse liefern alle Beurteilungsverfahren identische Bewertungen ab. Bei einigen der untersuchten Konstruktionen, siehe die Berechnungen für Wandaufbauten 1.3, 6.1 und 6.4, liegen jedoch uneinheitliche Einschätzungen vor. In allen drei Beispielen wird der betreffende Wandaufbau anhand des Mindestwärmeschutzes negativ beurteilt, während der f_{Rsi}-Wert immer über dem Grenzwert von 0,7 liegt. Dazwischen liegen die Einschätzungen, die mit Hilfe des Schimmelpilzwachstums vorgenommen wurden: Zweimal in Übereinstimmung mit dem Mindestwärmeschutz und einmal mit dem f_{Rsi}-Wert (Wandaufbau 1.3). Für die Bewertung der Schimmelgefahr im Gebäudewinkel ist somit der Grenzwert von 1,2 m^{2}K/W für den Mindestwärmeschutz dem f_{Rsi}-Wert tendenziell vorzuziehen. Schließlich lässt sich mit Hilfe der Isoplethen die tatsächliche Wahrscheinlichkeit des Schadeneintritts präziser prognostizieren, liegt aber laut *WTA 6-3-05* trotzdem auf der sicheren Seite.

Wenn das am Gebäudestandort vorherrschende Klima weniger kritische Durchschnitts- oder Extremtemperaturen im Winter aufweist, hat dies nicht zwangsweise zur Folge, dass die Sicherheit vor Schimmelpilzwachstum größer wird. Dies zeigt der Vergleich von Wandaufbauten 6.1 bis 6.3 (TRY-Klima Passau) mit Wandaufbau 6.4 (TRY-Klima Potsdam), Altbauziegel innen gedämmt mit Mineraldämmplatten. Bei der Generierung des Innenklimas aus den Außentemperaturen (siehe Abbildung 3.1) wurde auch der Einfluss der Lüftung berücksichtigt. Das bedeutet, dass bei niedrigeren Außentemperaturen Außenluft mit einem geringeren, absoluten Feuchtegehalt in den Raum strömt und somit auch die relative Luftfeuchte entsprechend geringer ist. Die Innenraumluftfeuchte verlief deshalb mit Potsdamer Klima etwas höher. Erst länger anhaltende Kälteperioden insbesondere mit Temperaturen unter -10°C, welche die Konstruktionen stärker auskühlen, erhöhten die Gefahr von Schimmelpilzwachstum merklich.

Schädlingswachstum, Algenbefall

Weil in den meisten Konstruktionen mit feuchtesensitiven Materialien wie Holz selbige im Bereich des inneren Kondensats lagen, verlief die Belastung hinsichtlich eines Schädlingsbefalls qualitativ in Übereinstimmung mit der auftretenden Tauwassermenge. In allen Simulationen konnte übereinstimmend registriert werden, dass mit der Dämmstoffdicke das Risiko von Algenbewuchs steigt. Zusätzlich forciert ein durch die Innendämmung bedingter hoher Feuchtegehalt im Wandquerschnitt erwartungsgemäß die Gefahr von Frostschäden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Schlagregen-einfluss

Bei der Beschreibung der Klimaelemente für die Simulation wurde einerseits auf die ausgeprägte Abhängigkeit der auf die Außenwand auftreffenden Menge Schlagregen von örtlichen Standortfaktoren (Lage, Geometrie, Witterungsschutz durch andere Gebäude oder Vegetation, etc.) eingegangen und andererseits auf die speziellen Oberflächenfaktoren. Die getroffenen ‚worst case'-Annahmen hinsichtlich Standort und Oberflächeneinflüsse sowie die Wahl eines *nur* wasserhemmenden Außenputzes in den meisten Fällen (siehe Abschnitt 3.4) zog in Simulationen mit schlagregenexponierten Konstruktionen eine sehr hohe Feuchteaufnahme nach sich. Insbesondere bei Wandaufbauten mit diffusionsdichter Innendämmung - und somit fehlender Austrocknungsmöglichkeit zum Innenraum - stieg die Feuchtebelastung durch das Eindringen der Feuchte von der Außenseite beträchtlich an. Zwar blieb das Mikroklima auf der Wandinnenoberfläche nahezu unbeeinträchtigt, in der Konstruktion war allerdings ein weitaus höheres Feuchteniveau festzustellen, welches besonders beim Vorliegen feuchtesensibler Materialien das Risiko von Schäden erhöht.

Folglich sind detaillierte Simulationsrechnungen bei exponierten Wandkonstruktionen, für die auch durch Sanierungsmaßnahmen keine ausreichende Schlagregensicherheit gewährleistet werden, ein hilfreiches Mittel, um das Schadensrisiko abzuschätzen. Die Untersuchung und Anwendung möglicher Gegenmaßnahmen, z.B. einer Hydrophobierung (Wandaufbau 8.6) kann die Gefahr von Feuchteschäden minimieren. Insbesondere, wenn aus denkmalschutzrechtlichen Gründen eine Hydrophobierung die einzige, auf der Außenoberfläche akzeptierte Behandlung ist. Doch auch bei ausreichendem Schlagregenschutz kann sich bei bestimmten Konstruktionen durch langjährige Akkumulation (z. B. Wandaufbau 8.5) ein potentiell kritisches Feuchteniveau ausbilden.

Auf dieselbe Weise lassen sich neben Schlagregen weitere hygrothermische Belastungen wie aufsteigende Feuchte, Einbaufeuchte, hohe Belastungen durch das Innenklima oder Havarien erst durch Simulationsverfahren berücksichtigen. Stationäre Verfahren können derlei Feuchtelasten nur stark eingeschränkt oder gar nicht untersuchen.

4.2 Ausblick

Im Feuchteatlas wurde ein Katalog von innen gedämmten Wandaufbauten auf hygrothermische Eignung und Zulässigkeit untersucht. Dabei kamen drei verschiedene Bewertungsmethoden zum Einsatz:

1. Durch die Anwendung der in DIN 4108 etablierten Rechenmethoden und Kriterien konnten Möglichkeiten und Grenzen der Normverfahren aufgezeigt werden.
2. Das praxisgerecht aufbereitete COND-Verfahren baut im Wesentlichen auf den DIN-Methoden auf, erweitert aber den Feuchteschutznachweis auf mehreren Gebieten.
3. Die numerische Simulation mit DELPHIN beschreibt die hygrothermischen Prozesse unter realen Klimabedingungen und in größerer Detaillierungstiefe. Dadurch können Unsicherheitsfaktoren ausgeräumt und bisher weniger beachtete Problemfelder angegangen werden.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren konnte festgestellt werden, dass sich vor allem für den hygrothermischen Nachweis diffusionsoffener, kapillaraktiver Innendämmsysteme das herkömmliche DIN-Verfahren als unbrauchbar erweist. Mit dem ebenfalls stationären, eindimensionalen COND-Algorithmus dagegen, welcher auch die Flüssigwasserleitfähigkeit mit einberechnet, konnte die Tauglichkeit vieler Wandaufbauten nachgewiesen werden.

Der Feuchteatlas stellt heraus, wie mittels hygrothermischer Software eine weitaus genauere Prüfung unterschiedlicher Konstruktionsvarianten ermöglicht wird. Besondere klimatische Einflüsse, wie Schlagregen oder Frost-Tau Wechsel und deren Auswirkungen auf die Gebäudehülle, Wärme- und Feuchtespeicherung bzw. die langjährige Akkumulation von Kondensat, die Untersuchung inhomogener Wandaufbauten (Innendämmung mit Konstruktionshölzern, Fachwerk) oder zweidimensionaler Konstruktionen bzw. die Berücksichtigung besonderer Materialeigenschaften können mit Hilfe der Simulationssoftware erfasst werden.

Es wäre zu begrüßen, wenn einige zusätzliche Aspekte des komplexen hygrothermischen Verhaltens in vereinfachter Form Niederschlag in den Normen und Richtlinien fänden. Durch die Berücksichtigung der Kapillarität könnte beispielsweise Potenzial für die Senkung der Transmissionswärmeverluste freigelegt werden.

Die zukünftigen Anforderungen an die Gebäudehülle werden von der Notwendigkeit zur Reduzierung der CO^2-Emissionen geprägt. Das bedeutet höher gedämmte und luftdichtere Konstruktionen, auch im Bestand. Diese Forderung kann mit klimatoleranten, diffusionsoffenen und dauerhaften Konstruktionsprinzipien kollidieren, die für die Altbausanierung maßgebend sein sollten. Auch im Neubau muss der Aspekt der Dauerhaftigkeit im Vordergrund stehen, auch wenn

eine ganzheitliche Analyse, die auch die energetischen Aufwendungen zur Produktion der Materialien und Herstellung der Gebäude sowie das Recycling mit bewertet, noch nicht implementiert ist.

Auf dem Gebiet der Dauerhaftigkeitsanalyse von Baukonstruktionen unter klimatischen Einflüssen besteht Forschungsbedarf. Die hier im Feuchteatlas angeschnittene Problematik der biomechanischen Belastungskennzahlen muss angesichts der steigenden Anforderungen an die Gebäudehülle weiter untersucht werden. Ansätze dazu bestehen in der Kopplung von hygrothermischer Simulation und FEM-Strukturmechanik (eine DELPHIN-ANSYS-Kopplung wurde bereits realisiert).

Neue Berechnungsmöglichkeiten ziehen neue Bewertungskriterien nach sich. Die Begrenzung des inneren Kondensats nach DIN 4108 bewertet weder die räumliche Verteilung des Kondensats noch die materialspezifische Feuchteempfindlichkeit. Zu begrüßen wären Kenndaten, welche die maximal zulässige bauklimatische Exposition von Materialien beschreiben. Sicherlich existieren solche Kenndaten. Es fehlt an deren gezielter Sammlung und Bereitstellung für bauphysikalische Nachweise.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt ist die Handhabbarkeit und die Anwenderfreundlichkeit der Verfahren. Der unter Zeit- und Termindruck stehende Architekt oder Ingenieur braucht Verfahren, die er mit vertretbaren Zeitaufwand einsetzen kann. Die Ergebnisse des Feuchteatlas sind unter viel höherem Zeitaufwand zustande gekommen. Für die Unsetzung dieser und weiterer Ergebnisse in die Praxis braucht es geeignete Auswerteverfahren. Notwendig ist ein intelligentes Postprozessing-Werkzeug für die bauphysikalische Analyse von Wandaufbauten. Damit minimiert sich nicht nur der erforderliche Zeitaufwand, auch mögliche Fehlerquellen, insbesondere bei inhomogenen Wandquerschnitten, können so reduziert werden und der erwünschte Informationsgehalt wird ansprechend aufbereitet.

Gleichwohl setzt die Verwendung von Simulationsverfahren mit realen Klimarandbedingungen eine gewisse Erfahrung bei dem Benutzer voraus. Das bezieht sich sowohl auf die Wahl der Materialien, deren Eigenschaften häufig nicht vollständig bekannt sind, als auch auf die Einschätzung der zu erwartenden klimatischen Belastungen. Sinnvolle Vereinfachungen müssen fachgerecht getroffen werden. Das bedeutet, dass in Zukunft noch mehr Wert auf Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis gelegt werden muss. Von Forschungseinrichtungen und Herstellern organisierte Workshops und Schulungen für neue innovative Werkzeuge, Materialien und Komponenten sollten intensiviert werden.