

Energetische Bewertung von Gebäuden mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat

Ulrich Ruisinger¹, Hans Petzold², John Grunewald³ und Peter Häupl⁴
Institut für Bauklimatik, Technische Universität Dresden
Email: ruisinger@ibk.arch.tu-dresden.de

1 Einleitung

Die gegenwärtige Entwicklung auf dem Bausektor ist durch zwei wesentliche Tendenzen charakterisiert. Einerseits werden aus Gründen des Umweltschutzes höhere Anforderungen an die Wärmedämmung und den Feuchteschutz von Gebäuden gestellt, andererseits gewinnt auf Grund der notwendigen Schonung der Ressourcen das Bauen im Bestand immer mehr an Bedeutung. Daraus ergibt sich die Forderung, schon bei der Planung die wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften der Gebäudehülle und des gesamten Gebäudes verstärkt zu berücksichtigen. Ein erhebliches Maß an bauphysikalischer Sensibilität und Sachkenntnis ist erforderlich, um die gestellten Anforderungen erfüllen zu können und feuchtebedingte Bauschäden zu vermeiden. Werden die sich überlagernden Feuchtetransportvorgänge in Bauteilen und in komplexen konstruktiven Details unterschätzt oder im Vorfeld nicht erkannt, können in der Folge Schadensfälle auftreten oder Sanierungsstrategien nicht wirksam werden.

Bei der energetischen Sanierung historischer Gebäude schließen die Vorgaben des Denkmalschutzes häufig das Anbringen einer Wärmedämmung auf der Außenseite aus. In der Vergangenheit kamen deshalb wasserdampfdichte (diffusionsdichte) Innendämmsysteme zur Anwendung, die sich in der Praxis als schadensanfällig erwiesen. Zu anspruchsvolle und zeitaufwendige Anforderungen in der Bauausführung sowie Planungsfehler in der konstruktiven Gestaltung führten zu Feuchteschäden, die oft eine erneute Sanierung erforderlich machten.

Zusammen mit Partnern aus der Industrie und Forschung ist am Institut für Bauklimatik ein diffusionsoffenes Innendämmsystem auf der Basis von kapillaraktivem (saugfähigem) Calciumsilikat entwickelt worden. Die kapillaraktiven Eigenschaften des Calciumsilikats verringern die innere Kondensatmenge, zum anderen gewährleistet eine sanfte Innendämmung Kondensatfreiheit der Innenwandoberflächen und Nutzerkomfort durch Erhöhung der Oberflächentemperatur, ohne die Dauerhaftigkeit der Konstruktion durch Herabsetzen des Austrocknungspotentials zu beeinträchtigen.

Eine reale Bewertung derartiger Konstruktionen kann durch Berechnungsverfahren nach DIN 4108-03 [1] bzw. EN ISO 13788 [2] (*Glaser*-Schema, Monatsbilanzverfahren) in der Regel nicht erfolgen, da nur der Wasserdampftransport berücksichtigt wird. Am Institut für Bauklimatik wurden zwei Softwareprogramme (COND2002 und DELPHIN4) entwickelt, um die am Bau Beteiligten bei der hygrothermischen Beurteilung von Materialien und Konstruktionen zu unterstützen. Beide Programme berücksichtigen neben weiteren wichtigen bauphysikalischen Transportphänomenen die Kapillarität der porösen Baustoffe.

Im vorliegenden Beitrag werden neben einer kurzen Darstellung des Wirkprinzips der kapillaraktiven Calciumsilikat-Innendämmung die Untersuchungsergebnisse des Instituts für Bauklimatik an Gebäuden mit erhaltenen Fassaden vorgestellt. Daran schließt sich die

¹ Dipl.-Ing. Ulrich Ruisinger, wissenschaftlicher Angestellter

² Dipl.-Ing. Hans Petzold, Doktorand

³ Dr.-Ing. John Grunewald, wissenschaftlicher Oberassistent, Forschungsprojektkoordinator

⁴ Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Häupl, Institutsdirektor

Einführung der Programme COND2002 und DELPHIN4 mit den entsprechenden Nachweisverfahren am Beispiel eines Ziegelmauerwerks mit Innendämmung an.

2 Eigenschaften und Wirkprinzip der Calciumsilikat-Dämmplatten

2.1 Materialeigenschaften

Dämmplatten aus Calciumsilikat bestehen aus den Ausgangsmaterialien Calciumoxid, Siliziumoxid, Zellulosefasern und Wasser. In einem energieintensiven Herstellungsprozess (Nasspressen, Autoklavieren, Trocknen) bildet sich in Abhängigkeit von der verwendeten Technologie eine Feststoffmatrix, welche die mechanischen, feuchte- und wärmetechnischen Eigenschaften der fertigen Platte beeinflussen. Calciumsilikat wird hauptsächlich als Isolationsmaterial in Hochtemperaturbereichen (Hochöfen, Metallgießerei, Brandschutz) angewendet. Die Klassifikationstemperatur europäischer Calciumsilikatprodukte erreicht 1100°C.

Der Einsatz von Calciumsilikat als innenseitige Wärmedämmung in der Altbausanierung ist noch relativ neu. Auf Grund der günstigen bauphysikalischen Eigenschaften (gute Wärmedämmung und Saugfähigkeit) wurden in Zusammenarbeit mit einem Hersteller in Deutschland, der Firma Calsitherm Silikatbaustoffe GmbH Bad Lippspringe, Calciumsilikat-Dämmplatten unter dem Produktnamen „Klimaplatte“ für den Einsatz als Innendämmung konzipiert [8]. Die hohe Alkalität von Calciumsilikatdämmplatten mit einem pH-Wert von ca. 10 erhöht zusätzlich den Widerstand gegenüber Schimmelbefall.

Zusätzlich wurden im Rahmen des EU-Forschungsprojektes „Development of specially designed insulation materials for building renovation“ (INSUMAT) [4] die hygrothermischen Eigenschaften der Klimaplatte für die Innendämmung optimiert. Insbesondere wurden simultan

- eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit,
- eine höhere Kapillaraktivität und
- günstigere Feuchtespeichereigenschaften im Bereich von 40 bis 80 % rel. Luftfeuchte erreicht. Die optimierte Klimaplatte kann nach abgeschlossener Kosten- und Energieverbrauchsminimierung der Produktion in die Serienfertigung gehen.

2.2 Wirkprinzip der kapillaraktiven Innendämmung

Während der kalten Witterungsperiode verursachen das Temperatur- und Dampfdruckgefälle einen Wärme- bzw. Dampfstrom von innen nach außen. Überschreitet der berechnete Wasserdampfdruck an einer Stelle innerhalb des Bauteils den direkt von der Temperatur abhängenden Sättigungsdampfdruck, kommt es zur Kondensation. Dies ist bei einer innen gedämmten Wand meistens auf der kalten Seite der Innendämmung der Fall.

Bei innen gedämmten und nicht vollständig diffusionsdichten Wandaufbauten, in denen Materialien mit nicht vorhandener bzw. geringer Flüssigwasserleitfähigkeit eingesetzt werden, bilden sich in der Regel höhere Kondensatmengen. Neben einer verminderten Wärmedämmung besteht dann die Gefahr nachhaltiger Feuchteschäden wie Schimmel, Materialkorrosion oder sichtbarer Wasserflecken.

In Abb. 1 ist das Wirkprinzip eines kapillaraktiven Innendämmsystems dargestellt. Sobald sich in der Konstruktion Kondensat (Tauwasser) bildet, setzt zusätzlich zu den Dampfströmen auch der Flüssigwassertransport ein, der schnell zu einer großflächigen räumlichen Verteilung des Kondensats in der Platte und damit zu einer Verminderung der lokalen Belastung durch Tauwasser führt.

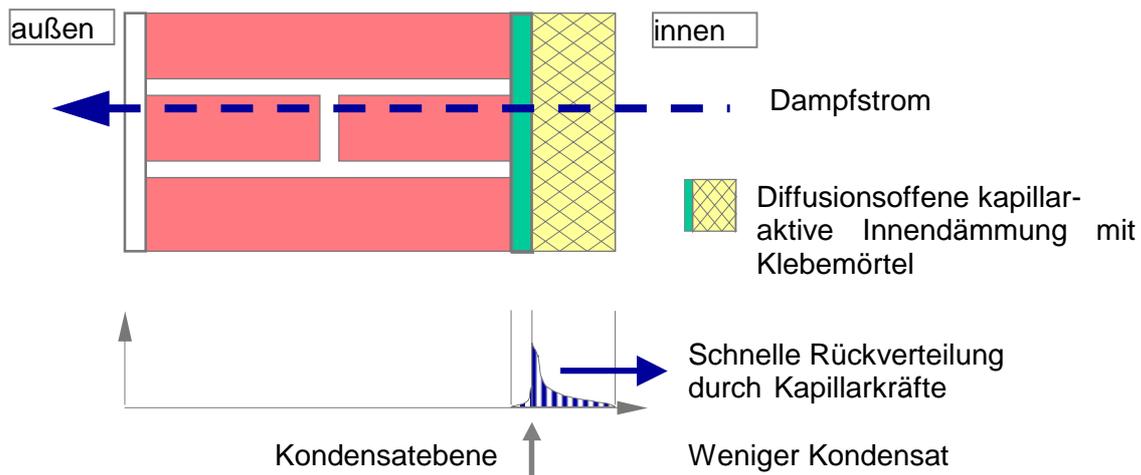


Abb. 1: Wirkprinzip einer kapillaraktiven Innendämmung

Die Wirksamkeit der Kapillaraktivität im Vergleich zu einer nicht kapillaraktiven Wärmedämmung zeigt Abb. 2. Mit dem Simulationsprogramm DELPHIN4 wurden Berechnungen an einer innen gedämmten Ziegelwand unter natürlichen Klimabedingungen für Calciumsilikat und ein gleich wärmedämmendes Material ohne kapillare Leitfähigkeit ausgeführt.

Bei der Calciumsilikat-Innendämmung beträgt die Tauwassermenge maximal $0,66 \text{ kg/m}^2$ (dicke Linie, Abb. 2). Ohne Berücksichtigung der Kapillarität entstehen bis zu $2,3 \text{ kg/m}^2$ Tauwasser (dünne Linie, Abb. 2), was oberhalb der zulässigen Grenze von 1 kg/m^2 nach DIN 4108 liegt.

Dieses Ergebnis wurde auch an mehreren von Institut für Bauklimatik betreuten Testhäusern durch Messungen bestätigt [7][10][13][14]. Damit konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Kapillaraktivität des Dämmstoffes die im Winter anfallende Kondensatfeuchtemenge reduzieren kann.

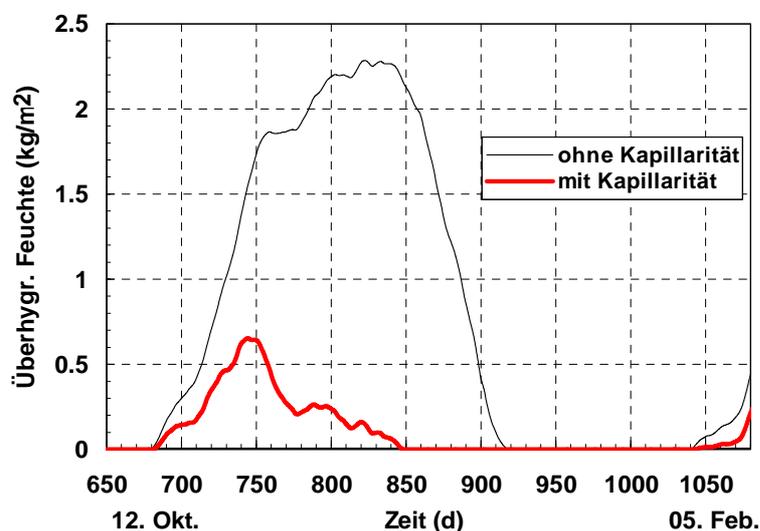


Abb. 2: Verlauf der Kondensatmenge aus Simulationsrechnungen mit und ohne Berücksichtigung der kapillaren Eigenschaften der Wärmedämmung

Bei der Bauausführung ist auf qualitativ einwandfreie Verarbeitung des Dämmsystems, bestehend aus Calciumsilikatplatten *und* Klebemörtel, zu achten. Der Anschluss an die vorhandene Bausubstanz muss vollflächig ausgeführt werden. Dadurch verhindert man, dass sich in einem sonst entstehenden Luftspalt zwischen Dämmsystem und Altbau-Konstruktion

Kondensat niederschlägt. Diese Forderung ist Bestandteil der Anwendungsrichtlinien des Herstellers und stellt eine wesentliche Maßnahme zur Qualitätssicherung dar.

3 Erprobung des Dämmsystems am Herrenschießhaus in Nürnberg

Die Ausführung einer Innendämmung für zu sanierende Gebäude ist vom Institut für Bauklimatik durch fortlaufende Messungen in mehreren Testhäusern, unter anderem auch am Herrenschießhaus Nürnberg, untersucht worden [10][13][14]. Mit Hilfe von Sensoren wurden an ausgewählten kritischen Positionen im Wandquerschnitt kontinuierlich Temperatur, relative Luftfeuchte, Wärmestromdichte, Kondensatbildung und die bauklimatischen Randbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte, Strahlung, Regen und Wind) aufgezeichnet.

Die vor Ort gemessenen Klimadaten und die im Labor bestimmten Materialeigenschaften fließen als Eingabewerte in die numerische Simulation ein. So lässt sich überprüfen, ob das hygrothermische Verhalten der Konstruktionsdetails die Praxisanforderungen erfüllt und ob die Simulation hinreichend genaue Vorhersagen (z.B. für andere konstruktive Lösungen oder andere Nutzungs- und Klimabedingungen) liefern kann.

3.1 Angaben zum Testhaus

Die Forderung der Erhaltung der denkmalgeschützten Fassade des 1583 erbauten Nürnberger „Herrenschießhauses“ (Abb. 3) erlaubte keine Außenwärmedämmung; es kam nur der Einsatz einer Innendämmung in Frage. Daher sind im Rahmen des BMWA-Industrieforschungsprojekts „Entwicklung leistungsfähiger Wärmedämmsysteme mit wirksamem physikalischen Feuchteschutz“ [10] und des EU-Projekts INSUMAT [4] öffentlich genutzte Räume des Herrenschießhauses mit 50 mm Innendämmung aus Calciumsilikat (Klimaplatte [8]) versehen und mit bauphysikalischer Messtechnik ausgestattet worden.



Abb. 3: Herrenschießhaus in Nürnberg

Die Sanierung wurde vom Hochbauamt Nürnberg, Abt. Kommunales Energiemanagement, projektiert und durchgeführt. Das Projekt zielte auf die Verringerung des Heizenergieverbrauchs und die Verbesserung des Nutzerkomforts durch Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur, ohne hygrische Schäden zu provozieren und die Dauerhaftigkeit der Konstruktion zu beeinträchtigen.

Die kapillaraktiven Eigenschaften der Klimaplatte erlauben den Einbau einer innen liegenden Wärmedämmung ohne Dampfsperre, wodurch das Trocknungspotential zum Innenraum hin erhalten bleibt. Dabei müssen, besonders bei der Entwicklung konstruktiver Details wie in Raumecken und bei Fensteranschlüssen, das Risiko der Kondensation in der Schicht zwischen Altkonstruktion und der Außenseite der Dämmplatte beachtet und die anfallenden Kondensatmengen quantifiziert werden.

3.2 Vergleich gemessener und berechneter hygrothermischer Größen

Mit DELPHIN4 wurden für die Außenwandkonstruktion des Herrenschießhauses, speziell für den nordöstlichen Gebäudewinkel als kritisches Detail, zweidimensionale Wärme- und Feuchtesimulationsrechnungen durchgeführt und die Ergebnisse mit den am Gebäudewinkel gewonnenen Messwerten verglichen. Als Randbedingungen wurden die vor Ort gemessenen Stundenwerte der Innen- und Außenklimate verwendet.

Die Raumtemperaturen bewegten sich meist um 18 bis 19°C, nur im Sommer stiegen sie auf höhere Werte an. Durch die vorerst seltene Nutzung des Raumes lag die Luftfeuchte im Innenraum durchweg sehr niedrig.

Eine Übersicht der installierten Messanordnung und einen Eindruck vom hygrothermischen Verhalten im kritischen Konstruktionsdetail Gebäudewinkel geben Abb. 4 und 5. Neben der Konstruktion und Anordnung der Sensoren sind das 2D-Temperaturfeld und das Feld der relativen Luftfeuchte am 21.01.02, dem Tag, an dem in der ersten, kritischen Heizperiode das Maximum der Luftfeuchte auftritt, dargestellt. Die relative Luftfeuchte im Winkelbereich erreicht hier an der kalten Seite der Innendämmung maximal 72%.

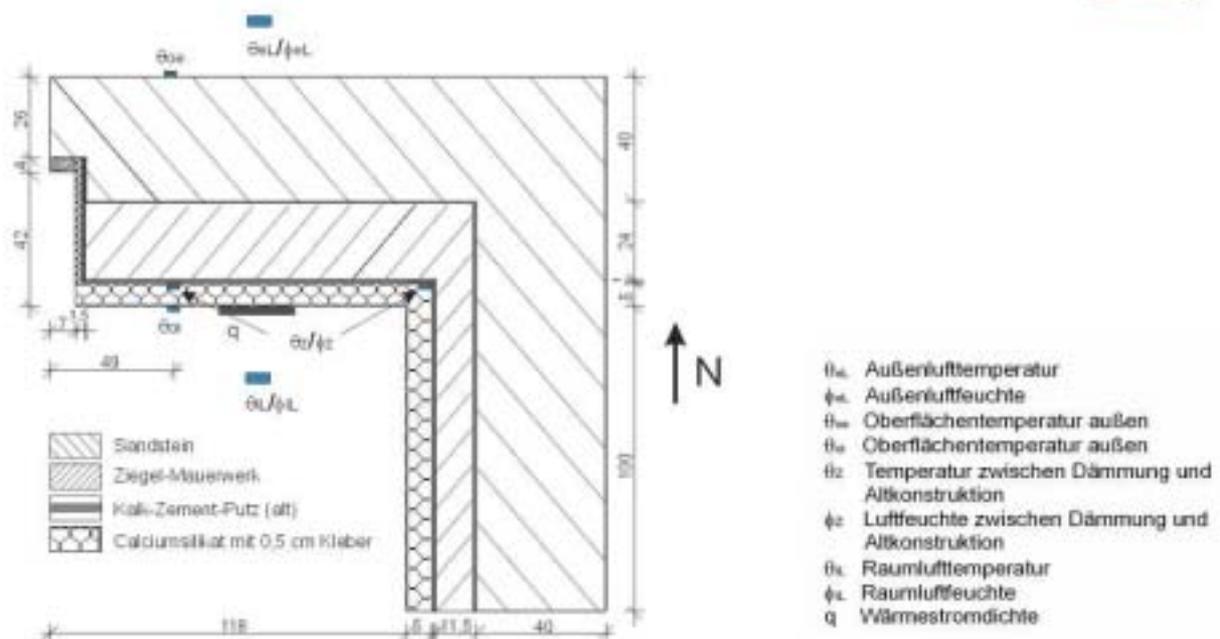


Abb. 4: Konstruktion und Messanordnung im nordöstlichen Gebäudewinkel des Herrenschießhauses.

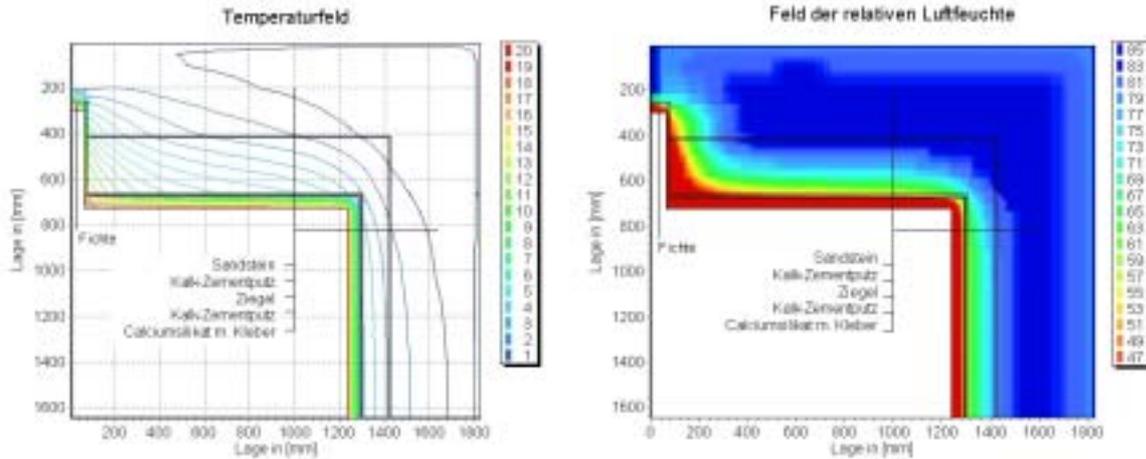


Abb. 5: Ergebnisse der Computersimulationen: Das 2D-Feld der Temperatur und der relativen Luftfeuchte im nordöstlichen Gebäudewinkel am 21.01.02.

Abb. 6 zeigt die berechnete und die an der Innenseite der Nordwand gemessene Wärmestromdichte q (siehe Messanordnung in Abb. 4). Bei einer Berechnung des effektiven U-Wertes aus den Messwerten von Wärmestrom und Oberflächentemperaturdifferenz ergibt sich ein Wert von $0,738 \text{ W/m}^2\text{K}$, was mit dem stationär ermittelten U-Wert von $0,74 \text{ W/m}^2\text{K}$ übereinstimmt. Der vor der Sanierung vorhandene Wärmedurchgangswert von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ wurde somit durch das Anbringen der Innendämmung halbiert.

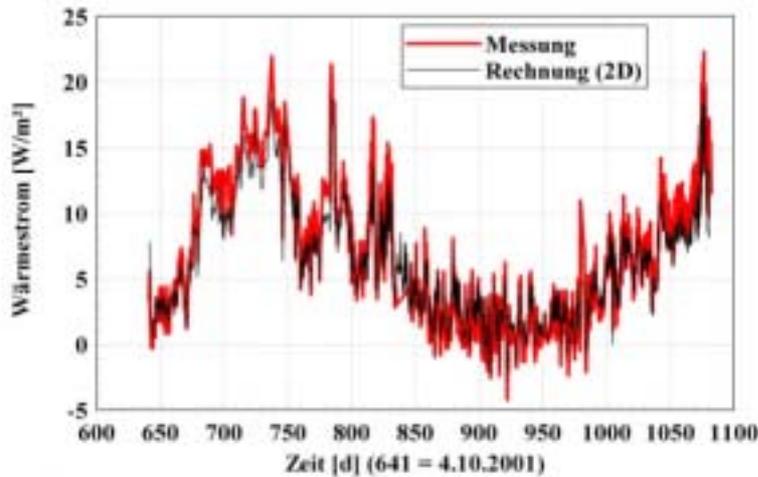


Abb. 6: Verlauf der Wärmestromdichte q an der Innenseite der Nordwand: Gegenüberstellung von gemessenen Werten und Simulationsergebnissen

In den Abb. 7 und 8 sind die Mess- und Rechenwerte der relativen Luftfeuchte ϕ zwischen Calciumsilikat-Innendämmung und vorhandener Konstruktion der Nordwand und im Gebäudewinkel (in der potenziellen Kondensationsebene) abgebildet. In der ersten Heizperiode findet eine Austrocknung der Einbaufeuchte statt, dies geschieht an der Nordwand schneller als im Gebäudewinkel.

Zu Beginn der ersten Kondensationsperiode betragen die relativen Luftfeuchten im Winkelbereich noch bis zu 85% - die Tatsache, dass sie in der zweiten Heizperiode nur bis ca. 65% ansteigen, ist ein Indiz dafür, dass es sich bei den anfangs hohen Luftfeuchten um Effekte von eingebrachter Baufeuchte (Calciumsilikat-Kleber) handelt.

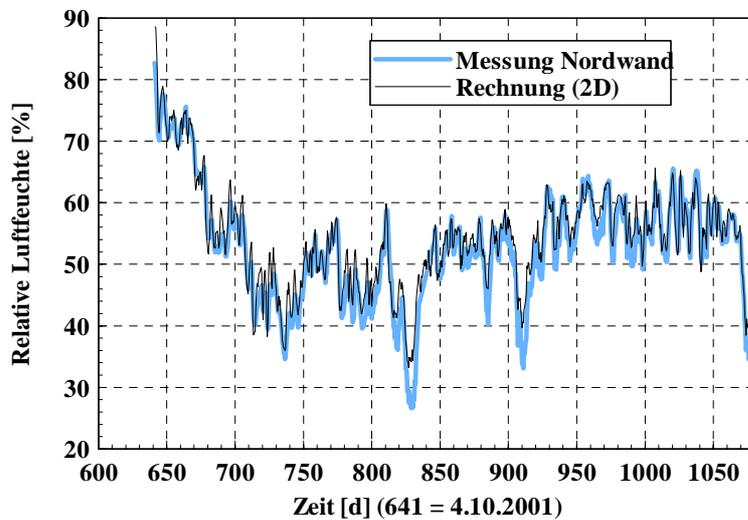


Abb. 7: Messung und Berechnung der relativen Luftfeuchte ϕ in der potentiellen Kondensationsebene der Nordwand

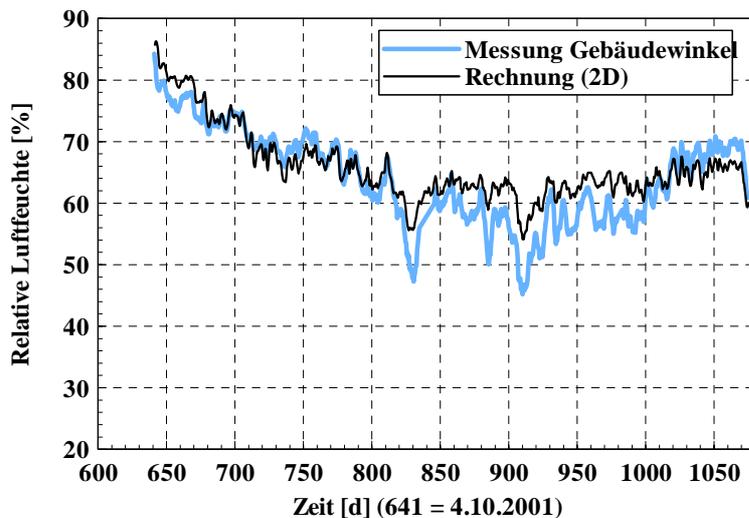


Abb. 8: Messung und Berechnung der relativen Luftfeuchte ϕ in der potentiellen Kondensationsebene des Gebäudewinkels

In den Abb. 9 und 10 sind die Mess- und Rechenwerte der Temperatur T zwischen Calciumsilikat-Innendämmung und vorhandener Konstruktion der Nordwand und im Gebäudewinkel (jeweils in der potenziellen Kondensationsebene) abgebildet.

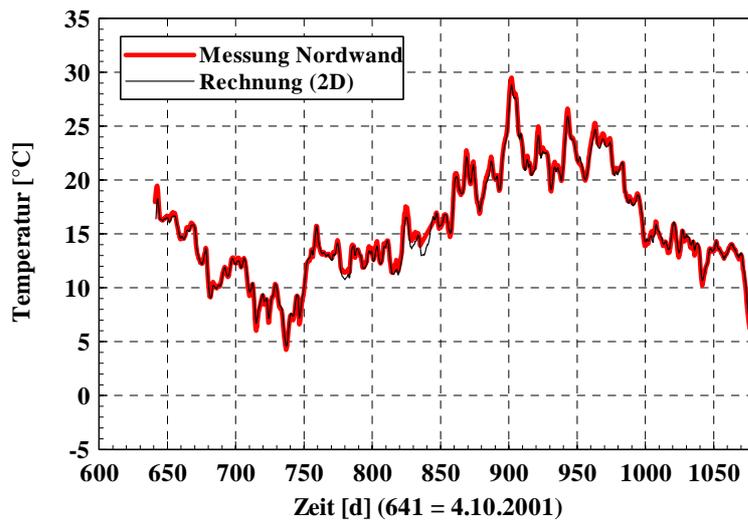


Abb. 9: Messung und Berechnung der Temperatur T in der potentiellen Kondensationsebene der Nordwand

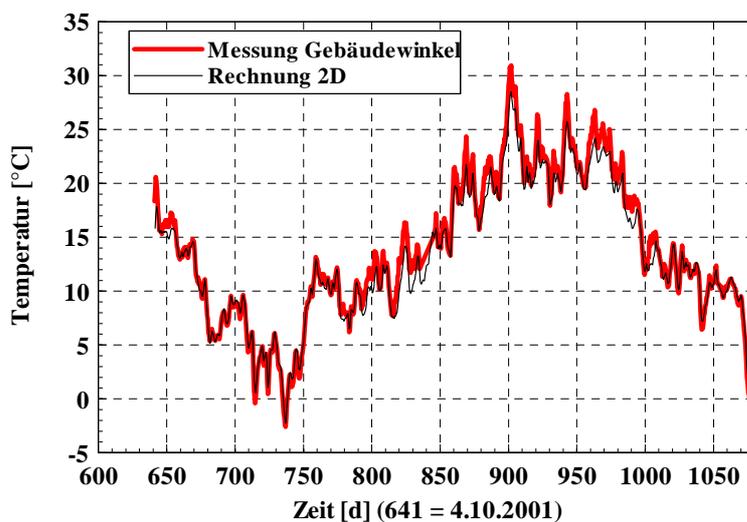


Abb. 10: Messung und Berechnung der Temperatur T in der potentiellen Kondensationsebene des Gebäudewinkels

Zwischen Wandbereich und Winkel treten Differenzen in der relativen Luftfeuchte von bis zu 20% und bis zu 5 K Temperaturdifferenz auf. Somit ist der Unterschied in Temperatur und Luftfeuchte durch die Auswirkungen des Raumwinkels als geometrische Wärmebrücke signifikant; eine Bewertung der Außenwinkel als kritisches Detail ist deshalb bei vergleichbaren Gebäuden gerechtfertigt. Besonders der Austrocknungsprozess nach dem Einbau erscheint im Außenwandbereich stark verlangsamt. Beim Auftreten höherer Raumluftfeuchten würden sich die Effekte der geometrischen Wärmebrücke in der potenziellen Kondensationsebene stärker bemerkbar machen.

Die Ergebnisse der Berechnung des hygrothermischen Verhaltens mit dem numerischen Simulationsprogramm DELPHIN4 stimmen gut mit den Messwerten überein. Die Übereinstimmung ist für die Temperaturen T erwartungsgemäß sehr gut; bei den relativen

Luftfeuchten ϕ treten Differenzen auf, die jedoch kurzfristig mit maximal 8 % innerhalb einer akzeptablen Schwankungsbreite liegen.

Insgesamt bleibt die Außenwand des Büroraums feuchtetechnisch unkritisch. Probleme sind bei gleich bleibenden Randbedingungen auch in Zukunft nicht zu erwarten. Höhere innere Feuchtelasten waren vor Ort während der Projektlaufzeit nicht gegeben, sollten aber in Voraussicht eventueller Nutzungsänderungen mit Hilfe der numerischen Simulation untersucht werden.

3.3 Auswirkungen höherer innerer Feuchtelasten

Die Außenwände des Herrenschießhauses sind durch die seltene Nutzung der Innenräume feuchtetechnisch kaum beansprucht worden. Deshalb wurden zusätzlich die Auswirkungen eines überhöhten Innenklimas ($\theta_i = 20^\circ\text{C}$ und $\phi_i = 70\%$), bspw. verursacht durch eine hohe raumseitige Feuchtelast (z.B. voller Schulungsbetrieb) und niedrige Lüftungsraten, in ein- und zweidimensionalen Simulationsrechnungen untersucht.

Bei einem Vergleich des Gangs der relativen Luftfeuchte in der Nordwand bei erhöhtem und gemessenem (aus Abb. 7) Innenklima in Abb. 11 ist ein offensichtlicher Unterschied erkennbar: Bei überhöhtem Innenklima liegt der Verlauf der relativen Luftfeuchte in der potentiellen Kondensatebene weit über dem des gemessenem Innenklimas.

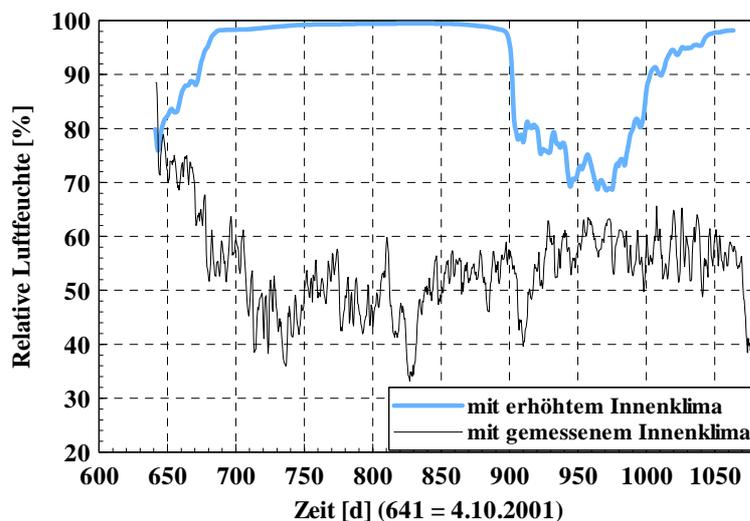


Abb. 11: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Nordwand mit überhöhtem und gemessenem (aus Abb. 7) Innenklima in der potentiellen Kondensationsebene

Für beide, gerade geschilderten Fälle zeigt die folgende Abb. 12 den Verlauf der Kondensatmenge. Während sich mit Realklima praktisch kein Kondensat hinter der Dämmung bildet, entstehen bei überhöhtem Innenklima bis zu $0,66 \text{ kg/m}^2$ Kondensat, was gemäß den Vorgaben der DIN 4108-3 als unproblematisch eingestuft werden kann. Ohne die Kapillarwirkung der Calciumsilikat-Dämmung läge die Kondensatmenge bei $2,3 \text{ kg/m}^2$ (siehe Abb. 2 oben); die Konstruktion wäre so nicht zulässig.

Die Calciumsilikat-Dämmung verfügt somit auch bei einer sehr hohen Raumlufffeuchte über eine ausreichende kapillare Leitfähigkeit, die für den ungestörten Wandaufbau zu einer Reduzierung des Tauwasseranfalls um $1,64 \text{ kg/m}^2$ führt.

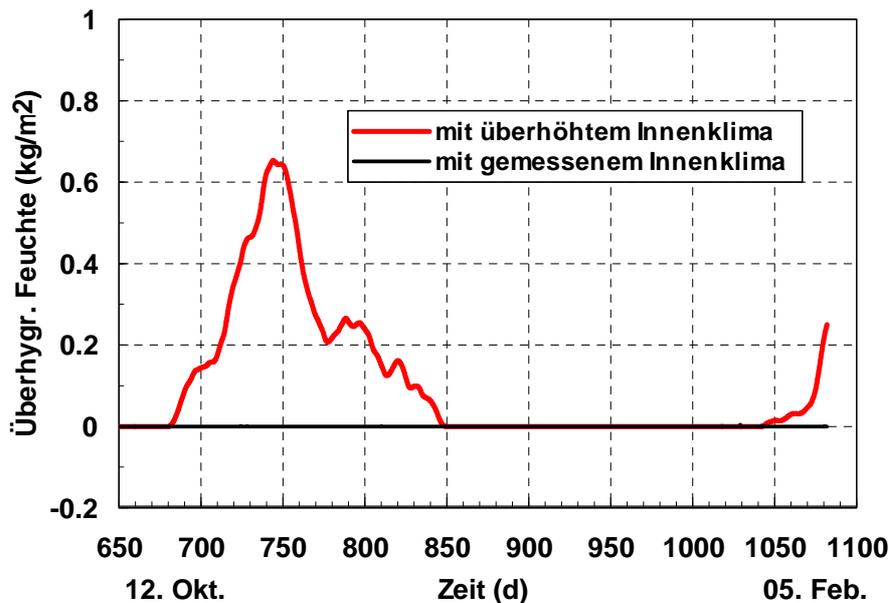


Abb. 12: Verlauf der Kondensatmenge in der Nordwand mit gemessenem und überhöhtem Innenklima.

Für Gebäudewinkel existiert kein korrespondierendes, flächenbezogenes Kriterium bezüglich anfallender Kondensatmengen. Stattdessen kann hier der Verlauf der relativen Luftfeuchte an der Innenoberfläche des Winkels als Richtschnur herangezogen werden. Bei einer relativen Luftfeuchte über 80% besteht die Gefahr der Schimmelpilzbildung. Da diese Grenze im Gebäudewinkel während eines längeren Zeitraums überschritten wird (Abb. 13), sollte für den Winkel eine genauere Betrachtung erfolgen. Diese Betrachtung sollte zum Ziel haben, Grenzwerte für Raumluftfeuchte und -temperatur zu ermitteln, die eine Schimmelpilzbildung ausschließen.

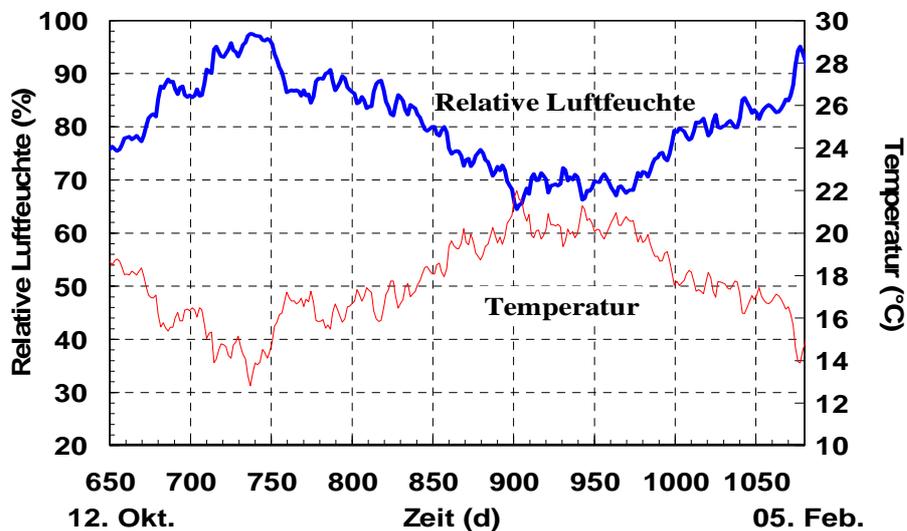


Abb. 13: Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Gebäudewinkel mit überhöhtem Innenklima

Eine sehr hohe innenklimatische Belastung führt im ungestörten Wandaufbau zu keinen hygrischen Problemen, was zum großen Teil auf die kapillar leitende und damit entspannende Wirkung der Calciumsilikat-Innendämmung zurückzuführen ist. Im Gebäudewinkel könnten konstante, sehr hohe Innenraum-Luftfeuchten von über 70% zur Schimmelpilzbildung an der Wandoberfläche führen, wenn weitere, für das Schimmelwachstum notwendige Bedingungen

gegeben sind (z.B. ungeeignete Beschichtungen: organische Anstrichkomponenten, Raufasertapete).

Es ist praktisch davon auszugehen, dass die Calciumsilikat-Innendämmung aufgrund ihres hohen pH-Wertes keine Grundlage für die Schimmelpilzbildung bietet, zumal eine Dauerbelastung mit 70% relativer Luftfeuchte unrealistisch hoch ist und solche Räume üblicherweise nicht am Gebäudewinkel angeordnet werden. Eine stärkere Dämmung würde zwar den U-Wert verbessern und damit die relative Luftfeuchte an der Wandoberfläche senken, aber gleichzeitig das Kondensationsrisiko in der Wand erhöhen, weshalb eine Dämmschichtdicke von 50 mm angeordnet wurde.

Somit bringt die ausgeführte Dämmung sowohl die thermischen als auch die hygrischen Gesichtspunkte für die Außenwandkonstruktion zur Deckung.

4 Rechnerische Nachweisverfahren

4.1 Das Berechnungsprogramm COND 2002

COND 2002 ist eine überarbeitete Version des DOS-basierten Programms COND [3]. Das analytische Berechnungsverfahren wurde am Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden entwickelt [12].

Die Programmoberfläche entspricht gängigen Windowsstandards (Abb.14). Die übersichtliche Menüanordnung gestattet eine intuitive und unkomplizierte Bearbeitung ohne langwierige Einführung. In einer Online-Hilfe werden neben der Programmbedienung auch bauphysikalische Hintergründe erläutert.

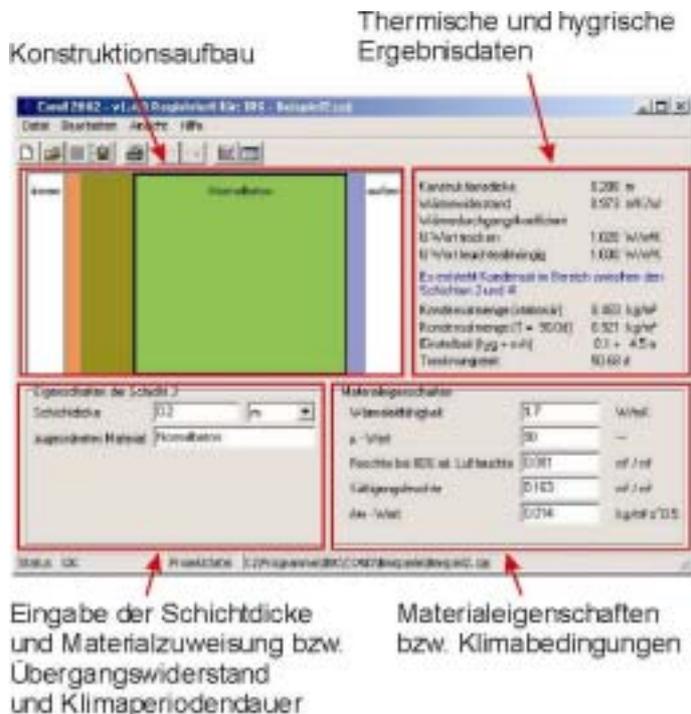


Abb. 14: Wesentliche Bedienelemente der COND 2002-Benutzeroberfläche

Die notwendigen Eingaben sind schnell vollzogen: Für eine Berechnung muss der Benutzer die Anzahl und Dicke der Schichten definieren, den Schichten ein Material zuweisen und gegebenenfalls die voreingestellten Wärmeübergangswiderstände sowie Klimaangaben für die Kondensationsperiode (Winter) anpassen, um eine Einschätzung der Konstruktion vornehmen zu können. Änderungen im Schichtaufbau, der Schichtdicke, bei den Klima- oder

Materialparametern und die Wiederholungsrechnung können praktisch ohne zusätzlichen Zeitaufwand durchgeführt werden. Selbst bei vielschichtigen Konstruktionen liegt innerhalb von ein bis zwei Minuten das Ergebnis vor.

Das analytische Berechnungsmodell sieht zu beiden Seiten des Wandquerschnittes jeweils ein konstantes, aber frei wählbares Klima vor. Dieses Blockklima wird über die Temperatur und relative Luftfeuchte definiert.

Die Akkumulation von Kondensatfeuchte lässt sich als Aufladevorgang (mit einer Exponentialfunktion) beschreiben. Nach einer material-, klima- und konstruktionsabhängigen Einstellzeit bildet sich ein stationärer Zustand bzw. ein globaler Fließ-Gleichgewichtszustand aus. Das Temperatur- und Feuchteprofil ändert sich nicht mehr, und man erhält die Feuchte- bzw. Temperaturverteilung im stationären Zustand. Durch Berücksichtigung des zeitabhängigen Einstellvorganges kann dann die nach einer bestimmten Zeit (z. B. 90 Tage) durch Kondensation verursachte Feuchteverteilung berechnet werden.

Das Feuchtespeicher- und Feuchtetransportverhalten wird in COND 2002 durch ein vereinfachtes Materialmodell (konstante bzw. lineare Transportfunktionen und eine linearisierte Feuchtespeicherfunktion) beschrieben.

- Die Wasserdampfdiffusion im porösen Material charakterisiert die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ .
- Der Flüssigwassertransport wird auf der Basis des Wasseraufnahmekoeffizienten A_w berechnet.
- Zur Beschreibung der Sorptionsisotherme (Feuchtespeicherfunktion) wird nur die Gleichgewichtsfeuchte des Stoffes bei 80 % relativer Luftfeuchte (w_{80}) und die kapillare Sättigungfeuchte (w_{sat}) benötigt.
- Die Berechnung des Wärmestroms und des U-Wertes erfolgt mit dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_R . Es wird dabei berücksichtigt, dass bei der Bildung von Kondensat mit steigendem Feuchtegehalt der Wärmewiderstand des Wand- oder Dachaufbaus sinkt.

COND 2002 enthält eine Materialliste mit bauüblichen Materialien (Abb. 13). Die vorhandene Datenbasis wird laufend durch Messungen am Baustofflabor des Instituts für Bauklimatik, Literaturrecherchen, Auswertung der DELPHIN4-Materialdatenbank und Zusammenarbeit mit Materialprüfanstalten ergänzt. Der Benutzer kann durch eine persönliche Materialliste das Spektrum beliebig erweitern und neue Materialien hinzufügen.

Material	Produzent/Hersteller	ProdID	Dichte	Lambda	μ	w_{80}	w_{sat}	A_w
			[kg/m³]	[W/mK]	[-]	[m³/m³]	[m³/m³]	[kg/m³K]
Wärmedämmputz			200	0,09	10	0,019	0,3	0,083
Zementputz			2000	1,2	31	0,022	0,25	0,019
Calciumsilikat-Faserisolier	Calcitherm		1500	1,3	32	0,098	0,33	0,04
Fachwerkisolier	Reinertex	Furcofil		0,17	12	0,021	0,3	0,016
Fliesen-Isolier			1750	1,3	25	0,01	0,33	0,04
Kalkzementisolier (10,7)	Quick-Hie		1850	1	25	0,061	0,206	0,008
Leichtbaumisolier			500	0,21	10	0,097	0,444	0,041
Zementisolier			2000	1,5	40	0,065	0,25	0,082
Anhydrit Estrich	Knauf	FE 50 Lago	2050	1,5	30	0,018	0,196	0,076

Abb. 13: Ausschnitt aus der COND-Materialdatenbank

Alle Ergebnisse werden in einer übersichtlichen, leicht verständlichen Druckausgabe dargestellt. Neben allen Eingabedaten (Abbildung der Konstruktion, Klimadaten, Übergangswiderstände) und den Ergebnissen (Temperatur- und Feuchteprofil, Ergebnis-Datentabelle, Vergleich mit Grenzwerten) sind auch Dampfdiffusions- und Kapillarleitwiderstände sowie der trockene und feuchteabhängige U-Wert abgebildet.

Zum Vergleich können auch die Ergebnisse des Glaserschemas (DIN 4108-3) angezeigt werden. Die automatisch erstellte Ausgabe enthält den Nachweis für den Tauwasserausfall. Die Kondensatmenge nach dem Glaserschema liegt wegen der Nichtberücksichtigung des Kapillarwassertransportes (Flüssigwassertransportes) zum Teil erheblich über der des COND-Verfahrens.

Abb. 14 zeigt das Temperatur- und Wassergehaltsprofil in einer Wandkonstruktion. Die rote Linie stellt den Temperaturverlauf über den Wandquerschnitt dar. Hellblaue Farbe kennzeichnet die in den einzelnen Materialschichten gespeicherte hygroscopische Feuchte. Erreicht der Wasserdampfpartialdruck den Sättigungsdampfdruck, bildet sich überhygroscopische Feuchte (Kondensat), welches im Profil dunkelblau dargestellt ist. Die blau gestrichelte Linie veranschaulicht die Grenze zwischen dem hygroscopischen und dem überhygroscopischen Feuchtebereich.

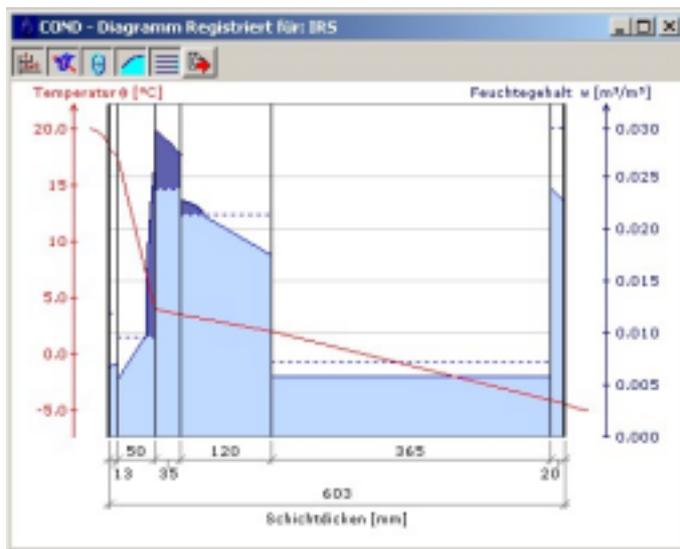


Abb. 14: Temperatur- und Wassergehaltprofil in der COND-Ergebnisdarstellung

Der Sprung im Wassergehaltsverlauf wird durch die unterschiedlichen Feuchtespeicherfunktionen der Baustoffe verursacht. Während die relative Luftfeuchte an den Materialgrenzen konstant bleibt, entsprechen dieser Luftfeuchte unterschiedliche Wassergehalte in den Materialien.

Im Unterschied zu DELPHIN4 ist COND 2002 kein Simulationsprogramm. Niederschlag und aufsteigende Feuchte werden nicht in die Rechnung mit einbezogen und die Klimarandbedingungen sind stark vereinfacht. COND 2002 liefert jedoch Erwartungswerte, die eine gesicherte Beurteilung der Konstruktion erlauben und kann für Nachweisberechnungen verwendet werden.

4.2 Das Simulationsprogramm DELPHIN4

Mit DELPHIN4 können ein- und zweidimensionale, aber auch radialsymmetrische dreidimensionale konstruktive Details untersucht werden, die künstlichen oder natürlichen Klima- und Nutzungsbedingungen ausgesetzt sind. In kapillarporösen Baustoffen lassen sich folgende bauphysikalisch bedeutsamen Vorgänge numerisch analysieren:

- **Wärmetransport** durch Bauteile und Temperaturfelder in Konstruktionsdetails (z.B. in Wandaufbauten, Anschlüssen oder Wärmebrücken etc.)

- **Feuchtetransport** (Flüssigkeit und Dampf) durch Bauteile und Feuchtefelder in Umfassungskonstruktionen, innere Kondensatbildung, Oberflächenkondensat sowie Einbaufeuchte, Schlagregen- und Bodenfeuchtebelastung als Grundlage der Dauerhaftigkeit von Konstruktionen (Vermeidung von Feuchteschäden etc.)
- **Salztransport:** Ein derzeit laufendes Forschungsprojekt (DFG-Salz, SPP 1122) zielt auf die Beschreibung und Implementierung von Transport-, Speicher- und Kristallisationsprozessen bauwerksschädlicher Salze ab.

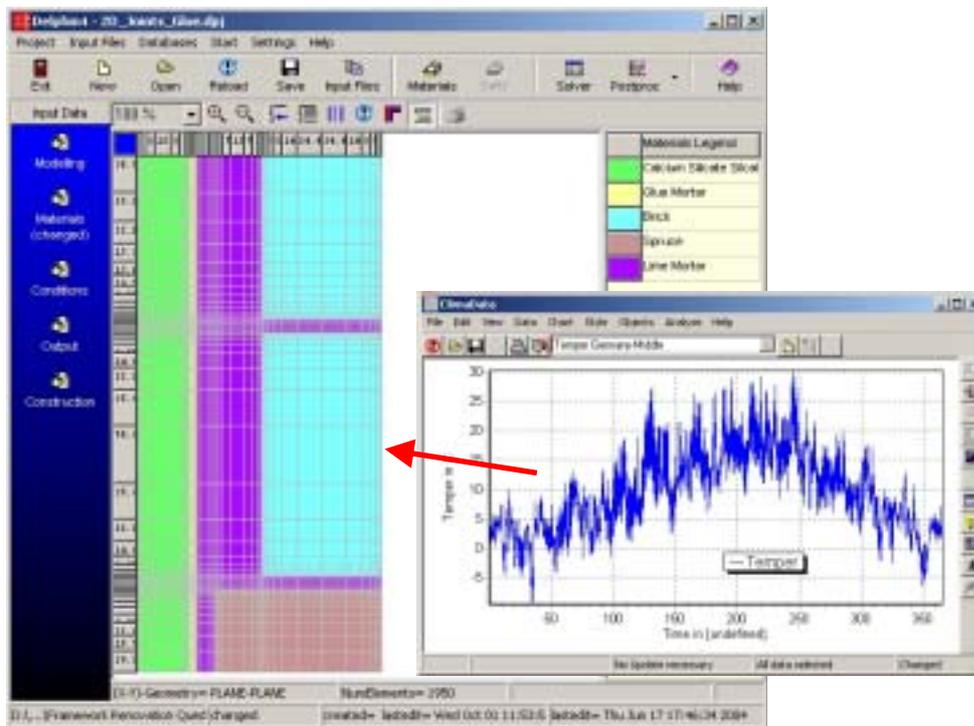


Abb. 15: DELPHIN4-Benutzeroberfläche: Geometrie und Diskretisierung des konstruktiven Details in Abb. 18 für die Simulation unter natürlichen Klimabedingungen und Visualisierung der zugewiesenen Außentemperaturen

Das Einsatzgebiet von DELPHIN4 erstreckt sich neben der Forschung auf die folgenden Gebiete:

- Architekten und Bauingenieure können mit der leicht verständlichen Programmoberfläche Temperatur- und Feuchteberechnungen für alle Umfassungskonstruktionen auf qualitativ hohem Niveau durchführen. Die Grafikausgabe ermöglicht eine ansprechende Präsentation der Ergebnisse.
- Gutachtern wird die Suche nach den Ursachen von Schadensfällen erleichtert. Durch eine verständliche Darstellung der Ergebnisse lassen sich diese Ursachen herausarbeiten und vermitteln. Außerdem können konstruktive Details auf spezielle hygrothermische Belastungen hin untersucht werden.
- Hersteller von Baumaterialien können mit Unterstützung von DELPHIN4 gezielt die hygrothermischen Eigenschaften ihrer Produkte optimieren. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes INSUMAT [4] wurde dies beispielsweise für das Wärmedämmsystem auf Calciumsilikatbasis zur Innenanwendung in Gebäuden mit erhaltenswerter Fassade realisiert.
- Junge Ingenieure werden an Hochschulen in die Benutzung von DELPHIN4 eingeführt und dabei für die Probleme des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports sensibilisiert.

Das durch internationale Vergleichsrechnungen [5] validierte Modell erlaubt die freie Einstellbarkeit von physikalischen Parametern und Randbedingungen. Dem Benutzer ist damit die Möglichkeit gegeben, Konstruktionen unter realen Nutzungsbedingungen zu beurteilen bzw. nach den eigenen Vorstellungen zu modellieren.

Das DELPHIN4-Simulationsprogrammpaket besteht aus einem *Preprozessing*programm, einem *Solver* und einem *Postprozessing*programm. Angeschlossen sind Datenbanken für Klima-, Materialdatensätze. Das Erstellen und Bearbeiten eines Projektes (*Preprozessing*) wird durch den „New Project Assistant“ erleichtert, der durch alle notwendigen Arbeitsschritte führt (Abb. 16). Ein etwas geübter Bearbeiter benötigt etwa zehn Minuten, um ein eindimensionales, instationäres Simulationsproblem vorzubereiten.

1. Konstruktion, Materialzuordnung und Diskretisierung: Im ersten Schritt erfolgt die geometrische Beschreibung der ein- oder mehrdimensionalen Konstruktion mittels Schichtanzahl und -dicke. Bei der Materialzuweisung kann der Anwender auf eine Materialdatenbank zurückgreifen, die fortwährend durch Messungen am bauphysikalischen Labor des Institutes für Bauklimatik (TU Dresden) bzw. in Zusammenarbeit mit anderen Instituten erweitert wird. Alle vorhandenen Materialdaten lassen sich vom Nutzer verändern und an projektgebundene, vorgegebene Eigenschaften anpassen. Anschließend wird das abgebildete Detail für die Berechnung automatisch diskretisiert.
2. Zuweisung von Randbedingungen: Es folgt die Zuordnung von Klimaten mit den dazugehörigen Übergangskoeffizienten an die begrenzenden Schichten. Es werden repräsentative Beispielklimate zur Verfügung gestellt. Messreihen oder vom Anwender erstellte Klimate (konstant oder veränderlich) können jedoch auch zugewiesen werden. Übergangs-, Anfangs- und Kontaktbedingungen ermöglichen es dem Benutzer, bestehende Verhältnisse möglichst genau wiederzugeben.
3. Zeitsteuerung und Datenausgabe: Zentrale Bedeutung besitzt die Auswahl der Ausgaben. Es lassen sich alle bauphysikalisch relevanten Größen ermitteln, z. B. relative Luftfeuchte, Wärmestrom, Tauwassermenge etc. Hierbei können Ergebnisdaten für die Gesamtkonstruktion, für Materialschichten oder an ausgewählten kritischen Punkten ausgegeben werden. Die Zeitschritte für die Ausgabedaten sind beliebig einstellbar.



Abb. 16: DELPHIN4 „New Project Assistant“: Dialoge zur Erstellung eines Projektes

Mit der zunehmenden Anwendung der hygrothermischen Bauteilsimulation in Forschung und Baupraxis steigen auch die Qualitätsanforderungen an die experimentell zu bestimmenden Materialkennwerte. Das hygrothermische Verhalten von Konstruktionen unter definierten äußeren Einflüssen soll bei vertretbarem Kosten- und Zeitaufwand nicht nur schnell, sondern auch genau und zuverlässig vorhersagbar sein.

Die verwendeten Methoden zur Verrechnung der Materialdaten als Eingabewerte für numerische Simulationsprogramme stellen neben der Genauigkeit der Laborexperimente ein entscheidendes Qualitätsmerkmal für die Simulationsergebnisse dar. Da die Kosten für umfassende Materialuntersuchungen beträchtlich sind, besteht ein großes Interesse an Materialmodellen, die eine hohe Genauigkeit bei geringer Anzahl zu messender Parameter liefern.

Die DELPHIN-Materialcharakterisierung [11] soll im Vergleich zur Material-Approximation nach COND am Beispiel der Feuchtespeicherfunktion veranschaulicht werden (Abb. 17). DELPHIN kann die im Labor gemessenen Daten mittels Spline-Funktionen interpolieren oder durch geeignete Parameterfunktionen approximieren. COND berechnet aus dem Eingabewert w_{80} den linearisierten Verlauf der Sorptionsisotherme bis zu einer maximalen hygroskopischen Luftfeuchte von 95%. Im überhygroskopischen Bereich (oberhalb 95% r.L.) wird die Saugspannungskurve ebenfalls linearisiert.

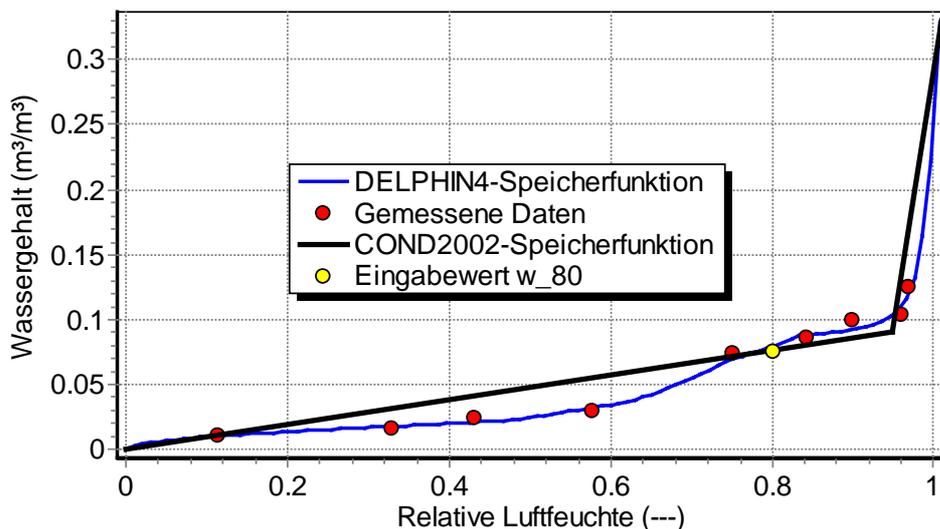
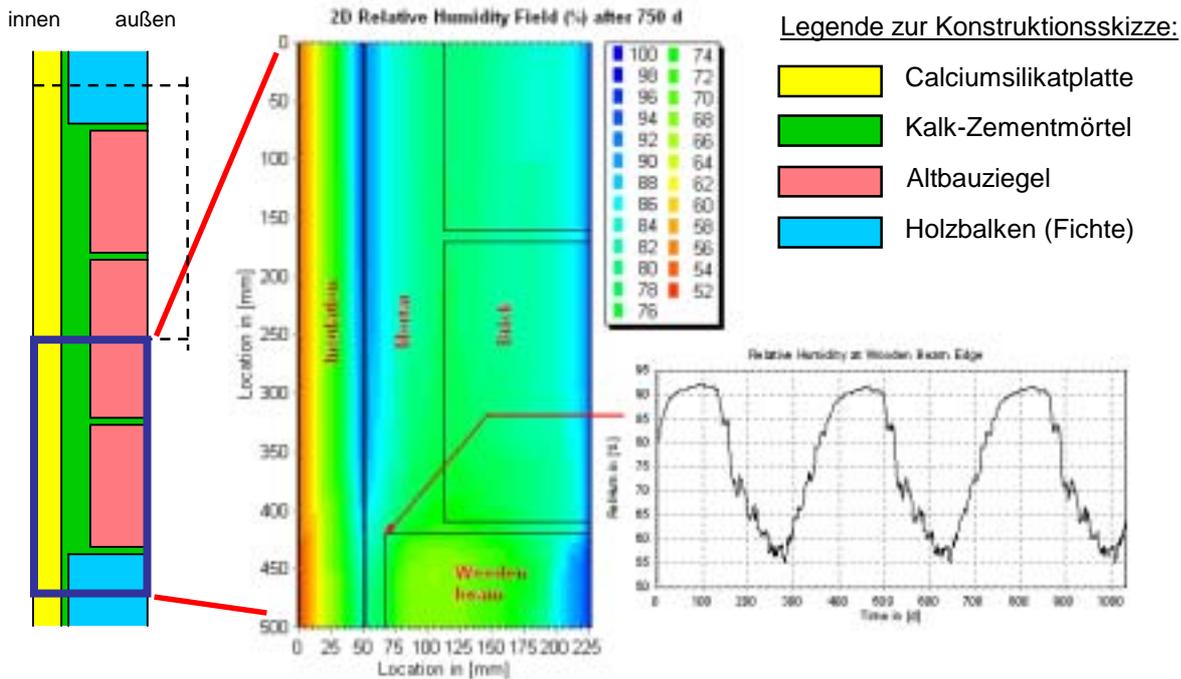


Abb. 17: COND2002- und DELPHIN4-Feuchtespeicherfunktion eines Mörtels.

Mit Hilfe des *Postprozessings* lassen sich zur Darstellung der Ergebnisse ansprechende und aussagekräftige Präsentationen entwerfen und in verschiedenen Formaten exportieren. Die Grafiken gewährleisten ein schnelles Erfassen der wesentlichen Entwicklungen und Ergebnisse. Die Veränderungen in 2D-Details, beispielsweise von Feuchtegehaltsverteilungen, können durch das Aufzeichnen und Abspielen der zeitlichen Entwicklung als Film anschaulich dargestellt werden.

In Abb. 18 ist beispielhaft das Feld der relativen Luftfeuchte in einer Fachwerkkonstruktion mit Innendämmung am 31. Januar dargestellt. Die dunkleren Bereiche entsprechen hohen relativen Luftfeuchten bzw. Kondensat. Auf der rechten, dem Wetter ausgesetzten Seite der Konstruktion hat ein Regenereignis die oberflächennahen Schichten durchfeuchtet, was aber zu keiner langfristigen Feuchtebelastung führt.

Aus den vorhandenen Ergebnisdaten lässt sich gleichermaßen der zeitliche Verlauf der relativen Luftfeuchte an ausgewählten Punkten der Konstruktion ausgeben, hier z.B. an der Kante des Konstruktionsvollholzes (Abb. 18, rechts). Die vorliegende Konstruktion kann als hygrisch stabil



angesehen werden, was aus den jährlich wiederkehrenden Maxima der relativen Luftfeuchte von 92% geschlossen werden kann.

Abb. 18: Feld der relativen Luftfeuchte in einer Fachwerkkonstruktion und Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Ecke des Konstruktionsholzes

4.3 Berechnungsbeispiel Ziegelmauerwerk mit Calciumsilikat-Innendämmung

Die Nachweisverfahren nach den gängigen Normen versagen bei Problemen mit kapillaraktiver Innendämmung, weil die Kapillarität der Baustoffe nicht in die Berechnung eingeht. Daher bietet das Institut für Bauklimatik mit den Programmen COND 2002 und DELPHIN4 erweiterte Nachweisverfahren an, deren Anwendung am Beispiel einer innen gedämmten Ziegelwand demonstriert werden soll.

Das Beispiel Ziegelmauerwerk mit Calciumsilikat-Innendämmung repräsentiert den Fall eines sanierten Altbaus der Jahrhundertwende mit denkmalgeschützter Fassade. Abb. 19 und Tabelle 1 geben den Konstruktionsaufbau sowie wichtige bauphysikalische Stoffkennwerte jeder Materialschicht wieder.

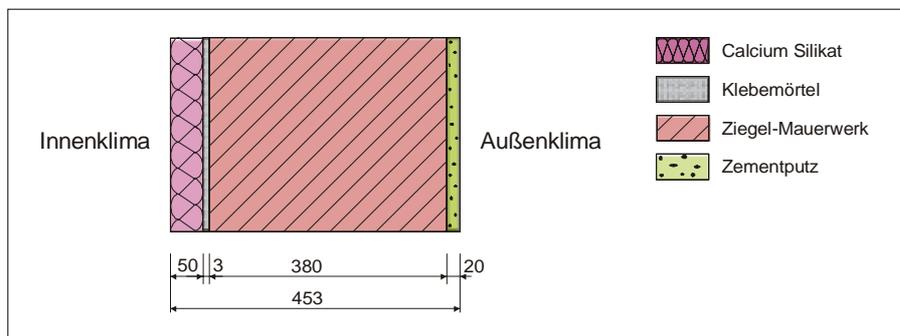


Abb. 19: Wandaufbau

Materialkennwerte

Tabelle 1 enthält die Basiskennwerte der Materialien des Wandaufbaus aus Abb. 19. Für COND sind wegen der Linearisierung der Materialfunktionen die Materialien damit hinreichend beschrieben. DELPHIN4 verwendet ein erweitertes Modell [12] zur hygrothermischen Materialcharakterisierung, welches zusätzlich zu den Basiskennwerten die Bestimmung von Materialfunktionen durch Simulation von Laborexperimenten erfordert.

	Symbol	Dichte	Spez. Wärme- kapazität	Wärmeleit- fähigkeit	Wasserge- halt bei 80%	Kap. Sätti- gungsfeuchte	Wasseraufnah- mekoeffizient	Diffusionswid- erstandszahl
Material	COND2002	ρ	c	λ_R	w_{80}	w_{sat}	A_w	μ
	DELPHIN4	ρ	c	λ_R	Θ_{80}	Θ_{cap}	A_w	μ_{dry}
	Einheit	kg / m ³	J / kgK	W / mK	Vol%	Vol%	kg / m ² s ^{0,5}	-
Calciumsilikat		240	980	0,065	0,8	85	0,776	6
Klebmörtel		1800	840	0,93	2,8	22	0,009	35
Ziegel-Mauerwerk		1720	840	0,842	0,6	34	0,061	9
Zementputz		1900	840	0,930	2,5	19	0,004	25

Tab. 1: Materialkennwerte

Randbedingungen

Die Analyse der Wandkonstruktion erfolgt hier mit DIN-konformen Klimarandbedingungen, dem Blockklima, sowie mit Klimadaten aus dem Testreferenzjahr für Mitteldeutschland.

1. Blockklima: Entsprechend der bald erscheinenden Neufassung der DIN 4108-03 werden folgende Randbedingungen angesetzt, wobei kein Schlagregen berücksichtigt wird:

$$\text{Winter} \quad \theta_e = -5^\circ\text{C}, \varphi_e = 80\%, \theta_i = 20^\circ\text{C}, \varphi_i = 50\%, 90 \text{ Tage}$$

$$\text{Sommer} \quad \theta_e = +15^\circ\text{C}, \varphi_e = 70\%, \theta_i = 18^\circ\text{C}, \varphi_i = 60\%, 90 \text{ Tage}$$

$$(\theta_{K-Ebene} = 15^\circ\text{C} \text{ für Wände}, \theta_{K-Ebene} = 18^\circ\text{C} \text{ für Dächer})$$

Berechnungen mit Blockklima erfolgen mit COND2002 und DELPHIN4.

2. Testreferenzjahr: Die Simulationen mit Realklima nach dem mitteldeutschen Testreferenzjahr werden mit DELPHIN4 durchgeführt. Als Klimarandbedingungen an der Außenseite der Bauteile dienen die Stundenwerte der Außenlufttemperatur, Außenluftfeuchte, kurzwellige Gesamtstrahlung, langwellige Strahlungsbilanz, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlagsmenge.

Aus Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlagsmenge wird der Schlagregenvektor senkrecht zur Bauteilsfläche ermittelt. In die kurzwellige Gesamtstrahlung gehen Wandrichtung, Wandneigung und die geografischen Daten des Gebäudes ein. Raumseitig beschreibt ein Klimagang mit einer Periodendauer von einem Jahr ($19^\circ\text{C} < \theta_i < 23^\circ\text{C}$, $50\% < \varphi_i < 70\%$) eine realistische Wärme- und Feuchtelast.

Nachweis mit COND2002 unter Blockklima

Die Ergebnisse der COND-Berechnungen bei Belastung der Ziegelwand durch Blockklima geben die Abb. 20 und 21 wieder. Das Feuchteprofil zeigt erwartungsgemäß einen dunkel gekennzeichneten Tauwasserbereich auf der kalten Seite der Dämmung, dessen absolute Menge mit 166 g/m^2 aber als unkritisch eingestuft werden kann.

Die tabellarische Auflistung in Abb. 21 zeigt den Temperatur-, Dampfdruck- und Wassergehaltsverlauf sowie die Breite der Kondensatschicht und -menge. Die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse zeigt, dass der U-Wert von $0,721 \text{ W/m}^2\text{K}$ in einem Bereich liegt, der bei einer nachträglichen Innendämmung als empfehlenswert angesehen werden kann. Ohne Innendämmung würde der U-Wert $1,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ betragen.

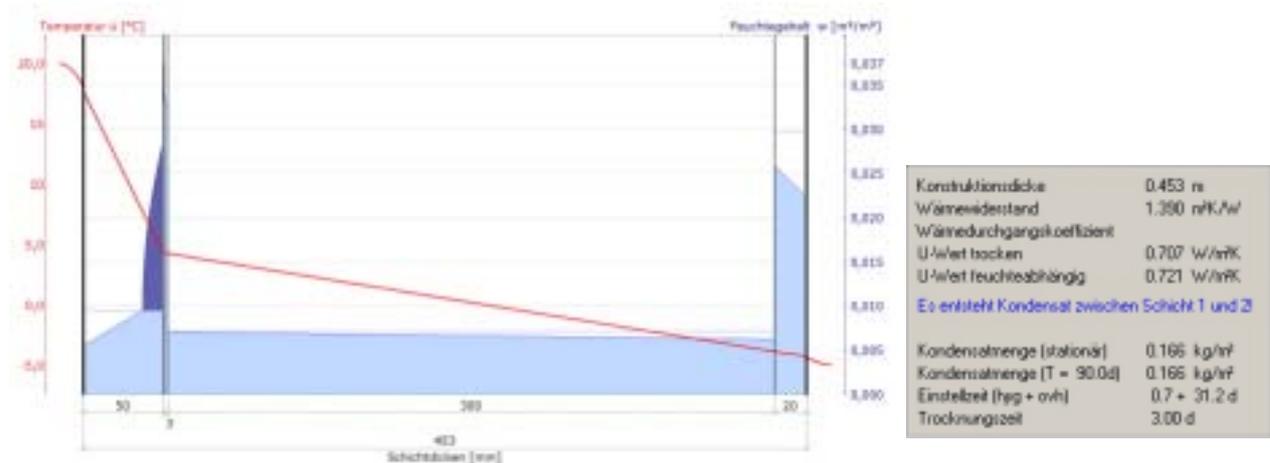


Abb. 20: COND-Temperatur- und Feuchteprofil (links) und Screenshot des COND-Ergebnisfeldes (rechts)

Schicht/Material	θ [°C]	P_{tot} [Pa]	P [Pa]	w [m^3/m^3]	d_s [mm]	n_s [kg/m ²]
Luftdicht (links)	20,0	2000	1169			
1 Calciumsilikatplatte	17,6	2016	1169	0,036		
	4,1	820	820	0,029	15,4	0,17
2 Calciumsilikat-Klebmörtel	4,0	817	808	0,038	0,3	0,00
3 Altbauziegel	4,0	817	808	0,033		
4 Zementputz	-3,9	442	386	0,037		
	-3,9	442	386	0,036		
	-4,3	420	321	0,024		
Luftdicht (rechts)	-5,0	402	321	0,022		

Abb. 21: COND-Ergebnisübersicht, Temperatur-, Dampfdruck- und Wassergehaltsverlauf sowie Kondensatverteilung und -menge

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse nach COND

Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (feuchteabhängig)	$U = 0,721 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (trocken)	$U = 0,707 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Kondensatmasse am Ende der Kondensationsperiode	$m_{w,T} = 0,166 \text{ kg}/\text{m}^2$
Kondensatmasse am Ende der Kondensationsperiode (nach Glaser)	$m_{w,T} (\text{Glaser}) = 1,493 \text{ kg}/\text{m}^2$
Trocknungszeit	$t_v = 3 \text{ d}$
Nachweis	erfüllt!

Tab. 2: COND-Ergebnisse unter Blockklima

COND weist zusätzlich die Ergebnisse nach DIN 4108-3 (Glaserverfahren) aus. Der Unterschied zwischen dem Resultat der COND-Berechnung und der einfachen Glaserrechnung beträgt hier $1,327 \text{ kg}/\text{m}^2$. Gemäß den Ergebnissen der Glaserrechnung dürfte die Konstruktion nicht umgesetzt werden, da weit über $1 \text{ kg}/\text{m}^2$ Kondensat entsteht, wohingegen das COND-Ergebnis durch die Berücksichtigung der Kapillarität eine unproblematische Kondensatmenge ausweist und das Kriterium nach DIN 4108-3 somit erfüllt ist.

Nachweis mit DELPHIN4 unter Blockklima

Instationäre DELPHIN4 Berechnungen unter konstantem Blockklima dienen dem Vergleich der Programme, da beide Programme unterschiedliche Materialmodelle und verschiedene Lösungsalgorithmen benutzen.

Die genaueren DELPHIN4 Temperatur- und Feuchteprofile in Abb. 22 zeigen den Einfluss der Nichtlinearität der Feuchtetransportkoeffizienten. Für baupraktische Belange und weniger kritische Konstruktionen liegen die Differenzen durch die Linearisierung bei COND in einem akzeptablen Bereich. Für kritische Konstruktionen sollten instationäre Simulationen unter Realklima ausgeführt werden.

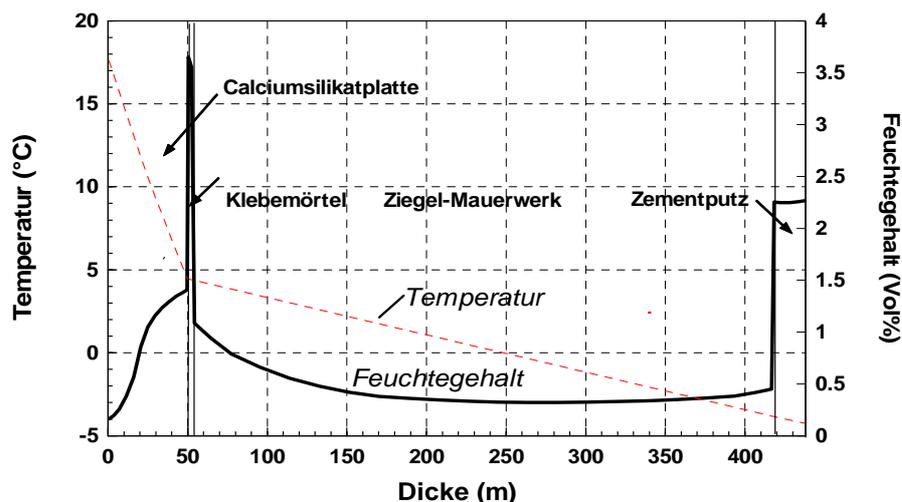


Abb. 22: Temperatur- und Feuchteprofil nach 90 Tagen (zum Ende des Winters)

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse nach DELPHIN

Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion (feuchteabhängig)	$U = 0,732 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
Kondensatmasse am Ende der Kondensationsperiode	$m_{W,T} = 0,156 \text{ kg}/\text{m}^2$
Trocknungszeit	$t_V = 13 \text{ d}$
Nachweis	erfüllt!

Tab. 3: DELPHIN-Ergebnisse unter Blockklima

Nachweis mit DELPHIN4 unter Realklima

Auch wenn während der kalten Witterungsperiode kritischere Klimawerte als die des Blockklimas auftreten können und die Belastung durch Schlagregen im Blockklima nicht berücksichtigt wird, sind die Berechnungsergebnisse wegen der konstant tiefen Außentemperatur über 90 Tage als Härtestest anzusehen.

Insgesamt verlaufen die realen Klimate milder. Daher liegen die Ergebnisse unter Blockklima weiter auf der sicheren Seite als unter Realklima. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen nach Blockklima und Testreferenzjahr bestätigt dies.

Im Gegensatz zu den Berechnungen mit Blockklima kommt es hier nicht zur Bildung von innerem Kondensat, wie am Verlauf der integralen überhygroskopischen Feuchte in Abb. 24 zu sehen ist. In der folgenden Abb. 25 wird die durch Schlagregen verursachte Feuchte im Außenputz dargestellt, die in der Regel nicht weit eindringt und schnell wieder austrocknet. Somit handelt es sich in diesem Beispiel bei der überhygroskopischen Feuchte ausschließlich um Schlagregen.

Die nächsten Abb. 26 und 27 zeigen den Gang der Temperatur und der relativen Luftfeuchte in der Kondensationsebene φ_K (links) und an der inneren Bauteiloberfläche φ_{oi} (rechts). $\varphi_K \geq 95\%$ ist ein Indiz für Tauwasser in der Konstruktion und somit für die Länge der Kondensationsperiode, φ_{oi} sollte wegen der Gefahr der Schimmelpilzbildung unter 80% liegen.

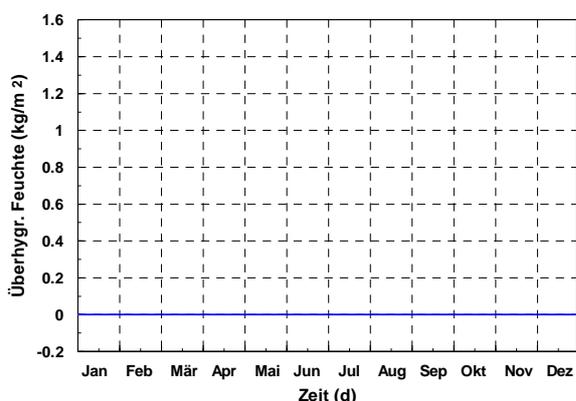


Abb. 24: Überhygroskopischer Feuchtegehalt in Folge von Kondensation im 5. Jahr
→ kein Kondensat

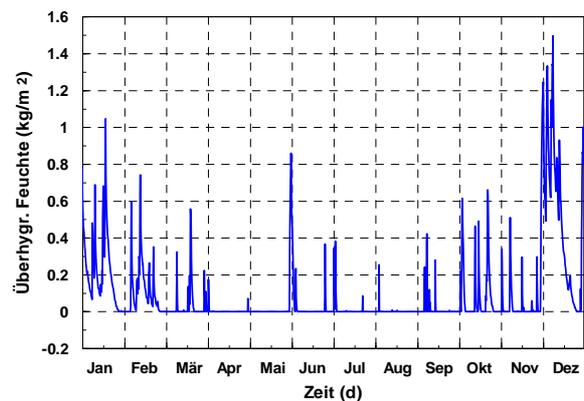


Abb. 25: Überhygroskopischer Feuchtegehalt in Folge von Schlagregeneinwirkung im 5. Jahr

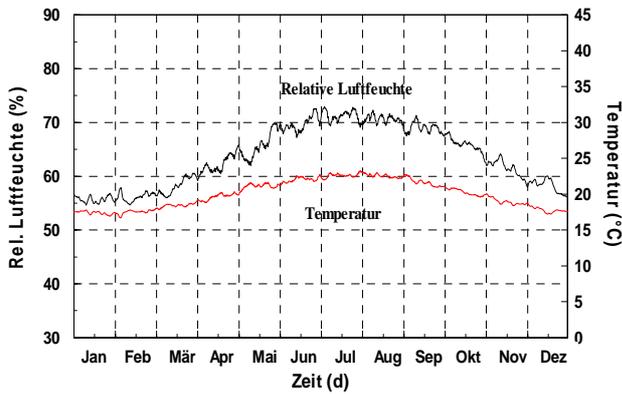


Abb. 26: Temperatur und relative Luftfeuchte an der Wandinnenoberfläche im 5.Jahr

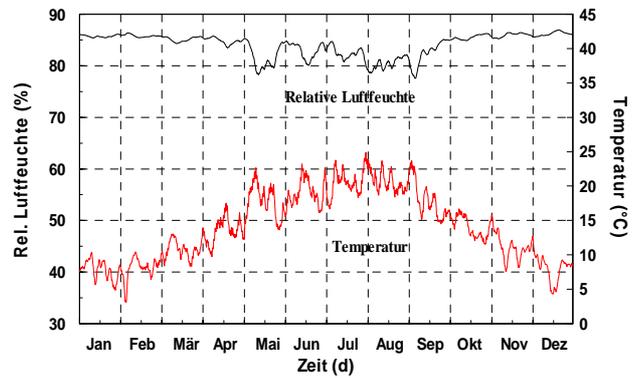


Abb. 27: Temperatur und relative Luftfeuchte zwischen Calciumsilikat und Klebemörtel im 5. Jahr

Im Jahrgang des Feuchtefeldes in Abb. 28 ist das oberflächliche Eindringen des Schlagregens gut erkennbar. Zu einem kleinen Teil dringt der Schlagregen auch in die Ziegelschicht ein. Der Verlauf des Feuchtegehalts in der Calciumsilikatschicht und im Klebemörtel ist weniger ausgeprägt, was auf den schwach sinusförmigen Klimagang auf der Innenseite zurückzuführen ist. Jedoch sind auch hier noch die Auswirkungen sommerlicher Wärmeperioden zu sehen. Tabelle 4 fasst die DELPHIN4-Ergebnisse mit instationärem Klima tabellarisch zusammen.

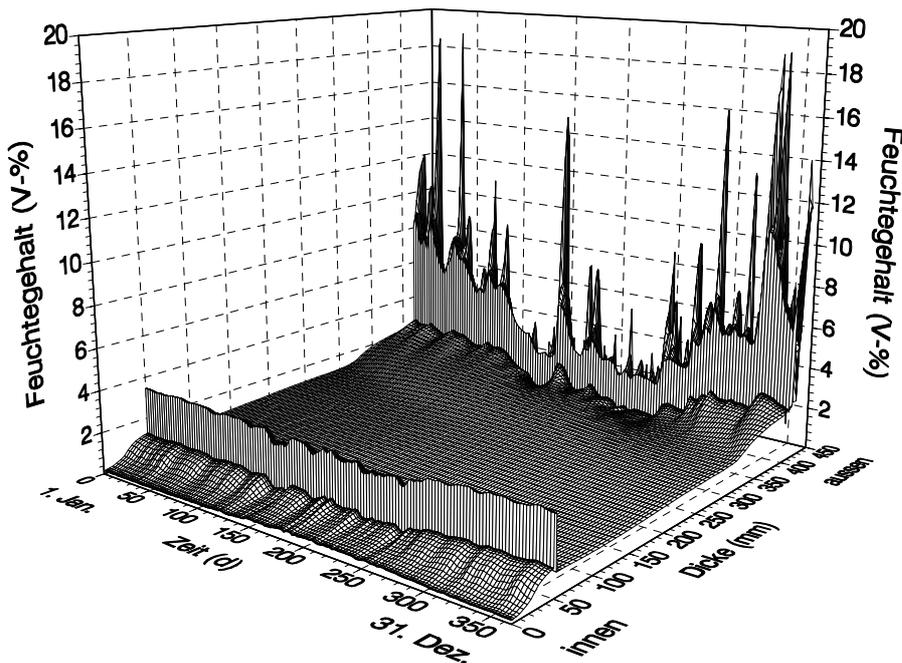


Abb. 28: Feuchtefeld in der Konstruktion im 5.Jahr (Außenputzschicht im hinteren Bereich des Diagramms)

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse nach DELPHIN	
	Ermittelter Maximalwert
Wärmedurchgangskoeffizient (feuchteabhängig)	$U = 0,738 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
Überhygroskopische Feuchte in Folge Schlagregen	$m_{W,\text{Regen}} = 1,496 \text{ kg}/\text{m}^2$
Überhygroskopische Feuchte in Folge innerer Kondensation	$m_{W,T} = 0,0 \text{ kg}/\text{m}^2$
Trocknungszeit für Kondensat	$t_v = 0 \text{ d}$
Relative Luftfeuchte an der Wandinnenoberfläche φ_{oi}	$\varphi_{oi} = 73 \%$

Tab. 4: DELPHIN-Ergebnisse mit instationärem Klima

5 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Calciumsilikat-Innendämmung verfügt neben einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit, einem diffusionsoffenem und kapillaraktivem Porensystem sowie guten Feuchtespeichereigenschaften über einen hohen pH-Wert, wodurch es für Sanierungsmaßnahmen im Altbaubestand hervorragend geeignet ist. Durch die messtechnische Überwachung (hier dokumentiert am Beispiel des Herrenschießhauses in Nürnberg) konnte die Funktionsfähigkeit des Innendämmsystems unter Praxisbedingungen nachgewiesen werden.

Das Softwareprogramm COND2002 wurde vom Institut für Bauklimatik für den baupraktischen Einsatz entwickelt, um ein erweitertes Werkzeug zur hygrothermischen Beurteilung von Wandkonstruktionen bereitzustellen. COND2002 berücksichtigt neben den auch in den Standardnachweisverfahren enthaltenen Temperaturfeld- und Wasserdampfdiffusionsberechnungen zusätzlich die Flüssigwassertransporteigenschaften (Kapillaraktivität) der Baustoffe. Damit kann der Nachweis für Innendämmsysteme geführt werden, die bei Anwendung der Verfahren nach DIN 4108 (Glaserverfahren) und DIN EN ISO 13788 (Monatsbilanzverfahren) nicht nachgewiesen werden können.

Die Nachweise nach dem Glaserverfahren und nach dem COND2002-Verfahren dürfen nicht als wirklichkeitsgetreue Feuchtefeldberechnungen missverstanden werden. Die konstanten Klimabedingungen (Blockklima) stellen einen (Härte-)Testfall dar, der so in der Realität nicht auftritt.

Das numerische Simulationsprogramm DELPHIN4 erlaubt die realitätsnahe Beurteilung von ein- und zweidimensionalen Wandkonstruktionsdetails unter instationären (natürlichen) Klimabedingungen. Neben einem erweiterten Materialmodell zur Beschreibung der hygrothermischen Eigenschaften der Baustoffe verfügt DELPHIN4 über eine Reihe weiterer Möglichkeiten, die vorwiegend für den wissenschaftlichen Anwender implementiert wurden.

6 Literatur

- [1] DIN 4108 Teil 3: 2001-07 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [2] DIN EN ISO 13788: 2001-11 Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren

- [3] Häupl, P., Fechner, H., Stopp, H.: Ein einfaches Verfahren zur feuchtetechnischen Bemessung von Außenbauteilen. Dresdner Bauklimatische Hefte, Heft 7, 91 Seiten
- [4] Grunewald, J. et al.: INSUMAT Workpackage reports 1 – 5, Development of Insulation Materials with Specially Designed Properties for Building Renovation, 2003, Institut für Bauklimatik, Eigenverlag der TU Dresden
- [5] EU Working Group HAMSTAD: WP1 "Determination of the Moisture Storage and Moisture Transport Function for several Transport Potentials by means of the Sorptive and Capillary Moisture Uptake and the Pore Size Distribution" and WP2 "Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods". Proposal Number GRD1-1999-20007
- [6] Grunewald, J.: Konvektiver und diffusiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. 1997 Dissertation an der TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen
- [7] Häupl, P., Fechner, H., Jurk, C., Petzold, H., Stopp, H., Finkenstein, C.: Entwicklung leistungsfähiger Wärmedämmsysteme mit wirksamem physikalischem Feuchteschutz, Abschlussbericht Forschungszentrum Jülich, Projektträger BEO, Projektnummer 0329663B/0, April 2003
- [8] Firma Calsitherm Silikatbaustoffe GmbH: www.calsitherm.de
- [9] Häupl, P., Grunewald, J.: Gekoppelter Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport in porösen Baustoffen. Bauphysikkalender 2003, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [10] Anlauff, Häupl, P., Petzold, H.: Innendämmung - eine Alternative. Zeitschrift Energieeffizientes Bauen Nr. 3/2001
- [11] Jenisch, R.: Berechnung der Feuchtigkeitskondensation und die Austrocknung, abhängig vom Außenklima. Zeitschrift Gesundheits-Ingenieur, Teil 1, Heft 9 (1971), und Teil 2, Heft 10 (1971)
- [12] Grunewald J., Häupl P., Bomberg M.: Towards an Engineering Model of Material Characteristics for Input to HAM-Transport Simulations, Part 1: An approach. Journal of Thermal Envelope and Building science, Sage Publications, London, UK and Thousand Oaks, USA, No 26, 4/April 2003, 343-366
- [13] P. Häupl, H. Fechner, K. Jurk, H. Petzold, H. Stopp, C. Finkenstein: Entwicklung leistungsfähiger Wärmedämmsysteme mit wirksamen physikalischem Feuchteschutz, Abschluss-Forschungsbericht, TU Dresden, April 2003, 270 S. Gefördert durch das Bundeswirtschaftsministerium und die Industrie
- [14] H. Stopp, P. Strangfeld, H. Fechner, P. Häupl: "The Hygrothermic Performance of External Walls with Inside Insulation" proceedings, Performance of Exterior Envelopes of whole Buildings VIII, Florida, Dec. 2001