

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

FAKULTÄT ARCHITEKTUR

INSTITUT FÜR BAUKLIMATIK

LEHRSTUHL FÜR BAUPHYSIK

DIPLOMARBEIT

Thema:

Implementierung eines analytischen
Verfahrens zur hygrothermischen Bewertung
von mehrschichtigen Bauteilen

vorgelegt von

cand. Ing. Andreas Nicolai

geb. 27.02.1976

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein Verfahren zur analytischen Berechnung des stationären Feuchte- und Wärmetransports in mehrschichtigen Umfassungskonstruktionen (z.B. Wänden und Decken) abgeleitet und beschrieben. Das Verfahren ist begrenzt auf konstante Klimabedingungen und eine eindimensionale Transportrichtung. Weiterhin wird die Algorithmierung und Umsetzung des Verfahrens in ein Computerprogramm erläutert. Die Benutzeroberfläche des im Rahmen der Diplomarbeit entstandenen Programmes wird beschrieben ebenso wie die Entwurfskriterien und die verwendeten Programmiertechniken.

Abstract

This paper contains the description of an analytical method for the calculation of heat and moisture transport through structures (such as walls and ceilings) with multiple layers. The method is limited to one-dimensional transport and constant climatic conditions. Furthermore the transformation of the method into an algorithm and the implementation into a computer program is described. The program, which has been created as part of this work, and its user interface is demonstrated and explained as well as the programming techniques used and design considerations.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Zusammenfassung | II |
| Abstract | II |
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Verzeichnis der Tabellen | X |
| Verzeichnis der verwendeten Symbole und Indizes | XI |
| Danksagung | XIV |
| Erklärung | XV |
| | |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Grundlagen | 2 |
| 2.1 Luftfeuchte | 2 |
| 2.2 Kondensation und Taupunkttemperatur | 2 |
| 3 Transportprozesse in porösen Stoffen | 3 |
| 3.1 Bilanzgleichungen für den Wassertransport | 3 |
| 3.2 Bilanzgleichung für die innere Energie | 5 |
| 3.3 Anwendung der Bilanzgleichungen auf das Schichtenmodell | 6 |
| 4 Feuchte- und Wärmetransport in mehrschichtigen Konstruktionen | 8 |
| 5 Stationäre Wärmeleitung | 9 |
| 5.1 Wärmeleitung innerhalb einer Schicht | 9 |
| 5.2 Wärmeleitung bei einer mehrschichtigen Konstruktion | 10 |
| 6 Stationärer Feuchtetransport | 12 |
| 6.1 Definition der Feuchtespeicherparameter | 12 |
| 6.2 Vereinfachungen für eine analytische Lösung | 14 |
| 6.3 Feuchtetransport infolge Dampfdiffusion | 15 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.3.1 | Feuchtetransport durch Dampfdiffusion innerhalb einer Schicht. | 15 |
| 6.3.2 | Feuchtetransport durch Dampfdiffusion bei mehreren Schichten | 17 |
| 6.4 | Kondensatbildung bei mehrschichtigen Konstruktionen | 18 |
| 6.4.1 | Berechnung der Kondensatmenge nach Glaser | 19 |
| 6.4.2 | Erweiterung des Wasserdampfdruckschemas um die kapillare Leitung | 20 |
| 6.5 | Feuchtetransport durch kapillare Leitung | 20 |
| 6.5.1 | Feuchtetransport in einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht. | 20 |
| 6.5.2 | Feuchtetransport in einer vollständig überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht. | 23 |
| 6.6 | Feuchtetransport durch kombinierte Dampfdiffusion und kapillare Leitung in einer mehrschichtigen Konstruktion | 24 |
| 6.6.1 | Feuchtesprungbedingungen | 25 |
| 6.6.2 | Feuchtedurchgang bei mehrschichtigen Konstruktionen unter Berücksichtigung des Kapillarwassertransportes (Klassifizierung) | 26 |
| 6.7 | Feuchtedurchgang bei einer Kondensationsebene | 26 |
| 6.7.1 | Berechnung der Durchfeuchtungshöhe. | 29 |
| 6.7.2 | Berechnung der Durchfeuchtungsbreite im stationären Zustand | 29 |
| 6.7.3 | Berechnung der Kondensatmenge | 30 |
| 6.8 | Feuchtedurchgang bei zwei oder mehr benachbarten Kondensatebenen | 30 |
| 6.8.1 | Gesamtfeuchtestromdichte bei beliebig vielen benachbarten Kondensatebenen. | 31 |
| 6.8.2 | Berechnung der Durchfeuchtungshöhe bei mehreren Kondensatebenen | 32 |
| 6.8.3 | Berechnung der Durchfeuchtungsbreiten bei mehreren benachbarten Kondensatebenen | 34 |
| 6.8.4 | Berechnung der Kondensatmenge bei mehreren benachbarten Kondensatebenen. | 34 |
| 7 | Einstellvorgänge bei winterlichem Sprungklima. | 35 |
| 7.1 | Aufladungsvorgänge bei einer Kondensatebene. | 35 |
| 7.2 | Einstellvorgänge bei mehreren benachbarten Kondensatebenen | 37 |
| 7.3 | Hygroskopische Einstellzeit | 38 |
| 7.4 | Überhygroskopische Einstellzeit. | 40 |
| 7.5 | Berechnung der Kondensatmenge nach vorgegebener Zeit | 40 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8 | Trocknungsprozesse beim sommerlichen Sprungklima | 41 |
| 8.1 | Trocknungsvorgang bei einer Kondensatebene | 41 |
| 8.2 | Trocknungsvorgang bei mehreren benachbarten Kondensatebenen | 42 |
| 8.3 | Die Trocknung als Nachweiskriterium | 43 |
| 9 | Algorithmierung und Implementierung des Verfahrens | 44 |
| 9.1 | Umsetzung der theoretischen Grundlagen in ein Berechnungsschema | 44 |
| 9.1.1 | Eingangsgrößen | 44 |
| 9.1.2 | Das Berechnungsschema | 45 |
| 9.1.3 | Unteralgorithmus für eine Kondensatebene | 46 |
| 9.1.4 | Unteralgorithmus für mehrere Kondensatebenen und dazwischenliegende, vollständig überhygroskopisch durchfeuchtete Schichten | 48 |
| 9.1.5 | Berechnung der Trocknungsdauer | 48 |
| 9.1.6 | Berechnung von Vergleichswerten nach DIN 4108 | 49 |
| 9.2 | Programmwurf | 49 |
| 9.2.1 | Allgemeine und spezielle Anforderungen an das Programm | 50 |
| 9.2.2 | Das Berechnungskonzept des COND-Programmes | 50 |
| 9.2.3 | Entwurf der Benutzerführung | 52 |
| 9.2.4 | Konzept der Datenstruktur | 53 |
| 9.3 | Realisierung und Umsetzung des Programmes | 53 |
| 9.3.1 | Grundlegender Programmablauf | 53 |
| 9.3.2 | Die COND-Projektdatei | 55 |
| 9.3.3 | Implementierung der Datenstrukturen für Eingabe und Berechnungsergebnisse | 55 |
| 9.3.4 | Implementierung des Berechnungsschemas | 57 |
| 9.3.5 | Extrahierung des Berechnungscodes in einen Solver | 57 |
| 10 | Beschreibung des Programmes COND | 59 |
| 10.1 | Das Hauptformular | 59 |
| 10.1.1 | Das Hauptmenü | 59 |
| 10.1.1.1 | Das Datei-Menü | 59 |
| 10.1.1.2 | Das Bearbeiten-Menü | 60 |
| 10.1.1.3 | Das Ansicht-Menü | 61 |
| 10.1.1.4 | Das Hilfe-Menü | 61 |

| | | |
|----------|---|----|
| 10.1.2 | Die Werkzeuggeste | 62 |
| 10.1.3 | Die Eingabemasken des Hauptformulars | 62 |
| 10.1.3.1 | Das Konstruktionsmodell | 63 |
| 10.1.3.2 | Die Eingabemaske für die Schichtdaten | 64 |
| 10.1.3.3 | Eingabe der Klimadaten | 65 |
| 10.1.3.4 | Die Berechnungszusammenfassung | 65 |
| 10.2 | Die Ausgabefenster | 67 |
| 10.3 | Die Materialdatenbank | 67 |
| 10.3.1 | Ausblenden von Spalten | 68 |
| 10.3.2 | Der Datenbankfilter | 68 |
| 10.3.3 | Zugriff auf die Materialdatenbank | 69 |
| 10.4 | Die persönliche Materialliste | 69 |
| 10.4.1 | Die persönliche Materialliste bearbeiten | 69 |
| 10.4.2 | Die Materialliste laden/speichern | 70 |
| 10.4.3 | Pfad der Materialliste festlegen | 70 |
| 10.5 | Drucken und Druckvoransicht | 70 |
| 10.5.1 | Drucker einrichten | 71 |
| 10.5.2 | Der Druckdialog | 71 |
| 10.5.3 | Druckvoransicht | 72 |
| 10.6 | Programmeinstellungen | 73 |
| 10.6.1 | Allgemeine Einstellungen | 74 |
| 10.6.2 | Druckoptionen | 74 |
| 10.7 | Installation und Benutzereinrichtung | 74 |
| 10.7.1 | Netzwerkinstallation | 74 |
| 10.8 | Ein Beispielprojekt für den Nachweis einer Konstruktion | 75 |
| 10.8.1 | Ein neues Projekt erstellen | 75 |
| 10.8.2 | Schichten hinzufügen | 75 |
| 10.8.3 | Parameter der Schichten eintragen | 75 |
| 10.8.4 | Klimabedingungen anpassen | 76 |
| 10.8.5 | Berechnungsergebnisse überprüfen | 76 |
| 10.8.6 | Report drucken | 76 |

| | |
|--|-----------|
| 11 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse | 77 |
| 11.1 Bewertung der Ergebnisse..... | 77 |
| 11.2 Weiterführende Arbeit | 77 |
| 11.3 Schlußbemerkungen | 78 |
| Referenzen | 79 |
| Literatur | 79 |
| Anhang A | 80 |
| A.1 Ableitung der Gleichung der Gesamtfeuchtestromdichte bei einer Kondensatebene .. | 80 |
| A.2 Ableitung der Gleichung für die Durchfeuchtungsbreite | 81 |
| A.3 Ableitung der Gleichung für die Gesamtfeuchtestromdichte für zwei benachbarte Kon- densationsebenen | 82 |
| Anhang B | 84 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------|--|----|
| Abb. 1 | Transportprozesse durch ein Schichtenelement | 7 |
| Abb. 2 | stationäre Wärmeleitung innerhalb einer Schicht | 9 |
| Abb. 3 | Temperaturprofil einer mehrschichtigen Konstruktion | 10 |
| Abb. 4 | Definition der charakteristischen Feuchtespeicherparameter | 13 |
| Abb. 5 | Idealisierte Sorptionsisotherme | 14 |
| Abb. 6 | Feuchtetransport durch Dampfdiffusion | 15 |
| Abb. 7 | Ideelles Dampfdruckprofil einer mehrschichtigen Konstruktion. | 17 |
| Abb. 8 | Fallunterscheidungen beim Glaserschema. | 19 |
| Abb. 9 | Dampf- und Feuchteprofil einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht | 21 |
| Abb. 10 | Angenäherter Verlauf der Diffusivität | 22 |
| Abb. 11 | Dampf- und Feuchteprofil einer überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht . . . | 24 |
| Abb. 12 | Sprung im Feuchtegehalt bei aneinandergrenzenden, überhygroskopisch durchfeuchteten Schichten | 25 |
| Abb. 13 | Feuchteströme in zwei Schichten, zwischen denen Kondensat entsteht. | 27 |
| Abb. 14 | Änderung des Feuchtefeldes (Aufladung) einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht | 35 |
| Abb. 15 | hygroskopischer Einstellvorgang bei einer 2-schichtigen Konstruktion | 38 |
| Abb. 16 | Ablaufdiagramm für den Hauptalgorithmus | 46 |
| Abb. 17 | Ablaufdiagramm Unteralgorithmus für eine Kondensationsebene | 47 |
| Abb. 18 | Datenstruktur eines COND-Projektes | 54 |
| Abb. 19 | beispielhafte Projektdatei für COND | 56 |
| Abb. 20 | Auszug aus dem Quelltext der Berechnungsroutine | 57 |
| Abb. 21 | Das Datei-Menü | 60 |
| Abb. 22 | Das Bearbeiten-Menü mit dem Schicht-Untermenü | 61 |
| Abb. 23 | Das Anzeige-Menü. | 61 |
| Abb. 24 | Das Hilfe-Menü | 62 |
| Abb. 25 | Die Werkzeugleiste | 62 |
| Abb. 26 | Das Haupteingabeformular des COND-Programmes | 63 |

| | | |
|---------|--|----|
| Abb. 27 | Das Kontextmenü des Konstruktionsmodells | 64 |
| Abb. 28 | Die Eingabemaske für eine Schicht | 64 |
| Abb. 29 | Klimadaten-Eingabemaske | 65 |
| Abb. 30 | Materialdatenbank - Importdialog | 67 |
| Abb. 31 | Kontextmenü der Materialdatenbank | 68 |
| Abb. 32 | Filterdialog für Materialdatenbank | 68 |
| Abb. 33 | Mögliche Fehlermeldung beim Öffnen der Materialdatenbank | 69 |
| Abb. 34 | Bearbeitungsdialog für die Materialliste | 69 |
| Abb. 35 | Der Druckdialog | 71 |
| Abb. 36 | Druckvoransicht | 73 |
| Abb. 37 | Der Einstellungsdialog | 73 |
| Abb. 38 | Konstruktion mit den einzelnen Schichten (noch ohne Materialzuordnung) | 75 |

Verzeichnis der Tabellen

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabelle 1 | Definition charakteristischer Feuchtespeicherparameter | 12 |
| Tabelle 2 | Konstruktionseingabedaten | 44 |
| Tabelle 3 | Materialdaten | 44 |
| Tabelle 4 | Klimaeingabedaten | 45 |

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Indizes

Symbole (hier verwendet und gemäß DIN 4108)

| | | | |
|------------------------|------------------|---------------------------------------|---|
| p_v | p | Pa | <i>Wasserdampfpartialdruck</i> |
| $p_{v, \text{sat}}$ | p_{sat} | Pa | <i>Sättigungsdampfdruck</i> |
| T | θ | °C | <i>Temperatur</i> |
| φ | φ | - | <i>Relative Luftfeuchte</i> |
| φ_{hyg} | | - | <i>Maximale hygroskopische Luftfeuchte</i> |
| j^Q | q | W/m ² | <i>Wärmestromdichte</i> |
| j^{m_v} | g | kg/m ² s | <i>Wasserdampfdiffusionsstromdichte</i> |
| j^{m_l} | | kg/m ² s | <i>Flüssigwasserstromdichte</i> |
| $j^{m_{l+v}}$ | | kg/m ² s | <i>Gesamtfeuchtestromdichte</i> |
| r_T | R | m ² K/W | <i>Wärmedurchgangswiderstand</i> |
| $r_{T, i}$ | R_{si} | m ² K/W | <i>Wärmeübergangswiderstand, raumseitig</i> |
| $r_{T, e}$ | R_{se} | m ² K/W | <i>Wärmeübergangswiderstand, außenseitig</i> |
| r_v | | m/s | <i>Wasserdampfdiffusionswiderstand</i> |
| r_l | | m ² s/kg | <i>Flüssigwasserleitwiderstand</i> |
| r_{l+v} | | m ² s/kg | <i>Kombinierter Dampf-/Flüssigwasserleitwiderstand</i> |
| θ_l, θ | | m ³ /m ³ | <i>Volumetrischer Feuchtegehalt</i> |
| θ_{cap} | | m ³ /m ³ | <i>Kapillarer Sättigungsfeuchtegehalt</i> |
| θ_{hyg} | | m ³ /m ³ | <i>Maximaler hygroskopischer Feuchtegehalt</i> |
| A_w | W_w | kg/(m ² s ^{0,5}) | <i>Wasseraufnahmekoeffizient</i> |
| ρ_l | | kg/m ³ | <i>Dichte der Flüssigphase</i> |
| ρ_w | | kg/m ³ | <i>Dichte des Wassers</i> |
| δ_{air} | | s | <i>Dampfleitfähigkeit für Luft</i> |
| $D_{v, \text{air}}$ | δ_0 | kg/(m · s · Pa) | <i>Wasserdampf-Diffusionskoeffizient in ruhender Luft</i> |

| | | | |
|------------------|-----------------|---|--|
| D_v | δ_p | $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ | <i>Wasserdampf-Diffusionskoeffizient in einem Material</i> |
| D_l | | m^2/s | <i>Diffusivität für Flüssigwasser</i> |
| μ | μ | - | <i>Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor</i> |
| λ | λ | W/mK | <i>Wärmeleitfähigkeit</i> |
| t | t | s | <i>Zeit</i> |
| t_{hyg} | | s | <i>Hygroskopische Einstellzeit</i> |
| t_{ovh} | | s | <i>Überhygroskopische Einstellzeit</i> |
| t_T | t_c | s | <i>Dauer der Kondensationsperiode</i> |
| t_v | t_{ev} | s | <i>Dauer der Verdunstungsperiode</i> |
| W_{l+v} | | kg/m^2 | <i>Flächenbezogene Kondensatmasse</i> |
| W_v | | kg/m^2 | <i>Während der hygroskopischen Einstellzeit gespeicherte Wassermasse</i> |

Indizes

| | |
|----------------|--|
| i | <i>innenliegende Seite einer Schicht, ohne angegebenen Schichtindex bezeichnet es die Innenseite der Konstruktion (interior)</i> |
| e | <i>außenliegende Seite einer Schicht, ohne angegebenen Schichtindex bezeichnet es die Außenseite der Konstruktion (exterior)</i> |
| sat | <i>gesättigt (saturated)</i> |
| cap | <i>kapillar (capillary)</i> |
| hyg | <i>hygroskopisch (hygroscopic)</i> |
| ovh | <i>überhygroskopisch (overhygroscopic)</i> |
| v | <i>Wasserdampf (vapor)</i> |
| w | <i>Wasser (als Komponente)</i> |
| l | <i>Flüssigwasser (liquid water)</i> |
| l+v | <i>Summe aus Wasserdampf und Flüssigwasser</i> |
| k | <i>Schichtindex, ab Kapitel 6.4 speziell für die innenseitig an die K-Ebene grenzende Schicht</i> |
| k+1 | <i>Index für die außenseitig an die K-Ebene grenzende Schicht</i> |
| k ₁ | <i>Schichtindex für die innenseitig an einen Kondensationsbereich angrenzende, teilweise durchfeuchtete Schicht</i> |
| k ₂ | <i>Schichtindex für die außenseitig an einen Kondensationsbereich angrenzende, teilweise durchfeuchtete Schicht</i> |

Danksagung

Meinen Betreuern Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Häupl, Herrn Dr.-Ing. J. Grunewald und Herrn Dipl.-Ing. H. Fechner möchte ich für die gewährte Unterstützung, die vielen Anregungen und Vorschläge und nicht zuletzt für die zahlreichen, fruchtbaren Diskussionen meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Weiterhin möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Institutes für Bauklimatik für die vielfältige Hilfe bedanken, vornehmlich bei Dipl.-Phys. M. Funk für die Unterstützung bei der Bearbeitung des Kapitels „Transportprozesse in porösen Medien“.

Zuletzt möchte ich mich bei allen, die mir während der Bearbeitungszeit mit Rat und Tat zur Seite standen ganz herzlich bedanken.

Erklärung

Ich versichere, diese Diplomarbeit selbstständig, nur mit den angegebenen Hilfsmitteln und Quellen und in Abstimmung mit meinen Betreuern, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Häupl, Herrn Dr.-Ing. J. Grunewald und Herrn Dipl.-Ing. H. Fechner erarbeitet zu haben.

Dresden, den 25. September 2002

1 Einleitung

Bei der bauphysikalischen Beurteilung von Umfassungskonstruktionen gilt es in der Regel eine Aussage über die Wärmeleitung und den Feuchtetransport in und durch die Konstruktion zu treffen. Anhand von festgelegten Grenzwerten lässt sich so entscheiden, ob die Konstruktion in dem gewählten Aufbau ausgeführt werden kann.

Die Beurteilung des hygrothermischen Verhaltens erfolgt zur Zeit in der Bemessungspraxis durch getrennte Betrachtung von Wärme- und Feuchtetransport. Für das Verhalten der Konstruktion hinsichtlich des Feuchtetransports gilt es nachzuweisen, dass die Menge des in den Wintermonaten entstehenden Kondensats kleiner als die Trocknungsmenge im Sommer ist. Die Berechnung der Kondensatmenge erfolgt in den europäischen Regularien sowie in der Bemessungspraxis üblicherweise nach dem Wasserdampfdruckschema (Glaserschema).

Das Verfahren nach Glaser liefert auf eine einfache Art und Weise die Menge des zu erwartenden Kondensats, ohne dabei jedoch die Ausbreitung des anfallenden Wassers durch kapillare Transportprozesse zu berücksichtigen. Gerade aber die kapillare Leitung trägt deutlich zur hygri-schen Entspannung der Konstruktion bei. Als Beispiel ist dabei eine Konstruktion mit verwendeter Innendämmung aus Calziumsilikat zu nennen (siehe Beispielrechnung im Anhang B). Die Berechnung mit dem Glaserschema liefert eine im Vergleich wesentlich höhere Kondensatmenge. Berücksichtigt man jedoch Flüssigwasserströme infolge der hohen Kapillarwasserleitfähigkeit des Dämmmaterials, erhält man eine stark reduzierte Kondensatmenge.

Das dieser Arbeit zugrundeliegende Berechnungsschema berücksichtigt die Flüssigwasserströme und liefert damit eine reduzierte und realitätsnähere Kondensatmenge im Vergleich zu der mit dem Glaserschema berechneten Kondensatmenge. Es basiert auf dem in [1] beschriebenen analytischen Modell zum Feuchtedurchgang von Prof. Dr.-Ing. habil P. Häupl.

Die Anwendung des Verfahrens soll durch ein benutzerfreundliches Programm erleichtert werden. Die theoretischen Grundlagen, der daraus abgeleitete Berechnungsalgorithmus und das im Rahmen der Diplomarbeit entstandene Programm werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2 Grundlagen

Zunächst sollen einige grundlegende physikalische Zusammenhänge erläutert werden, welche in den späteren Kapiteln verwendet werden. Dabei soll jedoch nur eine kurze Zusammenfassung gegeben werden. Für ausführliche Informationen zu den jeweiligen Abschnitten sei auf die angeführte Literatur verwiesen.

2.1 Luftfeuchte

Der Feuchtegehalt der Luft kann in verschiedener Form erfaßt werden. Zum einen kann er durch den Partialdruck p_v des Wasserdampfes angegeben werden, wobei dieser stets kleiner als der Sättigungsdampfdruck $p_{v, \text{sat}}$ ist. Zum anderen kann auch die absolute Luftfeuchte angegeben werden. Beide sind über die Zustandsgleichung des idealen Gases miteinander verknüpft.

Der Sättigungsdampfdruck und die zugehörige Sättigungsfeuchte geben den maximalen Feuchtegehalt der Luft bei einer bestimmten Temperatur an. Bei isobaren Bedingungen ist der Sättigungsdampfdruck nur von der Temperatur abhängig und wird üblicherweise (vergleiche [2] S.52) angegeben als

$$p_{v, \text{sat}}(T) = 288,68 \left(1,098 + \frac{T}{100} \right)^{8,02} \quad \text{für } 0 \leq T \leq 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$p_{v, \text{sat}}(T) = 4,86 \left(1,486 + \frac{T}{100} \right)^{12,30} \quad \text{für } -20 \leq T \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

Das Verhältnis zwischen Partialdruck und Sättigungsdampfdruck wird als relative Luftfeuchte bezeichnet.

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{v, \text{sat}}} \quad (3)$$

2.2 Kondensation und Taupunkttemperatur

Wird feuchte Luft abgekühlt, sinkt der Sättigungsdampfdruck. Erreicht die relative Luftfeuchte 100%, d.h. $p_v \rightarrow p_{v, \text{sat}}$, beginnt die Kondensation. Die Temperatur, bei der die Kondensation beginnt, wird als Taupunkttemperatur bezeichnet.

3 Transportprozesse in porösen Stoffen

Anschaulich beschrieben besteht ein poröses Material aus der Feststoffmatrix und Hohlräumen, den Poren. In diesen Poren können sich verschieden Flüssigkeiten und Gase befinden. Für die physikalische Betrachtung der Transportprozesse innerhalb eines solchen Materials ist es nun notwendig, ein geeignetes Modell zur genaueren Beschreibung dieser einzelnen Bestandteile des Materials zu finden. Die Betrachtung eines porösen Materials als Multiphasensystem ist eine geeignete Modellvorstellung für die Ableitung der Transportbilanzgleichungen (siehe [3] S. 34 ff).

Ein Multiphasensystem ist zusammengesetzt aus mehreren Phasen und mehreren Komponenten. Die Komponenten können dabei in verschiedenen Aggregatzuständen vorliegen, so z.B. Wasser in flüssiger Form und gasförmig als Wasserdampf. Die Phasen bestehen aus mischbaren Komponenten des gleichen Aggregatzustandes, also z.B. Wasserdampf und Luft. Nicht mischbare Komponenten des gleichen Aggregatzustandes (Öl und Wasser) liegen demnach in zwei Phasen vor. In dieser Arbeit sollen lediglich die folgenden Phasen von Interesse sein:

- Die gasförmige Phase, bestehend aus den Komponenten Wasserdampf und Luft
- Die flüssige Phase, lediglich bestehend aus der Komponente Wasser
- Die feste Phase, bestehend aus der Feststoffmatrix des Materials

Ein willkürlich gewählter Punkt in einem porösen Material kann nun in einer dieser Phasen liegen. Betrachtet man hingegen einen Volumenausschnitt, so können je nach Größe des Ausschnitts eine, mehrere oder alle Phasen mit jeweils unterschiedlichen Volumenanteilen enthalten sein. Verschiebt man das Volumen innerhalb des Systems, so ändern sich die Phasenvolumenanteile infolge der mikroskopisch ungleichmäßigen Porenstruktur. Ab einer gewissen Größe des Volumenausschnitts werden die mikroskopischen Schwankungen der Porenstruktur jedoch minimal.

Dieses repräsentative Elementvolumen (REV) setzt sich bei Betrachtung der oben genannten Phasen aus den Volumina der Flüssigphase V_l , der Gasphase V_g und der Feststoffmatrix V_s zusammen:

$$V_{\text{REV}} = V_l + V_g + V_s$$

Den Koordinaten des Schwerpunktes des REV werden nun jeweils die durch Mittelung innerhalb des REV bestimmten Zustandsgrößen θ_l , p_v und T zugeordnet. Durch kleines Verschieben des REV im Raum lassen sich nun stetige Funktionen von Zustandsgrößen ermitteln.

3.1 Bilanzgleichungen für den Wassertransport

Die Wassermassendichten der Flüssig- und Gasphase lassen sich bezogen auf ein REV angeben (Dichte ist bezogen auf das Gesamtvolumen).

$$\rho_{\text{REV}}^{m_l} = \rho^{m_l} \theta_l = \frac{m_l}{V_l} \cdot \frac{V_l}{V_{\text{REV}}} = \frac{m_l}{V_{\text{REV}}} \quad \text{Wassermassendichte im REV}$$

$$\rho_{\text{REV}}^{m_v} = \rho^{m_v} \theta_g = \frac{m_v}{V_g} \cdot \frac{V_g}{V_{\text{REV}}} = \frac{m_v}{V_{\text{REV}}} \quad \text{Dampfmassendichte im REV}$$

Dabei ist ρ^{m_l} die Dichte des Wassers auf das Volumen der Flüssigphase bezogen und ρ^{m_v} ist die Dichte des Wasserdampfes bezogen auf das Volumen der Gasphase.

Die Wassermassendichten können sich nun durch Advektion¹ und Diffusion² (siehe [6], S. 495) sowie Phasenumwandlungen ändern. Die zeitliche Änderung der Wassermassendichten kann in Bilanzgleichungen erfaßt werden.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{REV}}^{m_l}) = -\frac{\partial}{\partial x_k}[(\rho^{m_l} v_k^{m_l} + j_{k, \text{diff}}^{m_l})\theta_l] + \sigma^{m_l} \theta_l \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{REV}}^{m_v}) = -\frac{\partial}{\partial x_k}[(\rho^{m_v} v_k^{m_v} + j_{k, \text{diff}}^{m_v})\theta_g] + \sigma^{m_v} \theta_g \quad (5)$$

Die σ -Terme sind dabei die Massenproduktionsdichten und repräsentieren die Änderungen der Wassermassendichten infolge von Phasenumwandlungen.

Die advektiven Stromdichten in das (bzw. aus dem) REV werden durch die Terme

$$\rho^{m_l} v_k^{m_l} = j_{k, \text{adv}}^{m_l}$$

und

$$\rho^{m_v} v_k^{m_v} = j_{k, \text{adv}}^{m_v}$$

geliefert. Anschaulich gedeutet wird die Massendichte ρ^m der jeweiligen Komponente mit der Massengeschwindigkeit der Phase v_k^m transportiert.

Die diffusiven Stromdichten werden durch die Terme

$$j_{k, \text{diff}}^{m_l} \quad \text{und} \quad j_{k, \text{diff}}^{m_v}$$

beschrieben. Der Index k steht dabei jeweils für eine Transportrichtung.

Die Gesamtwassermassenbilanzgleichung ergibt sich durch Summation von (4) und (5)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\text{REV}}^{m_l+v}) = -\frac{\partial}{\partial x_k}[(j_{k, \text{adv}}^{m_l} + j_{k, \text{diff}}^{m_l})\theta_l + (j_{k, \text{adv}}^{m_v} + j_{k, \text{diff}}^{m_v})\theta_g] \quad (6)$$

Die Massenproduktionsterme heben sich dabei auf, da die infolge Kondensation entstehende Wassermasse in der Flüssigphase der Gasphase entstammt. Gleiches gilt für die durch Verdampfung der Flüssigphase entzogene und der Gasphase zugeführten Wassermasse. Es gilt daher

-
1. Gesamttransport aller Komponenten einer Phase
 2. Konzentrationsausgleich, Austausch von Komponenten einer Phase zwischen benachbarten Elementen

$$\sigma^{m_1} \theta_1 = -\sigma^{m_v} \theta_g$$

Um den Feuchtetransport durch eine aus porösen Materialien bestehende, mehrschichtige Konstruktion analytisch beschreiben zu können, sollen die Bilanzgleichungen aus dem vorherigen Abschnitt im Folgenden vereinfacht werden.

Zunächst soll nur eine Transportrichtung berücksichtigt werden, das REV wird also nur eindimensional durchströmt. Damit entfällt der Richtungsindex k .

Vernachlässigt man weiterhin Luftdruckdifferenzen, d.h. für die gesamte Konstruktion gelten isobare Bedingungen, so entfällt der advective Wasserdampftransport:

$$j_{adv}^{m_v} = 0$$

Für die flächenbezogene Feuchtstromdichte ($A = 1 \text{ m}^2$) der Gasphase gilt somit

$$j^{m_v} = j_{diff}^{m_v} \cdot \theta_g \quad (7)$$

Durch die Beschränkung der Flüssigphase auf nur eine Komponente³ entfällt der diffusive Wassermassentransport der Flüssigphase

$$j_{diff}^{m_l} = 0$$

Die flächenbezogene Feuchtstromdichte der Flüssigphase vereinfacht sich dadurch zu

$$j^{m_l} = j_{adv}^{m_l} \cdot \theta_1 \quad (8)$$

Die Wassermassenbilanzgleichung (6) vereinfacht sich mit diesen Beschränkungen zu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^{m_l+m_v}) = -\frac{\partial}{\partial x}(j^{m_w} + j^{m_v}) \quad (9)$$

Die zeitliche Änderung der Wassermassendichten hängt also vom strömenden Wasser in der Flüssigphase und dem durch Wasserdampfdiffusion transportierten Wasser in der Gasphase ab.

3.2 Bilanzgleichung für die innere Energie

Die Änderung der inneren Energiedichte eines Referenzelementes lässt sich durch folgende Bilanzgleichung erfassen. Die Bilanzgleichung (siehe [3] S.102) vereinfacht sich durch obige Beschränkungen zu:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^U) = -\frac{\partial}{\partial x}[u_1 v^{m_l} \rho_{REV}^{m_l}] - \frac{\partial}{\partial x}[j^Q + j_{diff}^{m_v} h_v \theta_g] \quad (10)$$

Die innere Energie des strömenden Flüssigwassers

3. Alternativ könnten auch noch gelöste Salze enthalten sein, diese sollen aber hier vernachlässigt werden.

$$u_1 v \rho_{REV}^{m_1}$$

ergibt sich durch Multiplikation der inneren Energie mit der Massenstromdichte des Flüssigwassers. Die durch Wärmeleitung übertragene innere Energie beinhaltet der Term j_k^Q .

Die diffusiv übertragene Verdunstungsenthalpie des Wasserdampfes wird durch den Term

$$j_{diff}^{m_v} h_v \theta_g$$

berücksichtigt. Die Enthalpie der diffusiv übertragenen Enthalpie der Luft ist gegenüber der Verdunstungsenthalpie klein und wird nicht in der Bilanzgleichung berücksichtigt.

Die Bilanzgleichung (10) kann für eine analytische Lösung weiter vereinfacht werden. Die Verdunstungsenthalpie ist zu Beginn des Austrocknens in Oberflächennähe von Bedeutung. Trocknet ein feuchtes Material aus, so kann nahe der Oberflächen Wasserdampf leicht aus dem Material ausdiffundieren und die Verdunstungsenthalpie wird schnell abgeführt. Mit fortschreitender Austrocknung verlagert sich die Verdunstungsfront ins Innere des Materials und der zwischen Verdunstungsfront und Oberfläche liegende Diffusionswiderstand wächst. Das Ausdiffundieren von Wasserdampf wird dadurch behindert und die Verdunstungsenthalpie langsamer transportiert. Im stationären Zustand stellt sich dann ein Gleichgewicht ein, bei dem die durch Verdunstungsenthalpie transportierte Energiedichte im Vergleich zur Wärmeleitung gering ist. Für die Berechnung stationärer Temperaturfelder kann daher die Verdunstungsenthalpie vernachlässigt werden. Schließlich ist die im Flüssigwasser transportierte innere Energiedichte aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit und Wassermassendichte klein und kann ebenso vernachlässigt werden. Die Bilanzgleichung für die innere Energiedichte vereinfacht sich somit zu

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{REV}^U) = -\frac{\partial}{\partial x}(j^Q) \quad (11)$$

Die Änderung der inneren Energiedichte hängt also ausschließlich von der durch Wärmeleitung übertragenen Energiedichte ab.

3.3 Anwendung der Bilanzgleichungen auf das Schichtenmodell

Für die Beschreibung von eindimensionalen Transportprozessen durch mehrschichtige Konstruktionen wird die Konstruktion in einzelne Schichten unterteilt (siehe Abbildung 1). Durch Integration über das Volumen einer solchen Schicht lassen sich die Bilanzgleichungen (9) und (11) auf eine Schicht beziehen.

Durch Beschränkung auf eindimensionalen Transport in x-Richtung entfällt die Integration in y- und z-Richtung. Die Gleichungen werden dann auf die Fläche A bezogen ($V_{REV} = A \cdot x_{REV}$). Es verbleibt die Integration in x-Richtung.

Die Integration der Bilanzgleichung (9) über die Schichtbreite

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_i}^{x_e} \rho_{\text{REV}}^{m_{l+v}} dx = - \int_{x_i}^{x_e} \frac{\partial}{\partial x} (j_i^{m_w} + j_i^{m_v}) dx$$

liefert die zeitliche Änderung der bezogenen Wassermasse der Schicht

$$\frac{d}{dt} (W_{l+v}) = j_i^{m_w} + j_i^{m_v} - j_e^{m_w} - j_e^{m_v} \quad \text{Wassermassenbilanz [kg/m}^2\text{s]} \quad (12)$$

Die Feuchtströme mit den Indizes i und e stehen dabei jeweils für die Ströme an den Positionen x_i bzw. x_e . Die zeitliche Änderung der Wassermasse in der Schicht entspricht also der Differenz der ein- und ausströmenden Feuchtstromdichten (siehe Abbildung 1).

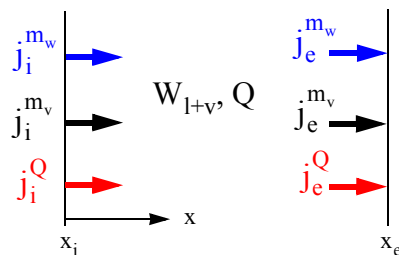


Abbildung 1 Transportprozesse durch ein Schichtenelement

Analog lässt sich auch die Gleichung für die Änderung der inneren Energie durch Wärmeleitung in einem Schichtenelement ableiten.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_i}^{x_e} \rho_{\text{REV}}^U dx = - \int_{x_i}^{x_e} \frac{\partial}{\partial x} (j^Q) dx$$

Durch die Integration erhält man die Bilanzgleichung der inneren Energie für ein Schichtenelement

$$\frac{dQ}{dt} = j_i^Q - j_e^Q \quad (13)$$

Die zeitliche Änderung der in der Schicht gespeicherten Wärmemenge hängt von der Differenz der Wärmestromdichten an beiden Schichtgrenzen ab.

4 Feuchte- und Wärmetransport in mehrschichtigen Konstruktionen

Im vorangehenden Kapitel wurde das Schichtenmodell eingeführt, welches für die Beschreibung eindimensionaler Transportvorgänge geeignet ist. Eine mehrschichtige Konstruktion soll nun aus n Schichten bestehen. Jede Schicht besteht aus einem Material und hat eine bestimmte Schichtdicke d . Im Folgenden soll nun die Wärmeleitung und der Feuchtetransport durch eine solche Konstruktion betrachtet werden und eine analytische Lösung für die Bestimmung der Dampfdruck- und Feuchtefelder abgeleitet werden.

Legt man an eine Konstruktion ein Klima an, d.h. zu beiden Seite der Konstruktion liegen unterschiedliche Temperaturen und Luftfeuchten an, so kommt es infolge des Temperatur- und Dampfdruckgefälles zu Wärmeleitung und Feuchtetransport durch die Konstruktion. Dabei kommt es durch die in der Konstruktion vorhandene Speichermasse⁴ bzw. das Porenvolumen⁵ zu einer allmählichen Annäherung an das sich nach unendlich langer Zeit einstellende Temperatur- und Feuchteprofil. Damit eine analytische Berechnung überhaupt möglich wird, müssen einige Vereinfachungen eingeführt werden:

1. es werden konstante, bzw. linearisierte Transportkoeffizienten verwendet
2. es wird eine vereinfachte Speicherfunktion für die Feuchte verwendet (linearisierte Sorptionsisotherme)
3. konstantes Klima wird verwendet
4. es wird zunächst der stationäre Endzustand berechnet, der Feuchtegehalt zu einem bestimmten Zeitpunkt kann dann durch geeignete Abminderung berechnet werden

Die konkreten Beschränkungen und Anpassungen der Materialparameter werden in Abschnitt 6 beschrieben.

4. In Abhängigkeit von der Wärmekapazität der Materialien kann innere Energie in der Konstruktion gespeichert werden.
5. Die Luftfeuchte in den Poren kann sich durch Dampfdiffusion erhöhen bzw. durch inneres Kondensat können die Poren mit Wasser gefüllt werden. So kann Wassermasse gespeichert werden.

5 Stationäre Wärmeleitung

Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Idealisierungen und Vereinfachungen sollen hier noch einmal für die Wärmeleitung⁶ 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

Mit diesen Vereinfachungen lässt sich nun die Wärmeleitung durch die Konstruktion beschreiben. Durch die Bedingung, dass die Wärmeleitfähigkeit konstant bleiben soll, wird die Wärme/Feuchte-Berechnung nur noch einseitig gekoppelt.

5.1 Wärmeleitung innerhalb einer Schicht

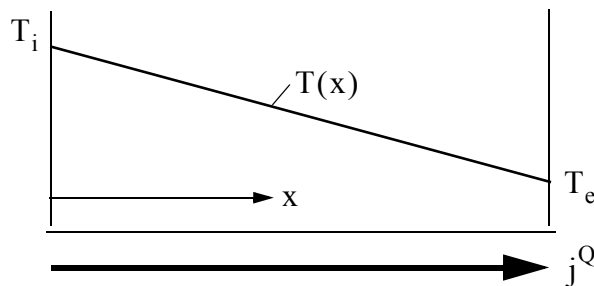


Abbildung 2 stationäre Wärmeleitung innerhalb einer Schicht

Die Wärmestromdichte j^Q ist proportional dem Temperaturgradienten dT/dx . Der Transportkoeffizient ist die Wärmeleitfähigkeit λ des Materials.

$$j^Q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Wärmestromdichte in [W/m}^2\text{]} \quad (14)$$

Im stationären Zustand ändert sich die innere Energie nicht mehr. Aus der Bilanzgleichung für die innere Energie (13) folgt somit:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= j_i^Q - j_e^Q = 0 \\ j_e^Q &= j_i^Q \end{aligned}$$

Die Wärmestromdichte ist demnach an beiden Schichtgrenzen und daher auch an jeder Stelle innerhalb der Schicht gleich groß. Nun lässt sich bis zur Stelle x innerhalb der Schicht integrieren und es ergibt sich das Temperaturfeld $T(x)$ (siehe Abbildung 2).

6. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, soll beim Transport der inneren Energie ausschließlich die Wärmeleitung berücksichtigt werden, daher wird ab sofort der Ausdruck Wärmeleitung gebraucht.

$$\begin{aligned}
 j^Q \cdot dx &= -\lambda \cdot dT \\
 j^Q \cdot \int_0^x dx &= -\lambda \int_{T_i}^{T(x)} dT \\
 j^Q \cdot x &= -\lambda(T(x) - T_i) \\
 T(x) &= T_i - \frac{j^Q \cdot x}{\lambda}
 \end{aligned} \tag{15}$$

Setzt man die gesamte Schichtdicke d ein, liefert die Gleichung (15)

$$\Delta T = T_i - T_e = j^Q \cdot \frac{d}{\lambda} \tag{16}$$

T_i und T_e sind dabei die Temperaturen an den Schichtgrenzen. Definiert man nun den Wärmeleitwiderstand r_T der Schicht als

$$r_T = \frac{d}{\lambda} \quad \text{Wärmeleitwiderstand in [m}^2\text{K/W]} \tag{17}$$

ergibt sich die Gleichung für den Temperaturabfall innerhalb einer Schicht

$$\Delta T = T_i - T_e = j^Q \cdot r_T \quad \text{Temperaturdifferenz in [K]} \tag{18}$$

5.2 Wärmeleitung bei einer mehrschichtigen Konstruktion

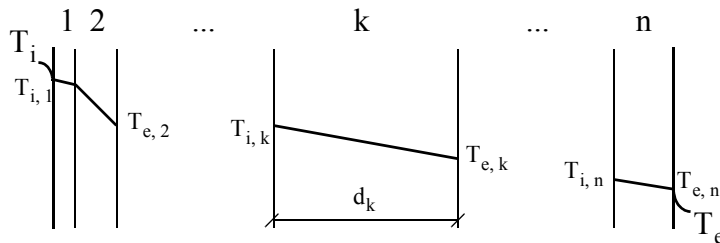


Abbildung 3 Temperaturprofil einer mehrschichtigen Konstruktion

Betrachtet man eine mehrschichtige Konstruktion aus n Schichten (siehe Abbildung 3), so gelten die Gleichungen des letzten Abschnitts separat für jede Schicht. Zweckmäßigerweise wird ein Index zur Kennzeichnung der Schicht verwendet. Die Gleichungen (17) und (18) können somit geschrieben werden als

$$\begin{aligned}
 r_{T,k} &= \frac{d_k}{\lambda_k} \\
 \Delta T_k &= j_k^Q \cdot r_{T,k} \quad \text{jeweils für } k=1..n
 \end{aligned}$$

Im stationären Zustand sind die Wärmestromdichten in allen Schichten gleich groß und der Temperaturabfall jeder einzelnen Schicht lässt sich zum Gesamttemperaturabfall der Konstruktion aufsummieren.

$$\Delta T_{1..n} = \sum_{k=1}^n \Delta T_k = j^Q \cdot \sum_{k=1}^n r_{T,k}$$

Definiert man den Wärmewiderstand der Konstruktion als

$$r_{T,1..n} = \sum_{k=1}^n r_{T,k} \quad (19)$$

so ergibt sich der Gesamttemperaturabfall innerhalb der Konstruktion zu

$$\Delta T_{1..n} = j^Q \cdot r_{T,K}$$

Berücksichtigt man die Übergangswiderstände $r_{T,i}$ (Innenseite) und $r_{T,e}$ (Außenseite) erhält man den Gesamtwärmedurchgangswiderstand r_T

$$r_T = r_{T,i} + r_{T,1..n} + r_{T,e} \quad (20)$$

Bei bekannter Innen- und Außentemperatur lässt sich die Wärmestromdichte im stationären Zustand berechnen:

$$\begin{aligned} \Delta T_{i..e} &= T_i - T_e = j^Q \cdot r_T \\ j^Q &= \frac{\Delta T_{i..e}}{r_T} \end{aligned} \quad \text{Gesamtwärmestromdichte in [J/m}^2\text{s]} \quad (21)$$

Die Temperaturen an den Schichtgrenzen lassen sich nun aus der Summe der Teilwiderstände bis zur Schichtgrenze und der Wärmestromdichte berechnen. Für die außenseitige Grenztemperatur einer Schicht j gilt dann:

$$T_{e,j} = T_i - j^Q \cdot \left(\sum_{k=1}^j r_{T,k} + r_{T,i} \right) = T_{i,j+1} \quad \text{Schichtgrenztemperatur in [}^\circ\text{C]} \quad (22)$$

6 Stationärer Feuchtetransport

Unter den oben getroffenen Voraussetzungen kann in einem porösen Medium Feuchte sowohl durch Wasserdampfdiffusion als auch kapillare Leitung transportiert werden. Ob kapillare Leitung stattfindet, wird durch den Feuchtegehalt und letztlich durch die Materialparameter beeinflusst, die im folgenden Abschnitt erläutert werden sollen.

6.1 Definition der Feuchtespeicherparameter

Eine der wichtigsten Materialeigenschaften ist die Feuchtespeicherfunktion bzw. die „moisture retention curve“ (MRC). Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt die Speicherung von Wasser im kapillarporösen Material in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bzw. dem Kapillardruck, der Temperatur und des Salzgehaltes.

Es existieren einige charakteristische Parameter (entnommen aus [5]), die zur Beschreibung der Feuchtespeicherfunktion dienen und welche die Feuchtespeicherung zur Materialstruktur in Beziehung setzen (siehe Tabelle 1).

| Parameter | Symbol [m ³ /m ³] | Beschreibung |
|--------------------------|--|--|
| Offenes Porenvolumen | θ_{por} | Gesamtes offenes Porenvolumen, das ohne Einsatz von destruktivem Druck mit Feuchtigkeit (Wasserdampf, Flüssigkeit) gefüllt werden kann. Geschlossene Poren, die nicht im Austausch mit der Umgebung stehen, sind ausgeschlossen. |
| Kapillarer Feuchtegehalt | θ_{cap} | Maximale freie Wassersättigung bei druckfreier Wasseraufnahme; eine Eigenschaft, die allerdings von Zeitdauer und Randbedingungen des Experimentes abhängt. |
| Transitionfeuchtegehalt | θ_{tran} | Übergangspunkt von der Region, wo der Fluss verstärkt in der Dampfphase stattfindet (verstärkt durch den Fluss von lokalem Adsorbat), zu der Region, die durch Flüssigtransport dominiert wird. |
| Minimaler Feuchtegehalt | θ_{dry} | Übergangspunkt von mono- zu multimolekularer Belegung der inneren Oberfläche. Unterhalb des minimalen Feuchtegehaltes findet nur Dampftransport statt, oberhalb ist Flüssigtransport möglich. |

Tabelle 1: Definition charakteristischer Feuchtespeicherparameter

Die Feuchtespeicherfunktion kann als (extreme) Befeuchtungs- oder Trocknungskurve definiert werden. Abbildung 4 zeigt eine typische Feuchtespeicherfunktion, wie sie gemessen werden kann. Die Feuchtespeicherfunktion für einen Befeuchtungsvorgang (Adsorption) bezieht sich auf eine freie Wasseraufnahme. Das anfänglich trockene Material wird bis zur freien Sättigung befeuchtet. Die Feuchtespeicherfunktion für einen Trocknungsvorgang (Desorption) beginnt bei dem maximalen Feuchtegehalt, der durch Vakuumsättigung erreicht wird (absolute Sättigung). Der Unterschied zwischen Befeuchtungs- und Trocknungskurve wird hauptsächlich durch Lufteinschlüsse verursacht, die bei dem Befeuchtungsvorgang entstehen können, wenn sich zunächst größere Poren mit Wasser füllen und dadurch luftgefüllte Bereiche isolieren. Die-

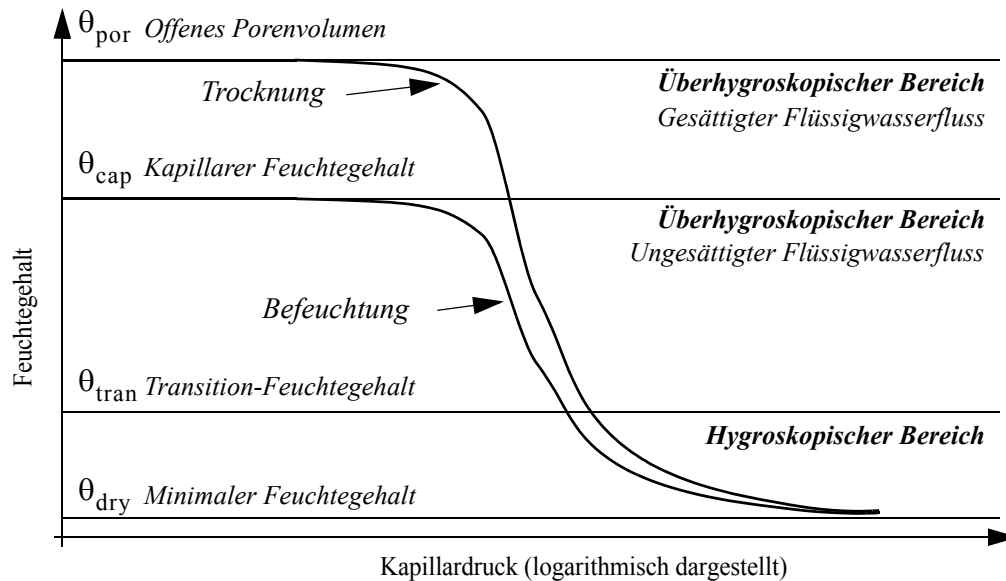


Abbildung 4 Definition der charakteristischen Feuchtespeicherparameter

se isolierten Bereiche füllen sich ebenfalls mit Wasser. Dieses geschieht allerdings erst nach längerer Zeit, weil die Luft, um zu entweichen, auf diffusivem Wege die Flüssigphase passieren muss.

Unter realen Bedingungen wird sich durch ständig wechselnde Be- und Entfeuchtung ein zwischen den beiden (extremen) Kurven liegender Zustand einstellen. Dieser Effekt wird als Hysterese⁷ bezeichnet.

Generell kann die Feuchtespeicherfunktion in den hygrokopischen und überhygrokopischen Bereich eingeteilt werden. Im hygrokopischen Bereich, d.h. unterhalb des Transition-Feuchtegehalts, findet Feuchtetransport fast ausschließlich durch Dampfdiffusion statt. Im überhygrokopischen Bereich überlagern sich Dampfdiffusion und kapillare Flüsse. Im gesättigten Bereich, d.h. oberhalb des kapillaren Feuchtegehalts, findet der Feuchtetransport fast ausschließlich durch einen gesättigten Flüssigwasserfluss statt. Die Unterteilung in den hygrokopischen und überhygrokopischen Bereich erfolgt dabei durch definierte Kennwerte wie z.B. der Transition-Feuchte. Diese ist als der Feuchtegehalt definiert, bei dem die Flüssigwasserstromdichte genauso groß wie die Dampfstromdichte wird, d.h. 50% der Gesamtfeuchtestromdichte ausmacht. Für das vereinfachte Berechnungsverfahren in dieser Arbeit soll jedoch der maximale hygrokopische Feuchtegehalt θ_{hyg} als Grenzwert für den Übergang zum überhygrokopischen Bereich definiert werden. Unterhalb dieses Feuchtegehalts findet Feuchtetransport ausschließlich durch Dampfdiffusion statt, oberhalb kann Flüssigwasser kapillar transportiert werden. Der maximale hygrokopische Feuchtegehalt wird dabei als der bei 95% relativer Luftfeuchte erreichte Feuchtegehalt definiert.

7. Hysterese, „die Abhängigkeit des physikalischen Zustandes eines Stoffes von früheren Zuständen“ (Definition aus Langenscheidts Fremdwörterbuch Online, <http://www.langenscheidt.aol.de>) beschreibt hier also die Abhängigkeit des Sorptionskurven von Befeuchtungs- oder Trocknungsvorgängen.

Um die Feuchtespeicherfunktion in Berechnungen verwenden zu können, wird im Allgemeinen die Hysterese vernachlässigt und es wird mit einer Feuchtespeicherfunktion gerechnet. Diese Sorptionsisotherme beschreibt den Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Feuchtegehalt und kann mit geeigneten Messverfahren bestimmt werden. Die ebenfalls durch Messwerte bestimmbare Saugspannungskurve beschreibt den Zusammenhang zwischen Kapillardruck und Feuchtegehalt. Da sich Kapillardruck und relative Luftfeuchte durch die Kelvingleichung

$$p_c = \rho_w R_v T \ln(\varphi)$$

ineinander überführen lassen, können beide Funktionen in einem Diagramm dargestellt werden. Die Sorptionsisotherme beschreibt dabei den hygroscopischen Bereich detaillierter, während die Saugspannungskurve den überhygroscopischen Bereich genauer beschreibt. Durch geeignete Kombination beider Kurven lässt sich der Zusammenhang zwischen Luftfeuchte und Feuchtegehalt im gesamten Bereich zwischen 0 und 100% relativer Luftfeuchte gut beschreiben.

6.2 Vereinfachungen für eine analytische Lösung

Aufgrund des komplexen Verlaufes der Feuchtespeicherfunktion ist diese für eine analytische Lösung zunächst nicht geeignet. Vereinfachend soll die Sorptionsisotherme daher mit zwei Geradengleichungen angenähert werden (siehe Abbildung 5).

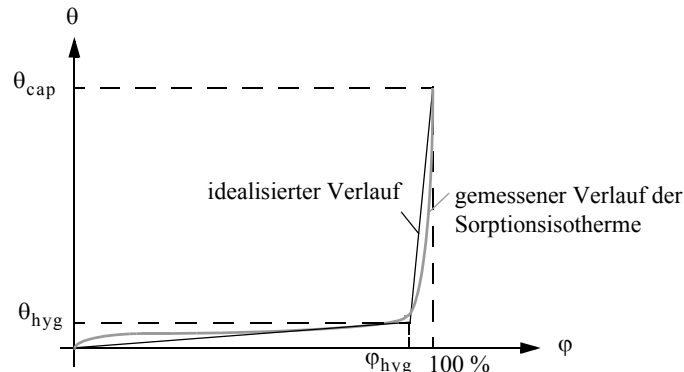


Abbildung 5 Idealisierte Sorptionsisotherme

Der maximale hygroscopische Feuchtegehalt θ_{hyg} bei der Luftfeuchte φ_{hyg} ist dabei ein aus der reellen Feuchtespeicherfunktion zu entnehmender Anpassungswert, mit dem eine möglichst genaue Übereinstimmung der Kurven erzielt werden soll. Als Geradengleichung gilt für den hygroscopischen Bereich

$$\theta(\varphi) = \theta_{hyg} \cdot \varphi \quad \text{für } 0 \leq \varphi \leq \varphi_{hyg} \quad (23)$$

und für den überhygroscopischen Bereich

$$\theta(\varphi) = \frac{\theta_{\text{cap}} - \theta_{\text{hyg}}}{1 - \varphi_{\text{hyg}}}(\varphi - \varphi_{\text{hyg}}) + \theta_{\text{hyg}} \quad \text{für } \varphi_{\text{hyg}} \leq \varphi \leq 100\% \quad (24)$$

Die Vereinfachung der Sorptionsisotherme ist eine wesentliche Voraussetzung für das hier vorgestellte Verfahren.

Des Weiteren sollen folgende Einschränkungen gelten:

- das Feuchtefeld bleibt konstant, die in ein Element hinein- und hinausströmenden Flüsse sind gleich groß
- es wird ein eindimensionaler Feuchtetransport angenommen, d.h. Wasserdampf und Kapillarwasser wird nur in x-Richtung geleitet
- die Transportkoeffizienten sind unabhängig vom Temperaturfeld

Im folgenden Abschnitt soll zunächst der Feuchtetransport infolge Dampfdiffusion abgeleitet werden.

6.3 Feuchtetransport infolge Dampfdiffusion

Wenn die relative Luftfeuchte an keinem Punkt der Konstruktion φ_{hyg} erreicht, so sind alle Schichten der Konstruktion hygroskopisch durchfeuchtet. In diesem Fall gibt es innerhalb der Konstruktion keinen Feuchtetransport infolge kapillarer Leitung. Die Kapillarwasserstromdichten j^{m_1} sind demnach = 0.

Isobare Bedingungen waren eine der Voraussetzungen, daher wird im Folgenden vereinfachend für den Dampfdruck das Symbol p anstelle p_v verwendet.

6.3.1 Feuchtetransport durch Dampfdiffusion innerhalb einer Schicht

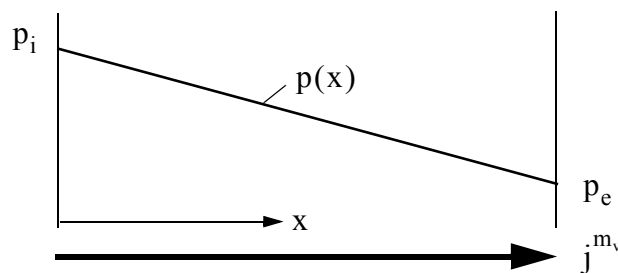


Abbildung 6 Feuchtetransport durch Dampfdiffusion

Die Dampfstromdichte j^{m_v} hängt im porösen Material vom Dampfdruckgradienten innerhalb der Schicht und der Dampfleitfähigkeit D_v des Materials ab (siehe Abbildung 6).

$$j^{\text{m}_v} = -\frac{D_v(T)}{R_v T} \cdot \frac{dp}{dx}$$

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ gibt nun das Verhältnis zwischen der Dampfleitfähigkeit von Luft $D_{v, \text{air}}(T)$ und der des Materials an.

$$\mu = \frac{D_{v, \text{air}}(T)}{D_v(T)}$$

Definiert man weiterhin die Dampfleitfähigkeit von Luft als temperaturunabhängige Konstante

$$\delta_{\text{air}} = \frac{D_{v, \text{air}}(T)}{R_v T} \cong 1,9 \times 10^{-10} \quad \text{Dampfleitfähigkeit von Luft in [s]}$$

so ergibt sich die Dampfstromdichte zu

$$j^{m_v} = -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad \text{Dampfstromdichte in [kg/m}^2\text{s]} \quad (25)$$

Im stationären Zustand liefert die Bilanzgleichung (12) für die Wassermassendichte

$$\frac{dW_{l+v}}{dt} = j_i^{m_l} + j_i^{m_v} - j_e^{m_l} - j_e^{m_v} = 0$$

$$j_i^{m_l} + j_i^{m_v} = j_e^{m_l} + j_e^{m_v}$$

Die Summe der Feuchtestromdichten zu beiden Seiten des Schichtelements ist im stationären Zustand gleich groß. Aus der Ableitung der Bilanzgleichung (siehe Abschnitt 3.3) folgt, dass im stationären Zustand an jeder Stelle innerhalb der Schicht die Summe der Feuchtestromdichten gleich groß sein muss.

Für den Fall, dass die Schicht lediglich hygroskopisch durchfeuchtet ist, werden die Kapillarwasserstromdichten zu 0 und es folgt, dass die Dampfstromdichten an jeder Stelle der Konstruktion gleich groß sein müssen.

Ist die Dampfstromdichte konstant, lässt sich die Gleichung (25) bis zur Stelle x innerhalb der Schicht integrieren und man erhält den Wasserdampfpartialdruck an dieser Stelle.

$$j^{m_v} \cdot dx = -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot dp$$

$$j^{m_v} \cdot x = -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot (p(x) - p_i)$$

$$j^{m_v} \cdot \int_0^x dx = -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot \int_{p_i}^{p(x)} dp$$

$$p(x) = p_i - j^{m_v} \cdot \frac{\mu \cdot x}{\delta_{\text{air}}} \quad (26)$$

Setzt man die Schichtdicke d in Gleichung (26) ein, erhält man den Dampfdruckabfall in der Schicht.

$$\Delta p = p_i - p_e = j^{m_v} \cdot \frac{\mu \cdot d}{\delta_{\text{air}}} \quad \text{Dampfdruckdifferenz in [Pa]} \quad (27)$$

Die Dampfdrücke p_i und p_e sind dabei die Dampfdrücke an den Schichtgrenzen. Analog zur Wärmeleitung lässt sich nun der Dampfdiffusionswiderstand r_v definieren als

$$r_v = \frac{\mu \cdot d}{\delta_{\text{air}}} \quad \text{Dampfdiffusionswiderstand in [m/s]} \quad (28)$$

Gleichung (27) wird durch Einsetzen des Dampfdiffusionswiderstandes zu

$$\Delta p = p_i - p_e = j^{m_v} \cdot r_v \quad (29)$$

und liefert den Druckabfall innerhalb einer Schicht.

6.3.2 Feuchtetransport durch Dampfdiffusion bei mehreren Schichten

Analog zur Reihenschaltung der Wärmewiderstände (siehe Abschnitt 5.2) können die Dampfdiffusionswiderstände ebenso als in Reihe geschaltete Widerstände betrachtet werden (siehe Abbildung 7). Es ergibt sich ein ideelles Dampfdruckprofil⁸.

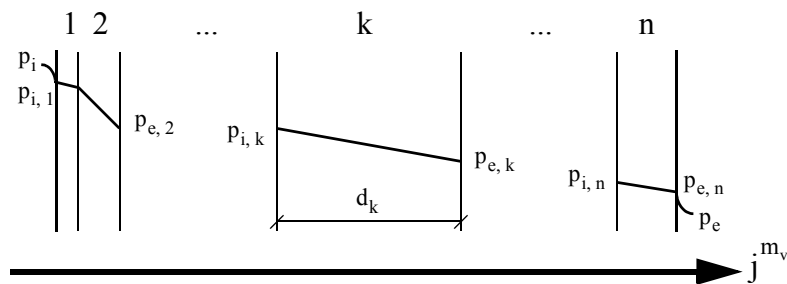


Abbildung 7 Ideelles Dampfdruckprofil einer mehrschichtigen Konstruktion

Mit den Gleichungen aus dem vorangehenden Abschnitt lässt sich das Dampfdruckprofil bestimmen. Analog zur Wärmeleitung (siehe Abschnitt 5.2) gelten die Gleichungen (28) und (29) für jede Schicht.

$$r_{v,k} = \frac{\mu_k \cdot d_k}{\delta_{\text{air}}} \quad (30)$$

$$\Delta p_k = j^{m_v} \cdot r_{v,k} \quad \text{jeweils für } k=1..n \quad (31)$$

Im stationären Zustand sind die Dampfstromdichten in allen Schichten gleich groß. Die Druckdifferenzen der Schichten lassen sich dann aufsummieren und ergeben die Gesamtdruckdifferenz $\Delta p_{1..n}$.

8. Das tatsächliche Dampfdruckprofil kann sich vom „ideellen“ Profil unterscheiden, wenn der Sättigungsdampfdruck an einer Stelle in der Konstruktion überschritten wird (siehe Abschnitt 6.4).

$$\Delta p_{1..n} = \sum_{k=1}^n \Delta p_k = j^{m_v} \cdot \sum_{k=1}^n r_{v,k} = j^{m_v} \cdot r_{v,1..n}$$

Der Gesamtdiffusionswiderstand $r_{v,1..n}$ ist folglich die Summe der Teilwiderstände.

$$r_{v,1..n} = \sum_{k=1}^n r_{v,k} \quad (32)$$

Die Übergangswiderstände sind beim Dampfdruck im Verhältnis zu den Dampfdiffusionswiderständen gering und würden nur bei sehr diffusionsoffenen Konstruktionen einen merkbaren Einfluss haben. In der Regel sind mehrschichtige Umfassungskonstruktionen, die in dieser Arbeit betrachtet werden, jedoch wenig dampfdurchlässig, so dass die Übergangswiderstände im Verhältnis zum Gesamtdiffusionswiderstand der Konstruktion verschwindend gering sind. Vereinfachend gilt also

$$p_i = p_{i,1} \quad \text{und} \quad p_{e,n} = p_e$$

Bei bekanntem inneren und äußeren Partialdruck p_i und p_e lässt sich die Gesamtdampfstromdichte berechnen.

$$j^{m_v} = \frac{\Delta p_{1..n}}{r_{v,1..n}} = \frac{p_i - p_e}{r_{v,1..n}} \quad \text{Gesamtdampfstromdichte} \quad (33)$$

Über eine Verhältnisgleichung lassen sich nun die Dampfdrücke an allen Schichtgrenzen bestimmen. Der Dampfdruck $p_{e,j}$ ist der Dampfdruck der Schichtgrenze zwischen Schicht j und $j+1$ und lässt sich aus der Summe der Dampfdiffusionswiderstände und der Dampfstromdichte bestimmen

$$p_{e,j} = p_i - j^{m_v} \cdot \sum_{k=1}^j r_{v,k} = p_{i,j+1} \quad \text{Dampfdruck an der Schichtgrenze} \quad (34)$$

6.4 Kondensatbildung bei mehrschichtigen Konstruktionen

Für jede Schichtgrenze kann mit den durch Gleichung (22) berechneten Temperaturen der jeweilige Sättigungsdampfdruck nach Gleichung (1) bzw. (2) berechnet werden. Erreicht oder überschreitet der nach Gleichung (34) berechnete Partialdruck an einer oder mehreren Stellen den Sättigungsdampfdruck, so kommt es zur Kondensation.

Um die Unterschiede zwischen dem gängigen Verfahren nach Glaser und dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren deutlich zu machen, soll das Wasserdampfdruckschema nach Glaser kurz zusammenfassend dargestellt werden. Dieses Verfahren ist in [4] (DIN 4108) enthalten. Um mit den bisherigen und noch folgenden Ableitungen konsistent zu bleiben, werden in den

angegebene Formeln für das Glaserschema jedoch nicht die Symbole der DIN, sondern die in dieser Arbeit eingeführten Formeln verwendet.

6.4.1 Berechnung der Kondensatmenge nach Glaser

Das Verfahren von Glaser beruht auf einer grafischen Lösung des in Abschnitt 6.4 beschriebenen Prinzips. Die Konstruktion wird zunächst im Maßstab der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken d_{diff} gezeichnet. Diese berechnen sich wie folgt:

$$d_{\text{diff},k} = \mu_k d_k \quad \text{jeweils für } k=1..n \quad (35)$$

Als nächstes wird das Sättigungsdampfdruckprofil eingetragen. Die Partialdrücke zu beiden Seiten der Konstruktion werden dann auf kürzestem Weg verbunden, ohne jedoch das Sättigungsdampfdruckprofil zu schneiden. Bei diesem Verfahren werden drei Fälle unterschieden (siehe Abbildung 8)

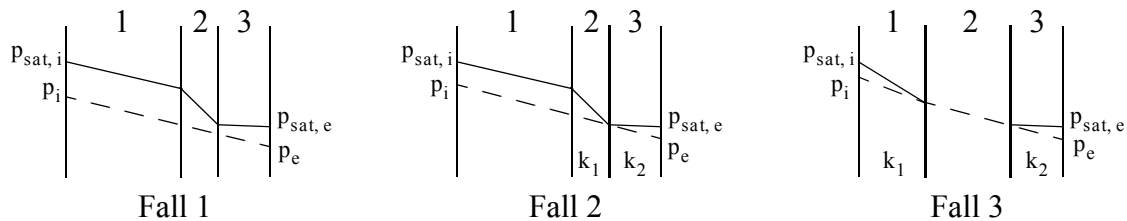


Abbildung 8 Fallunterscheidungen beim Glaserschema

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

Die Tauwassermenge W_T wird bei den Fällen 2 und 3 nach der Gleichung

$$W_T = \frac{t_T}{1,5 \times 10^6} \left(\frac{p_i - p_{\text{sat},e,k_1}}{d_{\text{diff},1..k_1}} - \frac{p_{\text{sat},i,k_2} - p_e}{d_{\text{diff},k_2..n}} \right) \quad \text{Tauwassermenge in } [kg/m^2] \quad (36)$$

berechnet (siehe [4], Teil 5, S.8f). 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 diffusionsäquivalenten Schichtdicken d_{diff} werden bis zum Beginn des überhygroskopischen Bereiches aufsummiert und ergeben die Diffusionsbreiten

$$d_{\text{diff},1..k_1} = \sum_{j=1}^{k_1} d_{\text{diff},j} = \sum_{j=1}^{k_1} \mu_j d_j \quad \text{und} \quad d_{\text{diff},k_2..n} = \sum_{j=k_2}^n d_{\text{diff},j} = \sum_{j=k_2}^n \mu_j d_j$$

Die Tauwassermenge wird somit im Zeitraum t_T als Differenz der ein- und ausdiffundierenden Wasserdampfmengen berechnet.

6.4.2 Erweiterung des Wasserdampfdruckschemas um die 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 entsteht. Da es sich um poröse Materialien handelt, wird sich das Tauwasser jedoch durch kapillare Leitung ausbreiten. Berücksichtigt man diesen Effekt in den Gleichungen, erhält man eine günstigere Feuchteverteilung. Konstruktionen, welche beim Glaserschema als kritisch eingestuft wurden, könnten sich durch diese genauere Betrachtungsweise als durchaus praktikabel herausstellen.

6.5 Feuchtetransport durch kapillare Leitung

Im überhygroskopischen Bereich überlagern sich Dampfdiffusion und Flüssigwassertransport. Letzterer hängt von der Ausbildung des Feuchteprofils ab. Grundsätzlich kann man dabei für eine Schicht folgende Fälle unterscheiden:

1. die Schicht ist lediglich hygroskopisch durchfeuchtet, Wasser wird nur durch Dampfdiffusion übertragen
2. die Schicht ist teilweise überhygroskopisch durchfeuchtet, der Feuchtetransport durch Dampfdiffusion und kapillarer 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

Im Folgenden sollen die einzelnen Fälle separat betrachtet werden.

6.5.1 Feuchtetransport in einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht

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 (siehe Abbildung 9).

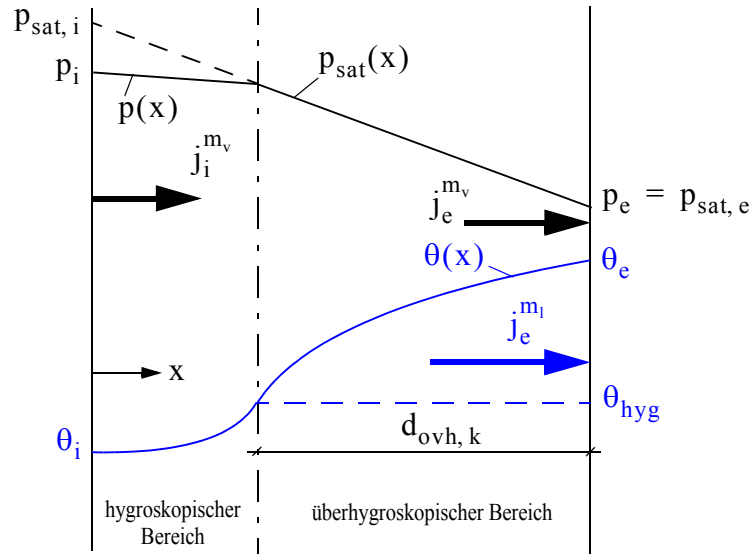


Abbildung 9 Dampf- und Feuchteprofil einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht

Im überhygroskopischen Bereich der Schicht überlagern sich Dampfstrom und Kapillarstrom. Die Gesamtheuchtestromdichte ergibt sich dort als Summe aus Dampf- und Kapillarwasserstromdichte, dabei sind beide Stromdichten vom Ort abhängig. Entsprechend der Bilanzgleichung (12) gilt für den stationären Fall

$$\frac{dW_{l+v}}{dt} = j_i^{m_1} + j_i^{m_v} - j_e^{m_1} - j_e^{m_v} = 0$$

$$j_i^{m_1} + j_i^{m_v} = j_e^{m_1} + j_e^{m_v}$$

$$j_i^{m_{l+v}} = j_e^{m_{l+v}}$$

Trennt man eine teilweise überhygroskopisch durchfeuchtete Schicht in zwei Bereiche, den hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich, so lassen sich für beide Bereiche die Gesamtheuchtestromdichten schreiben:

$$j^{m_{l+v}} = j^{m_v} = \text{const} \quad \text{für den hygroskopischen Bereich}$$

$$j^{m_{l+v}} = j^{m_1} + j^{m_v} = \text{const} \quad \text{für den überhygroskopischen Bereich} \quad (37)$$

Die Flüssigwasserstromdichte j^{m_1} ist abhängig vom Feuchtegradienten und der Diffusivität $D_1(\theta)$ des Materials.

$$j^{m_1} = -\rho_w \cdot D_1(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad \text{Kapillarwasserstromdichte in [kg/m}^2\text{s]} \quad (38)$$

ρ_w ist dabei die Dichte des Wassers.

Unter den in Abschnitt 6.1 getroffenen Voraussetzungen wird die kapillare Leitung im hygroskopischen Bereich vernachlässigt. Die Diffusivität bzw. der Transportkoeffizient $D_1(\theta)$ wird daher unterhalb des definierten Feuchtegehaltes θ_{hyg} vereinfachend als 0 angenommen.

Im überhygroskopischen Bereich wird der Verlauf der Diffusivität vereinfachend als lineare Funktion angenähert (siehe Abbildung 10).

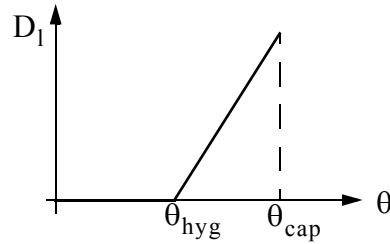


Abbildung 10 Angenäherter Verlauf der Diffusivität

Für die Diffusivität gilt also in den jeweiligen Bereichen

$$\begin{aligned} D_1(\theta) &= 0 & 0 \leq \theta \leq \theta_{\text{hyg}} \\ D_1(\theta) &= k(\theta - \theta_{\text{hyg}}) & \theta_{\text{hyg}} \leq \theta \leq \theta_{\text{cap}} \end{aligned} \quad (39)$$

dabei ist der Anstieg k der Geraden ein Anpassungsparameter, mit dem der Verlauf der Geraden an den reellen Verlauf angepasst werden kann.

Ist der Verlauf der Diffusivität nicht oder nur ungenügend bekannt, kann der Anpassungsparameter k hinreichend genau durch folgende Beziehung berechnet werden (vergleiche [1], S. 527):

$$k = 5 \times 10^5 \frac{A_w}{(\theta - \theta_{\text{hyg}})^3} \quad (40)$$

mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten A_w .

Setzt man Dampfstromdichte und Flüssigwasserstromdichte in (37) ein, erhält man für den überhygroskopischen Bereich die Gesamtfeuchtestromdichte:

$$j^{m_{1+v}} = -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} - \rho_w \cdot D_1(\theta) \frac{d\theta}{dx} \quad \text{Gesamtfeuchtestromdichte in [kg/m}^2\text{s]} \quad (41)$$

Durch die Bedingung, dass die Diffusivität im hygroskopischen Bereich gleich 0 ist, gilt diese Gleichung für die gesamte Schicht.

Analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 6.3.1 kann man die Intergration bis zur Stelle x innerhalb des überhygroskopischen Bereichs ausführen:

$$\begin{aligned} j^{m_{1+v}} \cdot dx &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} dp - \rho_w \cdot D_1(\theta) d\theta \\ j^{m_{1+v}} \cdot \int_0^x dx &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \int_{p_i}^{p(x)} dp - \rho_w \int_{\theta_i}^{\theta(x)} D_1(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (42)$$

Je nachdem, ob die Schicht von links oder rechtsseitig durchfeuchtet wird, lassen sich die Integrationsgrenzen ersetzen und es ergibt sich

$$\begin{aligned}
 j^{m_{I+v}} \cdot x &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot p \Big|_{p_i}^{p(x)} - \rho_w k \left[\frac{\theta^2}{2} - \theta_{\text{hyg}} \theta \right] \Big|_{\theta_{\text{hyg}}}^{\theta(x)} \\
 j^{m_{I+v}} \cdot x &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot (p(x) - p_i) - \rho_w k \frac{(\theta(x) - \theta_{\text{hyg}})^2}{2}
 \end{aligned} \tag{43}$$

Setzt man die gesamte Schichtbreite in die Gleichung ein, erhält man die Gesamtfeuchtestromdichte innerhalb des Integrationsbereiches, d.h. der gesamten Schicht⁹

$$\begin{aligned}
 j^{m_{I+v}} \cdot d &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot \Delta p_e - \rho_w \cdot k \frac{(\theta_e - \theta_{\text{hyg}})^2}{2} \\
 j^{m_{I+v}} &= \frac{\Delta p_e}{\mu \cdot d} - \frac{\Delta \theta_e^2}{2 \cdot d} \\
 &\quad \frac{\delta_{\text{air}}}{\rho_w k}
 \end{aligned} \tag{44}$$

Die Dampfdruckdifferenz innerhalb der Schicht wird analog zu Abschnitt 6.3.1 mit Δp_e bezeichnet, dabei entspricht der außenseitige Dampfdruck p_e dem Sättigungsdampfdruck $p_{\text{sat}, e}$. Die Differenz der Feuchtegehalte θ_e und θ_{hyg} an der außenseitigen Schichtgrenze wird mit $\Delta \theta_e$ abgekürzt. Des Weiteren lässt sich der Kapillarwasserwiderstand r_w definieren.

$$r_w = \frac{d}{\rho_w k} \tag{45}$$

Setzt man den Diffusionswiderstand (28) und Kapillarwasserwiderstand in Gleichung (44) ein, erhält man die Gesamtfeuchtestromdichte der überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht (siehe Abbildung 9)

$$j^{m_{I+v}} = \frac{\Delta p_e}{r_v} - \frac{\Delta \theta_e^2}{2 \cdot r_w} \quad \text{außenseitig durchfeuchte Schicht} \tag{46}$$

Für den Fall, dass die Schicht innenseitig durchfeuchtet wird (d.h. die linke Seite der Schicht ist überhygroskopisch feucht), ergibt sich die Gesamtfeuchtestromdichte

$$j^{m_{I+v}} = \frac{\Delta p_i}{r_v} + \frac{\Delta \theta_i^2}{2 \cdot r_w} \quad \text{innenseitig durchfeuchte Schicht} \tag{47}$$

6.5.2 Feuchtettransport in einer vollständig überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht

In einer vollständig überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht entspricht der Partialdruck an beiden Schichtgrenzen dem Sättigungsdampfdruck. Im stationären Zustand stellt sich ein Feuchtefeld wie in Abbildung 11 ein. Die Ausbildung des Feuchteprofils entscheidet dabei über die Richtung des Kapillarstromes.

9. Bedingung für die Integration war die Konstanz der Gesamtfeuchtestromdichte im gesamten Integrationsbereich.

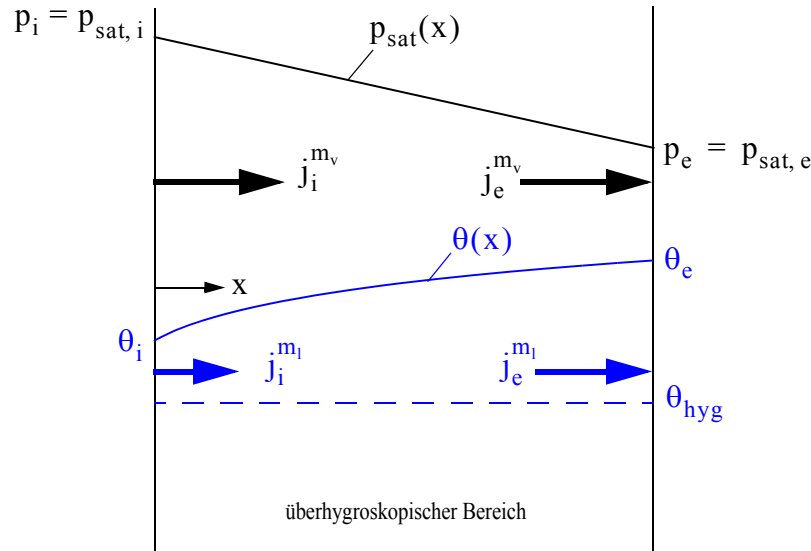


Abbildung 11 Dampf- und Feuchteprofil einer überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht

Integriert man die Gleichung (42) mit den Integrationsgrenzen für eine vollständig überhygroskopisch durchfeuchtete Schicht aus, so erhält man

$$\begin{aligned}
 j^{m_{1+v}} \cdot \int_0^x dx &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot \int_{p_{\text{sat},i}}^{p(x)} dp - \rho_w \int_{\theta_i}^{\theta(x)} D_1(\theta) d\theta \\
 &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot p \Big|_{p_{\text{sat},i}}^{p(x)} - \rho_w k \left[\frac{\theta^2}{2} - \theta_{\text{hyg}} \theta \right] \Big|_{\theta_i}^{\theta(x)} \\
 j^{m_{1+v}} \cdot x &= -\frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} \cdot (p(x) - p_{\text{sat},i}) - \frac{\rho_w k}{2} [\theta(x)^2 - \theta_i^2 - 2\theta_{\text{hyg}}(\theta(x) - \theta_i)] \quad (48)
 \end{aligned}$$

Für die gesamte Schicht ergibt sich die Gesamtfeuchtestromdichte zu

$$\begin{aligned}
 j^{m_{1+v}} &= \frac{p_{\text{sat},i} - p_{\text{sat},e}}{r_v} - \frac{(\theta_e - \theta_{\text{hyg}})^2 - (\theta_i - \theta_{\text{hyg}})^2}{2 \cdot r_w} \\
 j^{m_{1+v}} &= \frac{\Delta p_s}{r_v} - \frac{\Delta \theta_e^2 - \Delta \theta_i^2}{2 \cdot r_w} \quad (49)
 \end{aligned}$$

6.6 Feuchtetransport durch kombinierte Dampfdiffusion und kapillare Leitung in einer mehrschichtigen Konstruktion

Luftfeuchte bzw. Kapillardruck sind im Raum stetig definierte Größen. Durch die Feuchtespeicherfunktion lassen sich nun auch die räumlichen Feuchtefelder berechnen, wobei an der Grenze zwischen unterschiedlichen Materialien dabei Sprünge im Feuchtegehalt auftreten können (siehe Abbildung 12). Die Feuchtegehalte zu beiden Seiten der Schichtgrenze können mittels Feuchtesprungbedingungen ineinander umgerechnet werden.

6.6.1 Feuchtesprungbedingungen

An einer Schichtgrenze sind Temperatur und Luftfeuchte gleich groß. Durch die Feuchtespeicherfunktion lässt sich nun für beide Schichten der entsprechende Feuchtegehalt berechnen.

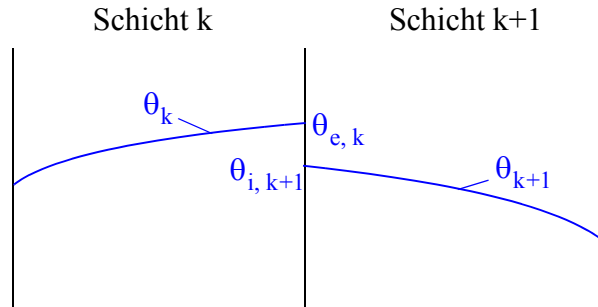


Abbildung 12 Sprung im Feuchtegehalt bei aneinandergrenzenden, überhygroskopisch durchfeuchteten Schichten

Möchte man die Feuchtegehalte der beiden Schichten direkt ins Verhältnis setzen, müssen die Gleichungen (23) und (24) nach der Luftfeuchte umgestellt und für die jeweiligen Bereiche gleichgesetzt werden.

Für den hygroskopischen Bereich gilt dann für die Schichten mit den Indizes k und $k+1$

$$\frac{\theta_k}{\theta_{\text{hyg}, k}} = \varphi = \frac{\theta_{k+1}}{\theta_{\text{hyg}, k+1}}$$

und damit

$$\theta_k = \frac{\theta_{\text{hyg}, k}}{\theta_{\text{hyg}, k+1}} \theta_{k+1} = G_{\text{hyg}, k} \cdot \theta_{k+1} \quad (50)$$

Der Feuchtesprungbeiwert $G_{\text{hyg}, k}$ ist damit das Verhältnis der maximalen hygroskopischen Feuchten der Stoffe.

Gleichermaßen kann die Luftfeuchte auch für zwei überhygroskopisch durchfeuchtete Schichten k und $k+1$ gleichgesetzt werden und es ergibt sich die Beziehung

$$\begin{aligned} \frac{\theta_k - \theta_{\text{hyg}, k}}{\theta_{\text{cap}, k} - \theta_{\text{hyg}, k}} (1 - \varphi_{\text{hyg}, k}) + \varphi_{\text{hyg}, k} &= \varphi \\ &= \frac{\theta_{k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}}{\theta_{\text{cap}, k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}} (1 - \varphi_{\text{hyg}, k+1}) + \varphi_{\text{hyg}, k+1} \end{aligned} \quad (51)$$

Geht man nun davon aus, dass der Übergang vom hygroskopischen in den überhygroskopischen Bereich bei beiden Stoffen näherungsweise bei der gleichen Luftfeuchte stattfindet, d.h. es gilt

$$\varphi_{\text{hyg}, k} \equiv \varphi_{\text{hyg}, k+1}$$

vereinfacht sich (51) zu

$$\frac{\theta_k - \theta_{\text{hyg}, k}}{\theta_{\text{cap}, k} - \theta_{\text{hyg}, k}} = \frac{\theta_{k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}}{\theta_{\text{cap}, k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}}$$

Daraus folgt die Feuchtesprungbedingung und der Feuchtesprungbeiwert G_k für den überhygroscopischen Bereich

$$\begin{aligned} \theta_k - \theta_{\text{hyg}, k} &= \frac{\theta_{\text{cap}, k} - \theta_{\text{hyg}, k}}{\theta_{\text{cap}, k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}} (\theta_{k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}) \\ &= G_k \cdot (\theta_{k+1} - \theta_{\text{hyg}, k+1}) \end{aligned} \quad (52)$$

6.6.2 Feuchtedurchgang bei mehrschichtigen Konstruktionen unter Berücksichtigung des Kapillarwassertransportes (Klassifizierung)

In Abhängigkeit von den Dampfdiffusionswiderständen und anliegenden Klimabedingungen stellt sich in der Konstruktion ein Dampfdruck- und Feuchteprofil ein. Dabei können wie beim Wasserdampfdruckschema nach Glaser mehrere Fälle unterschieden werden:

1. Der Partialdruck ist stets kleiner als der Sättigungsdampfdruck; es findet keine Kondensation statt und alle Schichten sind lediglich hygroskopisch durchfeuchtet.
2. Der Partialdruck erreicht bzw. überschreitet an einer Schichtgrenze den Sättigungsdampfdruck; an dieser Schichtgrenze (der Kondensationsebene, bzw. K-Ebene) tritt Kondensat auf, welches sich durch kapillare Leitung in den beidseitig angrenzenden Schichten ausbreitet.
3. Der Partialdruck erreicht bzw. überschreitet an mehreren Schichtgrenzen den Sättigungsdampfdruck; in den betroffenen, vollständig überhygroscopisch durchfeuchteten Schichten bildet sich Tauwasser. In den nur teilweise überhygroscopisch durchfeuchteten Randschichten breitet sich das Kondensat durch kapillare Leitung aus.
4. Es tritt eine räumlich getrennte Kombination der Fälle 2 oder 3 auf, so dass zwischen den K-Ebenen teilweise überhygroscopische oder nur hygroskopisch durchfeuchtete Schichten liegen.

Der Fall 1 führt zu keiner Kondensation und das Dampfdruckprofil kann mit den Formeln aus dem Abschnitt 6.3.2 berechnet werden.

Die Fälle 2 und 3 sollen in den folgenden Abschnitten betrachtet werden.

6.7 Feuchtedurchgang bei einer Kondensationsebene

Kommt es an nur einer Schichtgrenze innerhalb der Konstruktion zur Tauwasserbildung, so bilden sich von dieser Kondensationsebene wegführende¹⁰ Kapillarwasserströme (siehe Abbildung 13).

10. Die Stromdichten sind entsprechend der Flussrichtung vorzeichenbehaftet definiert, von innen nach außen fließende Ströme sind positiv definiert.

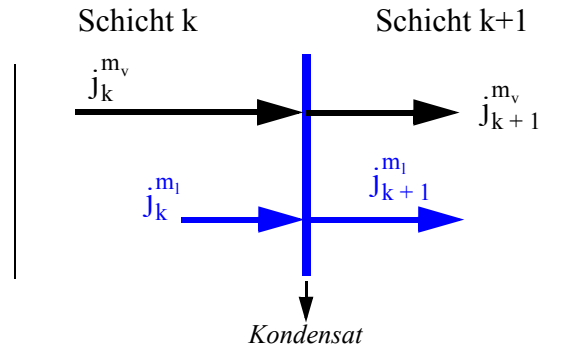


Abbildung 13 Feuchtströme in zwei Schichten, zwischen denen Kondensat entsteht

Die Gesamtfuchtströme zu beiden Seiten der Kondensationsebene lassen sich durch die Gleichungen (46) und (47) beschreiben. Zur Unterscheidung werden die Kenngrößen der beiden Schichten jeweils mit den Indizes k und $k+1$ versehen.

$$j_k^{m_{l+v}} = \frac{\Delta p_k}{r_{v,k}} - \frac{\Delta \theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{w,k}} \quad \text{für die Schicht } k \quad (53)$$

und

$$j_{k+1}^{m_{l+v}} = \frac{\Delta p_{k+1}}{r_{v,k+1}} + \frac{\Delta \theta_{i,k+1}^2}{2 \cdot r_{w,k+1}} \quad \text{für die Schicht } k+1 \quad (54)$$

Dabei werden die folgenden Abkürzungen benutzt

$$\Delta p_k = p_{i,k} - p_{\text{sat},e,k} \quad \text{und} \quad \Delta \theta_{e,k}^2 = (\theta_{e,k} - \theta_{\text{hyg},k})^2$$

$$\Delta p_{k+1} = p_{i,\text{sat},k} - p_{i,k} \quad \text{und} \quad \Delta \theta_{i,k+1}^2 = (\theta_{i,k+1} - \theta_{\text{hyg},k+1})^2$$

In allen anderen Schichten der Konstruktion gilt für die Gesamtfuchtstromdichte die Gleichung

$$j_i^{m_{l+v}} = j_i^{m_v} = \frac{\Delta p_i}{r_{v,i}} \quad i=1..k-1, k+2 ..n \quad (55)$$

Die Gleichung der Gesamtfuchtstromdichte lässt sich für jede Schicht nach der Druckdifferenz Δp umstellen. Da die Feuchtstromdichten im stationären Zustand in allen Schichten gleich groß sind

$$j^{m_{l+v}} = j_i^{m_{l+v}} = j_k^{m_{l+v}} = j_{k+1}^{m_{l+v}}$$

können die Teildruckdifferenzen von der Innenseite bis zur K-Ebene zum Gesamtdruckabfall aufsummiert werden. Es ergibt sich

$$\Delta p_{1..k} = \sum_{i=1}^k \Delta p_i = j^{m_{I+V}} \cdot \sum_{i=1}^k r_{v, 1..k} + \frac{\Delta \theta_{e, k}^2}{2 \cdot r_{w, k}} r_{v, k} \quad (56)$$

Dabei ist $r_{v, 1..k}$ der Wasserdampfdiffusionswiderstand von der Innenseite bis zur K-Ebene:

$$r_{v, 1..k} = \sum_{i=1}^k r_{v, i} \quad (57)$$

Die Gleichung (56) kann nun nach der Gesamtfeuchtestromdichte umgestellt werden.

$$j^{m_{I+V}} = \frac{\Delta p_{1..k}}{r_{v, 1..k}} - \frac{\Delta \theta_{e, k}^2}{2 \cdot r_{w, k}} \cdot \frac{r_{v, k}}{r_{v, 1..k}} = j_{1..k}^{m_v} - \frac{\Delta \theta_{e, k}^2}{2 \cdot r_{w, k}} \cdot \frac{r_{v, k}}{r_{v, 1..k}} \quad (58)$$

Die Dampfstromdichte des von der Innenseite eindiffundierenden Wasserdampfes wird dabei mit $j_{1..k}^{m_v}$ abgekürzt.

Die Gleichung für die äußere Gesamtfeuchtestromdichte kann auf gleiche Weise aufgestellt werden. Dazu werden die Dampfdruckdifferenzen von der K-Ebene nach außen aufsummiert und die Gleichung ebenfalls nach der Gesamtfeuchtestromdichte umgestellt:

$$j^{m_{I+V}} = \frac{\Delta p_{k+1..n}}{r_{v, k+1..n}} + \frac{\Delta \theta_{i, k+1}^2}{2 \cdot r_{w, k+1}} \cdot \frac{r_{v, k+1}}{r_{v, k+1..n}} = j_{k+1..n}^{m_v} + \frac{\Delta \theta_{i, k+1}^2}{2 \cdot r_{w, k+1}} \cdot \frac{r_{v, k+1}}{r_{v, k+1..n}} \quad (59)$$

mit dem Wasserdampfdiffusionswiderstand von der K-Ebene nach außen

$$r_{v, k+1..n} = \sum_{i=k+1}^n r_{v, i}$$

Durch Umformen und Gleichsetzen der Gleichungen (58) und (59) können nun die zunächst unbekanntes Feuchtegehalte eliminiert werden. Hilfreich ist dabei die Definition des kombinierten Dampf/Wasserwiderstandes

$$r_{I+V, i} = r_{w, k} \cdot \frac{r_{v, 1..k}}{r_{v, k}} \quad \text{innerer Dampf/Kapillarwasserwiderstand} \quad (60)$$

und

$$r_{I+V, e} = r_{w, k+1} \cdot \frac{r_{v, k+1..n}}{r_{v, k+1}} \quad \text{äußerer Dampf/Kapillarwasserwiderstand} \quad (61)$$

Zusätzlich können die Durchfeuchtungshöhen $\Delta \theta_{e, k}^2$ und $\Delta \theta_{i, k+1}^2$ durch Einsetzen der Feuchtesprungbedingung (52) ineinander überführt werden.

$$\Delta \theta_{i, k+1}^2 = \frac{\Delta \theta_{e, k}^2}{G_k^2}$$

Die Gleichungen (58) und (59) lassen sich nun vereinfacht schreiben als

$$j^{m_{l+v}} = j_{1..k}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{l+v,i}} \quad \text{innere Gesamtstromdichte} \quad (62)$$

und

$$j^{m_{l+v}} = j_{k+1..n}^{m_v} + \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2} \quad \text{äußere Gesamtstromdichte} \quad (63)$$

Durch geeignetes Umformen (siehe Anhang A.1) kann die unbekannt Durchfeuchtungshöhe $\Delta\theta_{e,k}$ eliminiert werden und es ergibt sich die Gesamtfeuchtestromdichte

$$j^{m_{l+v}} = \frac{j_{1..k}^{m_v} \cdot r_{l+v,i} + j_{k+1..n}^{m_v} \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2}{r_{l+v,i} + r_{l+v,e} \cdot G_k^2} \quad (64)$$

Die Gesamtfeuchtestromdichte im stationären Zustand ergibt sich somit aus dem mittels Feuchtwiderständen gewichteten Mittelwert der ein- und ausdiffundierenden Dampfstromdichten.

6.7.1 Berechnung der Durchfeuchtungshöhe

Ist die Gesamtfeuchtestromdichte bekannt, lässt sich die überhygroskopische Durchfeuchtungshöhe nach Gleichung (58) berechnen:

$$\begin{aligned} j^{m_{l+v}} &= j_{1..k}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{l+v,i}} \\ \Delta\theta_{e,k}^2 &= 2 \cdot r_{l+v,i} (j_{1..k}^{m_v} - j^{m_{l+v}}) \\ \theta_{e,k} &= \sqrt{2 \cdot r_{l+v,i} (j_{1..k}^{m_v} - j^{m_{l+v}})} + \theta_{\text{hyg},k} \end{aligned} \quad (65)$$

Die Durchfeuchtungshöhe der k+1-ten Schicht lässt sich dann über die Feuchtesprungbedingung ermitteln

$$\Delta\theta_{i,k+1} = \frac{\Delta\theta_{e,k}}{G_k} \quad (66)$$

6.7.2 Berechnung der Durchfeuchtungsbreite im stationären Zustand

Die Breite des überhygroskopischen Bereiches d_{ovh} der Schicht entspricht der Durchfeuchtungsbreite. Sie lässt sich als Abstand von der K-Ebene bis zu dem Punkt innerhalb der Schicht, an dem $p_k \equiv p_{\text{sat},k}$ gilt, bestimmen (siehe Abbildung 9).

Der Verlauf des Sättigungsdampfdruckes kann innerhalb einer Schicht näherungsweise linearisiert werden:

$$p_{\text{sat},k}(x) = p_{\text{sat},i,k} - \frac{p_{\text{sat},i,k} - p_{\text{sat},e,k}}{d_k} \cdot x = p_{\text{sat},i,k} - \frac{\Delta p_{\text{sat},k}}{d_k} \cdot x \quad (67)$$

Den Verlauf des Partialdruckes im hygroskopischen Bereiches beschreibt Gleichung (26):

$$p_k(x) = p_{i,k} - j_k \frac{m_{1+v} \mu_k}{\delta_{\text{air}}} x \quad (68)$$

Durch Gleichsetzen und Einsetzen von $x = d_k - d_{\text{ovh},k}$ erhält man nach geeigneten Umformungen (siehe Anhang A.2) die Durchfeuchtungsbreite

$$d_{\text{ovh},k} = d_k \left(\frac{j_k \frac{m_{1+v} p_{i,k} - p_{\text{sat},e,k}}{r_{v,k}}}{j_k \frac{m_{1+v} p_{\text{sat},i,k} - p_{\text{sat},e,k}}{r_{v,k}}} \right) \quad (69)$$

Mit dem gleichen Verfahren lässt sich die Durchfeuchtungsbreite der k+1-ten Schicht ableiten:

$$d_{\text{ovh},k+1} = d_{k+1} \left(\frac{j_{k+1} \frac{m_{1+v} p_{\text{sat},e,k+1} - p_{e,k+1}}{r_{v,k+1}}}{j_{k+1} \frac{m_{1+v} p_{\text{sat},i,k+1} - p_{\text{sat},e,k+1}}{r_{v,k+1}}} \right) \quad (70)$$

6.7.3 Berechnung der Kondensatmenge

Stellt man die in Abschnitt 6.5.1 durch Integration über die Breite x abgeleitete Gleichung (43) nach $\theta(x)$ um, erhält man die Gleichung für das Feuchtefeld:

$$\theta(x) = \theta_{\text{hyg}} + \sqrt{\frac{2}{\rho_w \cdot k} \left[j^{m_{1+v}} \cdot x + \frac{\delta_{\text{air}}}{\mu} (p(x) - p_i) \right]} \quad (71)$$

Da der Verlauf des Feuchtegehaltes einer Wurzelfunktion folgt, lässt sich die Fläche und damit die Kondensatmenge bei Kenntnis von Höhe und Breite der Durchfeuchtung leicht berechnen:

$$W_{1+v,k} = \frac{2}{3} \rho_w \cdot \Delta \theta_{e,k} \cdot d_{\text{ovh},k} \quad \text{in [kg/m}^2] \quad (72)$$

$$W_{1+v,k+1} = \frac{2}{3} \rho_w \cdot \Delta \theta_{i,k+1} \cdot d_{\text{ovh},k+1} \quad \text{in [kg/m}^2] \quad (73)$$

6.8 Feuchtedurchgang bei zwei oder mehr benachbarten Kondensatebenen

Existieren mehrere benachbarte Kondensatebenen, so sind die Schichten zwischen den Kondensatebenen vollständig überhygroskopisch durchfeuchtet. Dampfdiffusion erfolgt infolge der Differenz der Sättigungsdrücke an beiden Schichtgrenzen und Kapillarwasser wird entsprechend dem Feuchtegradienten transportiert (siehe Abschnitt 6.5.2).

Ebenso wie im vorangehenden Kapitel lässt sich im stationären Zustand die Druckdifferenz von der Innenoberfläche der Konstruktion zur innersten K-Ebene aufsummieren. Die erhaltene Gleichung lässt sich nach der Gesamtstromdichte bis zur innersten Kondensatebene umstellen (vergleiche Ableitung der Gleichung 62 auf Seite 29). Die Gesamtstromdichte von der äußersten K-Ebene bis zur Außenseite lässt sich ebenso schreiben (vergleiche Ableitung der Gleichung 63 auf Seite 29). Für die Gesamtstromdichten der durchfeuchteten Schichten gilt die Gleichung (49).

Ist nur eine Schicht vollständig durchfeuchtet, d.h. zwei benachbarte Kondensatebenen entstehen, ergeben sich folgende Stromdichten (der Index k bezeichnet die innerste, teilweise durchfeuchtete Schicht):

$$j^{m_{l+v}} = j_{1..k}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{l+v,i}} \quad \text{bis zur inneren K-Ebene} \quad (74)$$

$$j^{m_{l+v}} = j_{k+1}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k+1}^2 - \Delta\theta_{i,k+1}^2}{2 \cdot r_{w,k+1}} \quad \text{vollständig durchfeuchtete Schicht} \quad (75)$$

$$j^{m_{l+v}} = j_{k+2..n}^{m_v} + \frac{\Delta\theta_{i,k+2}^2}{2 \cdot r_{l+v,e}} \quad \text{bis zur äußeren K-Ebene} \quad (76)$$

Alle drei Gesamtstromdichten sind im Gleichgewichtszustand gleich groß. Die zunächst unbekanntes Feuchtegehalte lassen sich durch Umformen und Gleichsetzen der Gleichungen (74) bis (76) eliminieren (siehe Anhang A.3). Die Gesamtstromdichte kann dann in Abhängigkeit von den ein- und ausdiffundierenden Dampfströmen und den Feuchtwiderständen berechnet werden.

$$j^{m_{l+v}} = \frac{j_i^{m_v} \cdot r_{l+v,i} + j_{k+1}^{m_v} \cdot r_{w,k+1} G_k^2 + j_e^{m_v} \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2 G_{k+1}^2}{r_{l+v,i} + r_{w,k+1} G_k^2 + r_{l+v,e} \cdot G_k^2 G_{k+1}^2} \quad (77)$$

Führt man die gleiche Ableitung für drei benachbarte Kondensatebenen durch, erhält man die folgende Gleichung:

$$j^{m_{l+v}} = \frac{j_i^{m_v} \cdot r_{l+v,i} + j_{k+1}^{m_v} r_{w,k+1} G_k^2 + j_{k+2}^{m_v} r_{w,k+2} G_k^2 G_{k+1}^2 + j_e^{m_v} \cdot r_{l+v,e} G_k^2 G_{k+1}^2 G_{k+2}^2}{r_{l+v,i} + r_{w,k+1} G_k^2 + r_{w,k+2} G_k^2 G_{k+1}^2 + r_{l+v,e} G_k^2 G_{k+1}^2 G_{k+2}^2}$$

Betrachtet man diese zwei Gleichungen zusammen mit der Gleichung (64), so lässt sich ein Bildungsgesetz für die Gesamtstromdichte ableiten, wie im folgenden Abschnitt gezeigt werden soll.

6.8.1 Gesamtfeuchtestromdichte bei beliebig vielen benachbarten Kondensatebenen

Die teilweise durchfeuchtete Schicht auf der Innenseite des Kondensatbereiches soll den Index k_1 erhalten, die außenseitige Schicht den Index k_2 . Die kombinierten Dampf/Wasserwider-

stände für die Innen- und Außenseite können mit den folgenden Gleichungen berechnet werden (vergleiche Ableitung der Gleichungen 60 und 61 auf Seite 28).

$$r_{l+v, i} = r_{w, k_1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{k_1} r_{v, i}}{r_{v, k_1}} \quad \text{innenseitiger Dampf/Wasserwiderstand} \quad (78)$$

$$r_{l+v, e} = r_{w, k_2} \cdot \frac{\sum_{i=k_2}^n r_{v, i}}{r_{v, k_2}} \quad \text{außenseitiger Dampf/Wasserwiderstand} \quad (79)$$

Des Weiteren können die ein- und ausdiffundierenden Dampfstromdichten geschrieben werden als

$$j_{1..k_1}^{m_v} = \frac{\Delta p_{1..k_1}}{r_{v, 1..k_1}} \quad \text{innere Dampfstromdichte} \quad (80)$$

$$j_{k_2..n}^{m_v} = \frac{\Delta p_{k_2..n}}{r_{v, k_2..n}} \quad \text{äußere Dampfstromdichte} \quad (81)$$

Für alle vollständig durchfeuchteten Schichten gilt für die Dampfstromdichte

$$j_k^{m_v} = \frac{\Delta p_k}{r_{v, k}} \quad \text{für } k = k_1..k_2 \quad (82)$$

Die Gesamtfeuchtestromdichte ergibt sich damit zu

$$j^{m_{l+v}} = \frac{j_{1..k_1}^{m_v} \cdot r_{l+v, i} + \sum_{i=k_1+1}^{k_2-1} \left(j_i^{m_v} r_{w, i} \prod_{k=k_1}^{i-1} G_k^2 \right) + j_{k_2..n}^{m_v} \cdot r_{l+v, e} \prod_{i=k_1}^{k_2} G_i^2}{r_{l+v, i} + \sum_{i=k_1+1}^{k_2-1} \left(r_{w, i} \prod_{k=k_1}^{i-1} G_k^2 \right) + r_{l+v, e} \prod_{i=k_1}^{k_2} G_i^2} \quad (83)$$

6.8.2 Berechnung der Durchfeuchtungshöhe bei mehreren Kondensatebenen

Mit der berechneten Gesamtfeuchtestromdichte und den bereits abgeleiteten Gleichungen für die Feuchtegehalte in teilweise und vollständig gesättigten Schichten lässt sich nun an allen Schichtgrenzen der Feuchtegehalt berechnen.

Bei zwei oder mehr benachbarten K-Ebenen gelten die folgenden Gleichungen. Der überhygroskopische Feuchtegehalt an der inneren K-Ebene wird wie in Abschnitt 6.7.1 ermittelt:

$$\theta_{e, k} = \sqrt{2 \cdot r_{l+v, i} (j_{1..k}^{m_v} - j^{m_{l+v}})} + \theta_{\text{hyg}, k}$$

bzw.

$$\Delta\theta_{e,k} = \sqrt{2 \cdot r_{l+v,i} (j_{1..k}^{m_v} - j^{m_{l+v}})}$$

$$\theta_{e,k} = \Delta\theta_{e,k} + \theta_{\text{hyg},k}$$

Der zugehörige Feuchtegehalt der Schicht k+1 lässt sich wiederum durch die Feuchtesprungbedingung bestimmen:

$$\Delta\theta_{i,k+1} = \frac{\Delta\theta_{e,k}}{G_k}$$

$$\theta_{i,k+1} = \Delta\theta_{i,k+1} + \theta_{\text{hyg},k+1}$$

Die Schicht k+1 ist vollständig überhygroskopisch durchfeuchtet. Es gilt für den Feuchtegehalt an der äußeren K-Ebene die Gleichung

$$j^{m_{l+v}} = j_{k+1}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k+1}^2 - \Delta\theta_{i,k+1}^2}{2 \cdot r_{w,k+1}}$$

$$\frac{\Delta\theta_{e,k+1}^2 - \Delta\theta_{i,k+1}^2}{2 \cdot r_{w,k+1}} = j_{k+1}^{m_v} - j^{m_{l+v}}$$

$$\Delta\theta_{e,k+1} = \sqrt{2 \cdot r_{w,k+1} (j_{k+1}^{m_v} - j^{m_{l+v}}) + \Delta\theta_{i,k+1}^2}$$

$$\theta_{e,k+1} = \Delta\theta_{e,k+1} + \theta_{\text{hyg},k+1}$$

Der Feuchtegehalt der nächsten Schicht an der gleichen Schichtgrenze lässt sich nun wiederum über die Feuchtesprungbedingung bestimmen.

Dieses Verfahren lässt sich auf beliebig viele, benachbarte, überhygroskopisch durchfeuchtete Schichten anwenden, so dass das Feuchteprofil im stationären Zustand vollständig beschrieben werden kann. Dazu müssen jeweils die folgenden Schritte schematisch abgearbeitet werden:

1. Berechnung des außenseitigen Feuchtegehalts der inneren, teilweise überhygroskopischen Schicht
2. Berechnung des innenseitigen Feuchtegehalts der nächsten Schicht mittels der Sprungbedingung
3. Berechnung des außenseitigen Feuchtegehalts der Schicht mittels der oben gegebenen Gleichung
4. solange vollständig überhygroskopische Schichten folgen, bei Schritt 2 die Rechnung fortführen
5. den innenseitigen Feuchtegehalt der äußeren, teilweise überhygroskopischen Schicht berechnen.

6.8.3 Berechnung der Durchfeuchtungsbreiten bei mehreren benachbarten Kondensatebenen

Die Durchfeuchtungsbreiten der äußeren, teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schichten lassen sich durch die in Abschnitt 6.7.2 gegebenen Formeln berechnen. Die zwischen den K-Ebenen liegenden Schichten sind vollständig feucht (damit ist die Durchfeuchtungsbreite gleich der Schichtbreite).

6.8.4 Berechnung der Kondensatmenge bei mehreren benachbarten Kondensatebenen

Für die teilweise durchfeuchteten Schichten gilt entsprechend die Beziehung aus Abschnitt 6.7.3. Die in den vollständig feuchten Schichten gespeicherte Wassermasse lässt sich durch Integration der Feuchtefunktion ermitteln und es ergibt sich die folgende Gleichung:

$$W_{l+v, k} = \frac{2}{3} \rho_w d_{\text{ovh}, k} \frac{\Delta\theta_{e, k}^3 - \Delta\theta_{i, k}^3}{\Delta\theta_{e, k}^2 - \Delta\theta_{i, k}^2} \quad \text{in [kg/m}^2\text{]} \quad (84)$$

mit dem Index k für alle überhygroskopisch durchfeuchteten Schichten.

7 Einstellvorgänge bei winterlichem Sprungklima

Die bisherigen Ableitungen gelten für den stationären Zustand, d.h. es liegt ein konstantes Klima an. Wird eine Konstruktion von einem zwischen Winter- und Sommerklima wechselnden Sprungklima belastet, kommt es nach Anlegen des Winterklimas zu einer steten Aufladung der Konstruktion mit innerer Kondensatfeuchte. Entsprechend der Bilanzgleichungen aus Abschnitt 3 lässt sich für die Feuchtemassenänderung schreiben

$$\frac{d}{dt}(W_{l+v}) = j_i^{m_{l+v}} - j_e^{m_{l+v}} \quad (85)$$

Die Änderung der Kondensatmasse resultiert aus der Differenz des inneren und äußeren Feuchtestroms bzw. der ein- und ausdiffundierenden Feuchtemassen. Feuchtegehalt und Durchfeuchtungsbreite sind nun Funktionen der Zeit und somit die von ihnen abhängenden Feuchtemassen W_{l+v} .

7.1 Aufladungsvorgänge bei einer Kondensatebene

In Abbildung 14 ist der Aufladungsvorgang in einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht dargestellt. Dabei sind die für den stationären Zustand geltenden Größen mit dem Index ∞ versehen.

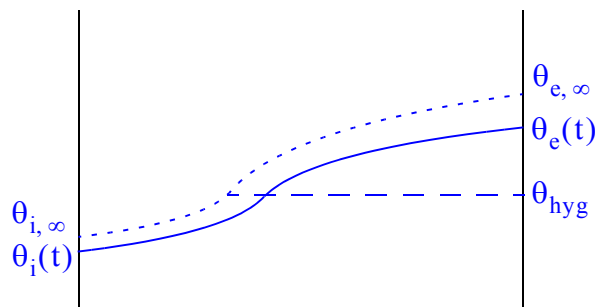


Abbildung 14 Änderung des Feuchtefeldes (Aufladung) einer teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schicht

Geht man davon aus, dass das Verhältnis von Feuchtegehalt an der Kondensatebene und Durchfeuchtungsbreite konstant bleibt, lassen sich die Durchfeuchtungsbreiten als vom Feuchtegehalt abhängige Größen schreiben. Dazu wird die zeitabhängige überhygroskopische Durchfeuchtungshöhe $\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)$ definiert als

$$\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t) = \theta_{e,k}(t) - \theta_{\text{hyg},k}$$

und es ergibt sich die zeitabhängige Durchfeuchtungsbreite für die Schicht k

$$d_{\text{ovh},k}(t) = d_{\text{ovh},k,\infty} \cdot \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)}{\theta_{e,k,\infty} - \theta_{\text{hyg},k}} = d_{\text{ovh},k,\infty} \cdot \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)}{\Delta\theta_{e,k,\infty}}$$

und für die Schicht $k+1$

$$\begin{aligned} d_{\text{ovh},k+1}(t) &= d_{\text{ovh},k+1,\infty} \cdot \frac{\theta_{i,k+1}(t) - \theta_{\text{hyg},k+1}}{\theta_{i,k+1,\infty} - \theta_{\text{hyg},k+1}} = d_{\text{ovh},k+1,\infty} \cdot \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k+1}(t)}{\Delta\theta_{i,k+1,\infty}} \\ &= d_{\text{ovh},k+1,\infty} \cdot \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t) G_k}{\Delta\theta_{e,k,\infty} G_k} = d_{\text{ovh},k+1,\infty} \cdot \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)}{\Delta\theta_{e,k,\infty}} \end{aligned}$$

Die zeitabhängige Feuchtemassenänderung lässt sich durch Einsetzen der Gleichungen (72) und (73) nun schreiben als

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(W_{\text{I+v},k} + W_{\text{I+v},k+1}) &= \frac{d}{dt} \left[\left(d_{\text{ovh},k}(t) + \frac{d_{\text{ovh},k+1}(t)}{G_k} \right) \frac{2}{3} \rho_w \cdot \Delta\theta_{\text{ovh},k}(t) \right] \\ &= \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d_{\text{ovh},k,\infty}}{\Delta\theta_{e,k,\infty}} + \frac{d_{\text{ovh},k+1,\infty}}{\Delta\theta_{e,k,\infty} G_k} \right) \frac{2}{3} \rho_w \cdot \Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)^2 \right] \\ &= C \cdot \frac{d}{dt} \Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)^2 \end{aligned}$$

mit der Abkürzung

$$C = \frac{2}{3} \rho_w \frac{1}{\Delta\theta_{e,k,\infty}} \left(d_{\text{ovh},k,\infty} + \frac{d_{\text{ovh},k+1,\infty}}{G_k} \right)$$

Die Differenz der inneren und äußeren Gesamtfuchtestromdichten lässt sich ebenso in zeitabhängiger Form ausdrücken.

$$\begin{aligned} j_i^{\text{mI+v}} - j_e^{\text{mI+v}} &= j_{1..k}^{\text{m}_v} - \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)^2}{2 \cdot r_{\text{wv},i}} - \left(j_{k+1..n}^{\text{m}_v} + \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)^2}{2 \cdot r_{\text{wv},e} \cdot G_k^2} \right) \\ &= j_{1..k}^{\text{m}_v} - j_{k+1..n}^{\text{m}_v} - \left(\frac{1}{r_{\text{wv},i}} + \frac{1}{r_{\text{wv},e} \cdot G_k^2} \right) \frac{\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)^2}{2} \end{aligned}$$

Die Lösung der Differentialgleichung (85) für die zeitliche Zunahme der Feuchtehöhe $\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t)$ der Schicht k ergibt nach HÄUPL (siehe [1] S. 532)

$$\Delta\theta_{\text{ovh},k}(t) = \Delta\theta_{\text{ovh},k,\infty} \sqrt{1 - e^{-\frac{j_{1..k}^{\text{m}_v} - j_{k+1..n}^{\text{m}_v}}{W_{\text{I+v},\infty}} \cdot t}} = \Delta\theta_{\text{ovh},k,\infty} \cdot \sqrt{A(t)} \quad (86)$$

Die Feuchtemasse $W_{\text{I+v},\infty}$ ist dabei die Summe der im stationären Zustand zu erwartenden Feuchtemassen $W_{\text{I+v},k}$ und $W_{\text{I+v},k+1}$.

Die Aufladungsfunktion $A(t)$

$$A(t) = 1 - e^{-\frac{j_{1..k}^{\text{m}_v} - j_{k+1..n}^{\text{m}_v}}{W_{\text{I+v},\infty}} \cdot t} \quad (87)$$

beschreibt die einer 1-e Funktion folgende Annäherung an den Maximalwert. Die Zeit t ist dabei die seit Beginn der Kondensation verstrichene Zeit.

Über die Sprungbedingung ergibt sich so auch die Durchfeuchtung der Schicht $k+1$

$$\Delta\theta_{\text{ovh}, k+1}(t) = \frac{\Delta\theta_{\text{ovh}, k, \infty}}{G_k} \cdot \sqrt{A(t)} \quad (88)$$

Die zeitabhängigen Durchfeuchtungsbreiten der Schichten können ebenso berechnet werden

$$d_{\text{ovh}, k}(t) = d_{\text{ovh}, k, \infty} \cdot \sqrt{A(t)} \quad \text{Durchfeuchtungsbreite - Schicht } k \quad (89)$$

$$d_{\text{ovh}, k+1}(t) = d_{\text{ovh}, k+1, \infty} \cdot \sqrt{A(t)} \quad \text{Durchfeuchtungsbreite - Schicht } k+1 \quad (90)$$

und schließlich die zeitliche Zunahme der Kondensatmenge

$$W_{\text{I+v}, k}(t) = W_{\text{I+v}, k, \infty} \cdot A(t) \quad \text{Kondensatmenge in der Schicht } k \quad (91)$$

$$W_{\text{I+v}, k+1}(t) = W_{\text{I+v}, k+1, \infty} \cdot A(t) \quad \text{Kondensatmenge in der Schicht } k+1 \quad (92)$$

$$W_{\text{I+v}}(t) = W_{\text{I+v}, \infty} \cdot A(t) \quad \text{Gesamtkondensatmenge} \quad (93)$$

7.2 Einstellvorgänge bei mehreren benachbarten Kondensatebenen

Kommt zusätzlich zu den teilweise überhygroskopischen Schichten noch eine vollständig durchfeuchtete Schicht hinzu, so beeinflusst diese die Aufladung der angrenzenden, teilweise hygroskopischen Schichten. Die Ableitung der Gleichungen erfolgt wie im vorangehenden Abschnitt ausgehend von der Feuchtemassenbilanzgleichung. Die Lösung der Differentialgleichung liefert die folgenden Gleichungen für die Zunahme der Kondensatmenge mit der Zeit.

Für die innere, teilweise überhygroskopische Schicht k_1 gilt:

$$\Delta\theta_{\text{ovh}, k_1}(t) = \Delta\theta_{\text{ovh}, k_1, \infty} \cdot A(t)^{1/3} \quad \text{Zunahme der Durchfeuchtungshöhe} \quad (94)$$

$$d_{\text{ovh}, k_1}(t) = d_{\text{ovh}, k_1, \infty} \cdot A(t)^{2/3} \quad \text{Zunahme der Durchfeuchtungsbreite} \quad (95)$$

$$W_{\text{I+v}, k_1}(t) = W_{\text{I+v}, k_1, \infty} \cdot A(t) \quad \text{Zunahme der Kondensatmenge} \quad (96)$$

Diese Gleichungen gelten sinngemäß auch für die andere, teilweise überhygroskopisch durchfeuchtete Schicht k_2 . Im Vergleich zu der Zunahme von Durchfeuchtungshöhe und -breite bei nur einer Kondensatebene ist festzustellen, dass die Durchfeuchtungsbreite schneller wächst als die Durchfeuchtungshöhe. Die Kondensatmenge in der Schicht wächst jedoch unabhängig von angrenzenden überhygroskopischen Schichten genauso schnell.

Für alle vollständig überhygroskopischen Schichten k gilt:

$$\Delta\theta_{\text{ovh}, k}(t) = \Delta\theta_{\text{ovh}, k, \infty} \cdot A(t)^{1/3} \quad \text{Zunahme der Durchfeuchtungshöhe} \quad (97)$$

$$W_{\text{I+v}, k}(t) = W_{\text{I+v}, k, \infty} \cdot A(t) \quad \text{Zunahme der Kondensatmenge} \quad (98)$$

Da die Zunahme der Kondensatmenge in jeder Schicht mit der gleichen Aufladungsfunktion und gleicher Potenz erfolgt, kann für die Zunahme der Gesamtkondensatmenge in der Konstruktion geschrieben werden:

$$W_{I+V}(t) = \sum_{k_1}^{k_2} W_{I+V, \infty} \cdot A(t) \quad (99)$$

7.3 Hygroskopische Einstellzeit

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 Dampfdruck lässt sich diese Erhöhung des Feuchtegehaltes auch durch die Änderung des Dampfdruckprofils beschreiben.

Der Dampfdruck an der K-Ebene soll zu Beginn des Einstellvorgangs einen Anfangswert entsprechend der Anfangsluftfeuchte φ_0 haben.

$$p_{k, e, 0} = p_{\text{sat}, k} \cdot \varphi_0$$

Eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte auf 100% bewirkt eine Erhöhung des Dampfdruckes in der K-Ebene $p_k \rightarrow p_{\text{sat}, k}$. Entsprechend verändert sich das Dampfdruckprofil. In Abbildung 15 ist dieser Vorgang am Beispiel einer zweischichtigen Konstruktion dargestellt. Da im hygroskopischen Bereich der Feuchtegehalt proportional zur Luftfeuchte verläuft, verändert sich das Feuchteprofil gleichermaßen. Die sich aus der Differenz der Feuchteprofile zu Beginn und am Ende der hygroskopischen Aufsättigung ergebende Wassermasse, ist die im hygroskopischen Bereich gespeicherte Feuchtemenge (in den zwei Dreiecksflächen).

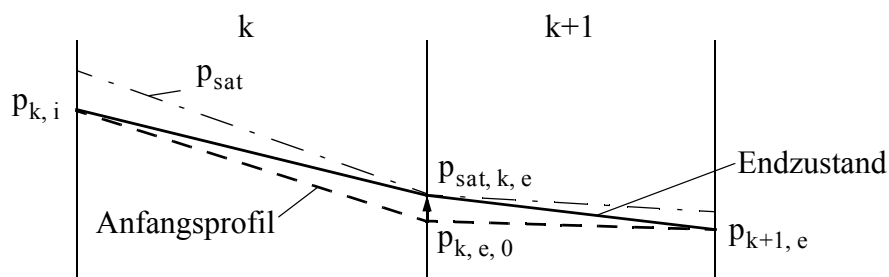


Abbildung 15 hygroskopischer Einstellvorgang bei einer 2-schichtigen Konstruktion

Für allgemeine Konstruktionen, mit entweder einer oder mehreren benachbarten Kondensatebenen können nun die relativen Änderungen der Dampfdrücke bzw. Feuchtegehalte an den Schichtgrenzen berechnet werden. Da es sich um eine relative Änderung der Dampfdrücke bzw.

Feuchtegehalte von φ_0 bis $\varphi = 100\%$ handelt, kann analog für die Änderung der Feuchtemasse in einer beliebigen Schicht geschrieben werden:

$$\Delta W_{v,k} = \frac{(\Delta\varphi_{i,k} + \Delta\varphi_{e,k})}{2} \theta_{\text{hyg},k} d_k \quad (100)$$

Dabei sind $\Delta\varphi_{i,k}$ und $\Delta\varphi_{e,k}$ die relativen Änderungen der Luftfeuchte und damit des Feuchtegehalts an beiden Schichtgrenzen. Die relativen Änderungen der Luftfeuchte lassen sich nach HÄUPL (siehe [1] S. 537) wie folgt schreiben:

$$\Delta\varphi_{e,j} = \frac{\sum_{m=1}^j r_{v,m}}{k_1} \cdot \frac{p_{\text{sat},k_1,e}}{p_{\text{sat},j,e}} \quad \text{für } 1 \leq j < k_1$$

und

$$\Delta\varphi_j = 1 \quad \text{für } k_1 \leq j \leq k_2$$

sowie

$$\Delta\varphi_{i,j} = \frac{\sum_{m=j}^n r_{v,m}}{\sum_{m=k_2}^n r_{v,m}} \cdot \frac{p_{\text{sat},k_2,i}}{p_{\text{sat},j,i}} \quad \text{für } k_2 < j \leq n$$

Dabei bezeichnen die Schichten k_1 und k_2 die innere und äußere teilweise überhygroskopische Schicht. Die innerhalb der hygroskopischen Einstellzeit gespeicherte Wassermasse lässt sich nun wie folgt berechnen (zur Vereinfachung der Schreibweise wird $\Delta\varphi_{e,0} = \Delta\varphi_{i,n+1} = 0$ definiert):

$$W_v = \frac{1 - \varphi_0}{2} \cdot \left(\sum_{j=1}^{k_1} (\Delta\varphi_{e,j-1} + \Delta\varphi_{e,j}) \theta_{\text{hyg},j} d_j \right. \\ \left. + 2 \sum_{j=k_1+1}^{k_2-1} \theta_{\text{hyg},j} d_j \quad (\text{optional, nur bei } k_2 > k_1 + 1) \right. \\ \left. + \sum_{j=k_2}^n (\Delta\varphi_{i,j} + \Delta\varphi_{i,j+1}) \theta_{\text{hyg},j} d_j \right) \quad (101)$$

Diese Feuchtemenge wird innerhalb der hygroskopischen Einstellzeit durch Dampfdiffusion in die Konstruktion transportiert. Somit ergibt sich die hygroskopische Einstellzeit zu

$$t_{\text{hyg}} = \frac{W_v}{j_{1..k} \cdot m_v - j_{k+1..n} \cdot m_v} \quad \text{hygroskopische Einstellzeit} \quad (102)$$

7.4 Überhygroskopische Einstellzeit

Das überhygroskopische Feuchtefeld nähert sich bei fortschreitender Zeit allmählich an das Feuchtefeld im stationären Zustand an. In Abhängigkeit von den Dampfdiffusions- und Flüssigwasserwiderständen und damit den Feuchtestromdichten kann es nun sehr große zeitliche Unterschiede bei der Annäherung an den Endzustand der Aufladung geben. Es ist jedoch zweckmäßig, einen Endpunkt der überhygroskopischen Aufladung, die sogenannte überhygroskopische Einstellzeit, zu ermitteln, um eine Aussage über die Aufladungsgeschwindigkeit treffen zu können. Da die Aufladungsfunktion einer 1-e-Funktion folgt, kann die Zeit zum Erreichen von 95% des Endwertes der Kondensatmenge als ungefährender Endpunkt der Aufladung definiert werden. Damit ergibt sich die überhygroskopische Einstellzeit zu

$$0,95 = 1 - e^{-\frac{j_{1..k}^{m_{I+V}} - j_{k+1..n}^{m_{I+V}}}{W_{I+V,\infty}} \cdot t_{ovh}}$$

$$e^{-\frac{j_{1..k}^{m_{I+V}} - j_{k+1..n}^{m_{I+V}}}{W_{I+V,\infty}} \cdot t_{ovh}} = 0,05$$

$$-\frac{j_{1..k}^{m_{I+V}} - j_{k+1..n}^{m_{I+V}}}{W_{I+V,\infty}} \cdot t_{ovh} = \ln(0,05) = 3$$

$$t_{ovh} = 3 \cdot \frac{W_{I+V,\infty}}{j_{k+1..n}^{m_{I+V}} - j_{1..k}^{m_{I+V}}} \quad \text{überhygroskopische Einstellzeit} \quad (103)$$

7.5 Berechnung der Kondensatmenge nach vorgegebener Zeit

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 überhygroskopisch durchfeuchtet sind, wird die Konstruktion zunächst hygroskopisch aufgesättigt. Die dafür benötigte Zeit lässt sich mit Gleichung (102) berechnen. In der verbleibenden Zeit $t = t_T - t_{hyg}$ wird die Konstruktion im Kondensationsbereich nach und nach überhygroskopisch durchfeuchtet. Die Gleichungen in Abschnitt 7.1 und 7.2 liefern die nach Ablauf dieser Zeit zu erwartende Kondensatmenge. Auf diese Art und Weise kann analog zum Glaserschema ein bauphysikalischer Nachweis der Konstruktion erbracht werden.

Wie in den vorangehenden Abschnitten gezeigt wurde, liefert die Berechnung unter Berücksichtigung des kapillaren Flüssigwassertransports eine im Vergleich zur Berechnung nach dem Glaserschema kleinere Kondensatmenge. Damit würde es mitunter möglich sein, die Anwendbarkeit einer Konstruktion nachzuweisen, auch wenn diese bei einer vergleichweisen Berechnung nach dem Glaserschema als nicht zulässig einzustufen wäre.

8 Trocknungsprozesse beim sommerlichen Sprungklima

Die in der Kondensationsperiode mit innerem Kondensat angereicherte Konstruktion trocknet in der Trocknungsperiode nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten aus. Dabei stellt sich ein Dampfdruckgefälle und damit ein Dampfstrom vom Kondensationsbereich zu beiden Wandseiten ein. Ebenso gibt es einen Feuchtegradienten und daraus resultierend einen vom Kondensationsbereich wegführenden Flüssigwasserstrom.

Die Bilanzgleichung für den Trocknungszeitraum lautet somit

$$\frac{d}{dt}(W_{l+v}) = j_i^{m_{l+v}} + j_e^{m_{l+v}} \quad (104)$$

8.1 Trocknungsvorgang bei einer Kondensatebene

Setzt man wie in Abschnitt 7.1 die Feuchteströme und Kondensatmassen ein, so erhält man die Differentialgleichung für den Trocknungsvorgang bei einer Kondensatebene:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{2}{3} \rho_w \frac{\Delta\theta_{ovh,k}(t)^2}{\Delta\theta_{e,k,\infty}} \left(d_{ovh,k,\infty} + \frac{d_{ovh,k+1,\infty}}{G_k} \right) \right] \\ = \frac{p_{sat,k,e} - p_i}{r_{v,1..k}} + \frac{p_{sat,k,e} - p_e}{r_{v,k+1..n}} + \left(\frac{1}{r_{l+v,i}} + \frac{1}{r_{l+v,e} \cdot G_k^2} \right) \frac{\Delta\theta_{ovh,k}(t)^2}{2} \end{aligned}$$

Dabei sind die Dampfdrücke entsprechend dem anliegenden Sommerklima und dem daraus resultierenden Temperaturprofil zu berechnen. Folgende Abkürzungen sollen zur Vereinfachung eingeführt werden:

$$\begin{aligned} j_s^{m_v} &= \frac{p_{sat,k,e} - p_i}{r_{v,1..k}} + \frac{p_{sat,k,e} - p_e}{r_{v,k+1..n}} && \text{Gesamtdampfstromdichte} \\ j_s^{m_l} &= \left(\frac{1}{r_{l+v,i}} + \frac{1}{r_{l+v,e} \cdot G_k^2} \right) \Delta\theta_{ovh,k}(t_T)^2 && \text{Gesamtflüssigwasserstromdichte} \end{aligned}$$

Diese Gleichungen beschreiben die Feuchtestromdichten zu Beginn der Trocknungsperiode. Die Kondensatmenge $W_{l+v}(t_T)$ am Ende der Kondensationsperiode kann mit der Gleichung (93) berechnet werden. Mit diesen Abkürzungen lautet die Differentialgleichung für die sommerliche Trocknung

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{W_{l+v}(t_T)}{\Delta\theta_{ovh,k}(t_T)^2} \Delta\theta_{ovh,k}(t)^2 \right] = j_s^{m_v} + j_s^{m_l} \cdot \frac{\Delta\theta_{ovh,k}(t)^2}{\Delta\theta_{ovh,k}(t_T)^2}$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung, d.h. die zeitliche Abnahme der Durchfeuchtungshöhe $\Delta\theta_{ovh,k}$, ergibt sich zu

$$\Delta\theta_{\text{ovh},k,v}(t) = \Delta\theta_{\text{ovh},k}(t_T) \sqrt{\left(\frac{j_s^{m_v}}{j_s^{m_1}} + 1\right) e^{-\frac{j_{1,k}^{m_{1+v}} - j_{k+1,n}^{m_{1+v}}}{W_{1+v,\infty}} \cdot t} - \frac{j_s^{m_v}}{j_s^{m_1}}} \quad (105)$$

Die Abnahme der Kondensatmenge beginnend mit dem winterlichen Endwert $W_{1+v}(t_T)$ kann auf gleiche Weise formuliert werden:

$$W_{1+v,v}(t) = W_{1+v}(t_T) \left[\left(\frac{j_s^{m_v}}{j_s^{m_1}} + 1\right) e^{-\frac{j_{1,k}^{m_{1+v}} - j_{k+1,n}^{m_{1+v}}}{W_{1+v,\infty}} \cdot t} - \frac{j_s^{m_v}}{j_s^{m_1}} \right] \quad (106)$$

Vernachlässigt man die kapillare Trocknung, so ergibt sich eine lineare Abnahme der Kondensatmenge mit der Zeit¹¹:

$$W_{1+v,v}(t) = W_{1+v}(t_T) [1 - (j_{1,k}^{m_{1+v}} + j_{k+1,n}^{m_{1+v}}) \cdot t] \quad (107)$$

Der die Austrocknung beschleunigende Effekt der kapillaren Trocknung 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 Austrocknungszeit.

Die Austrocknungszeit hängt dabei direkt vom Anfangsfeuchtegehalt bzw. der Kondensatmenge zu Beginn der Trocknungsperiode ab:

$$t_{\text{ev}} = \frac{W_{1+v}(t_T)}{j_{1,k}^{m_{1+v}} + j_{k+1,n}^{m_{1+v}}} \quad (108)$$

Diese Kondensatmenge ist jedoch bei einer Rechnung nach dem Glaserschema deutlich größer als bei einer Berechnung nach dem im Kapitel 6 beschriebenen Verfahren. Damit ist auch die Trocknungszeit, ungeachtet der verwendeten Trocknungs-Gleichung, beim Verfahren nach Glaser stets größer.

8.2 Trocknungsvorgang bei mehreren benachbarten Kondensatebenen

Die Überlegungen zum Einfluss der kapillaren Trocknung sind auch beim Austrocknen von ganzen Kondensationsbereichen gültig. Vereinfachend kann deshalb für die zeitliche Abnahme der Kondensatmenge in und zwischen den Schichten k_1 und k_2 geschrieben werden

11. Diese entspricht der Trocknung nach Glaser.

$$W_{I+v, v}(t) = W_{I+v}(t_T) [1 - (j_{1..k_1}^{m_{I+v}} + j_{k_2..n}^{m_{I+v}}) \cdot t] \quad (109)$$

Daraus abgeleitet ergibt sich die Trocknungszeit

$$t_{ev} = \frac{W_{I+v}(t_T)}{j_{1..k_1}^{m_{I+v}} + j_{k_2..n}^{m_{I+v}}} \quad (110)$$

Auch für den Fall mehrerer, benachbarter Kondensatebenen gilt, dass die im Vergleich zu einer Berechnung nach Glaser kleinere Kondensatmenge zu einer reduzierten Trocknungszeit führt.

8.3 Die Trocknung als Nachweiskriterium

Als maßgebendes Kriterium für die Anwendbarkeit einer Konstruktion wird in der DIN bzw. den europäischen Regularien die Forderung gestellt, dass die in der Kondensationsperiode entstandene Kondensatmenge vollständig in der Trocknungsperiode austrocknen kann. Dieser Nachweis kann auf verschiedene Art und Weise erbracht werden. Berechnet man die Zeit, die bis zum vollständigen Austrocknen der Konstruktion benötigt wird (siehe vorangehende Abschnitte), so kann diese direkt mit der festgesetzten Dauer der Trocknungsperiode verglichen werden.

Wie in den vorangehenden Abschnitten erläutert wurde, ist die Trocknungszeit nach dem hier vorgestellten Verfahren kleiner als die Zeit, die das Verfahren nach Glaser liefern würde. Damit würde es auch bei den Kriterien der Trocknung möglich sein, einen nach Glaser nicht erfüllten Nachweis dennoch zu führen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren bietet demnach wesentliche Vorteile gegenüber dem Glaserschema, die allerdings auf Kosten eines erhöhten Rechenaufwandes gehen. Deswegen ist es sinnvoll, das abgeleitete Verfahren als Berechnungsalgorithmus in ein Programm zu implementieren, um damit die Anwendung des Verfahrens zu erleichtern.

9 Algorithmierung und Implementierung des Verfahrens

Das in dieser Arbeit vorgestellte, analytische Verfahren zur Berechnung des Dampfdruck- und Feuchteprofils sollte, um sinnvoll angewendet zu werden, in einen eingängigen und möglichst linearen Algorithmus gefaßt werden. Zugleich war es Ziel, diesen Algorithmus in einem komfortablen Computerprogramm zu implementieren, so dass dieses Berechnungsverfahren in der Entwurfspraxis Verwendung finden kann.

9.1 Umsetzung der theoretischen Grundlagen in ein Berechnungsschema

9.1.1 Eingangsgrößen

Im folgenden sollen die Eingangsgrößen für den Algorithmus beschrieben werden. Unter bestimmten Bedingungen werden nicht alle Eingangsgrößen benötigt. Da diese Bedingungen jedoch im Allgemeinen vor der Berechnung nicht bekannt sind, soll die Forderung nach vollständiger Angabe aller Eingangsgrößen bestehen. Die Eingangsgrößen können unterteilt werden in Konstruktionsdaten (siehe Tabelle 2), Materialdaten (siehe Tabelle 3) und Klimadaten (siehe Tabelle 4).

| Beschreibung der Eingabegrößen | Datentyp |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Anzahl der Schichten | Integer |
| Dicke der Schichten | Integerfeld |
| Materialdaten für jede Schicht | Feld mit Materialstrukturen |

Tabelle 2: Konstruktionseingabedaten

| Materialparameter | Datentyp | Einheit |
|---|----------|---|
| Wärmeleitwiderstandszahl λ | Realzahl | W/mK |
| Dampfdiffusionswiderstandszahl μ | Realzahl | - |
| maximale hygroskopische Feuchte θ_{hyg} | Realzahl | m^3/m^3 |
| Sättigungsfeuchte θ_{sat} | Realzahl | m^3/m^3 |
| Wasseraufnahmekoeffizient A_w | Realzahl | $\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{s}})$ |

Tabelle 3: Materialdaten

| Klimadaten | Datentyp | Einheit |
|---|----------|---------|
| innenseitige Temperatur | Realzahl | °C |
| innenseitige relative Luftfeuchte | Realzahl | % |
| außenseitige Temperatur | Realzahl | °C |
| außenseitige relative Luftfeuchte | Realzahl | % |
| Dauer der Kondensationsperiode (Winter) | Realzahl | d |
| Dauer der Trocknungsperiode (Sommer) | Realzahl | d |

Tabelle 4: Klimaeingabedaten

9.1.2 Das Berechnungsschema

In einer ähnlichen Reihenfolge, wie die Ableitung der Formeln in den Abschnitten 4-7 erfolgt ist, müssen im Berechnungsschema die einzelnen Berechnungsschritte durchgeführt werden (siehe Abbildung 16). Dabei sind die folgenden Schritte für jede Konstruktion zu bearbeiten:

1. Wärmewiderstände für alle Schichten berechnen
2. Temperaturprofil (mit Klimabedingungen der Kondensationsperiode) berechnen
3. Sättigungsdampfdrücke an allen Schichtgrenzen berechnen
4. Dampfdiffusionswiderstände für alle Schichten berechnen
5. Ideelles Dampfdruckprofil berechnen

Die notwendigen Formeln für diese Schritte sind in den vorangehenden Abschnitten gegeben. An dieser Stelle könnten nun einige Kriterien für den vorzeitigen Abbruch der Berechnung erfüllt sein:

1. Der Dampfdruck an der innenseitigen Grenzschicht könnte größer als der Sättigungsdampfdruck an dieser Schicht sein. Es würde Oberflächenkondensat entstehen und die Konstruktion müßte als kritisch eingestuft werden.
2. Ebenso könnte diese Bedingung an der außenseitigen Grenzschicht erfüllt sein und damit Oberflächenkondensat an dieser Seite entstehen. Da die Eingabedaten für die Klimabedingungen keinen Einschränkungen unterliegen, ist diese Möglichkeit nicht auszuschließen und muss ebenso geprüft werden.
3. Der berechnete Dampfdruck erreicht und übersteigt an keiner Stelle in der Konstruktion den Sättigungsdampfdruck. Dadurch wäre gewährleistet, dass in der Kondensationsperiode kein Kondensat auftritt. Die Konstruktion wäre demnach als unkritisch einzustufen.

Sollte keine dieser Bedingungen erfüllt sein, wird zunächst die Schichtgrenze bestimmt, an der die Differenz zwischen Sättigungsdampfdruck und ideellem Partialdruck am größten ist. An dieser Schichtgrenze wird sich zuerst Kondensat bilden¹².

12. Dies ist eine Annahme, welche unter den getroffenen Voraussetzungen für dieses Berechnungsverfahren gültig ist, jedoch von der Realität abweichen kann. Bei Ausbildung zweier räumlich getrennter Kondensationsbereiche wäre die Ausbildung eines anderen Gleichgewichts möglich.

Zunächst wird nun die Annahme getroffen, dass lediglich die beiden angrenzenden Schichten überhygroskopisch durchfeuchtet sind. Somit kann nun der Feuchtegehalt im stationären Zustand nach dem Verfahren in Abschnitt 6.7 berechnet werden.

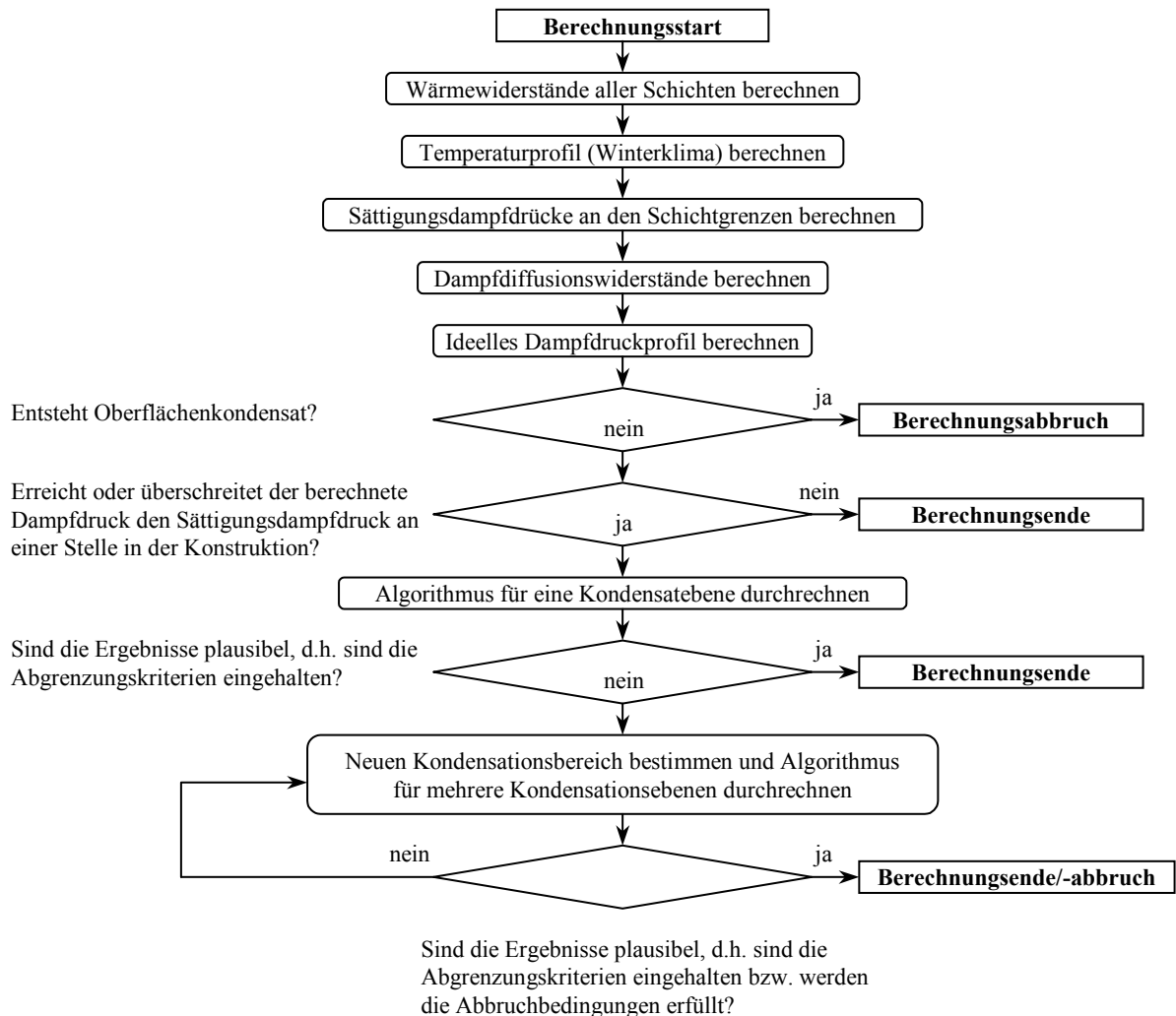


Abbildung 16 Ablaufdiagramm für den Hauptalgorithmus

9.1.3 Unteralgorithmus für eine Kondensatebene

Dieser Algorithmus (siehe Abbildung 17) berechnet das Feuchtefeld bei einer Kondensatebene zwischen zwei teilweise überhygroskopisch durchfeuchteten Schichten. Der Berechnungsablauf ist linear und kann ohne Verzweigungen durchlaufen werden. Die Formeln für die einzelnen Berechnungsschritte sind den vorangehenden Abschnitten zu entnehmen.

Nach dem Durchlaufen des Algorithmus sind die Ergebnisse dahingehen zu überprüfen, ob die Annahme, dass nur zwei Schichten überhygroskopisch durchfeuchtet werden, korrekt war. Dafür sind folgende Kriterien zu prüfen:

1. Sind die berechneten Durchfeuchtungsbreiten am Ende der Kondensationsperiode grö-

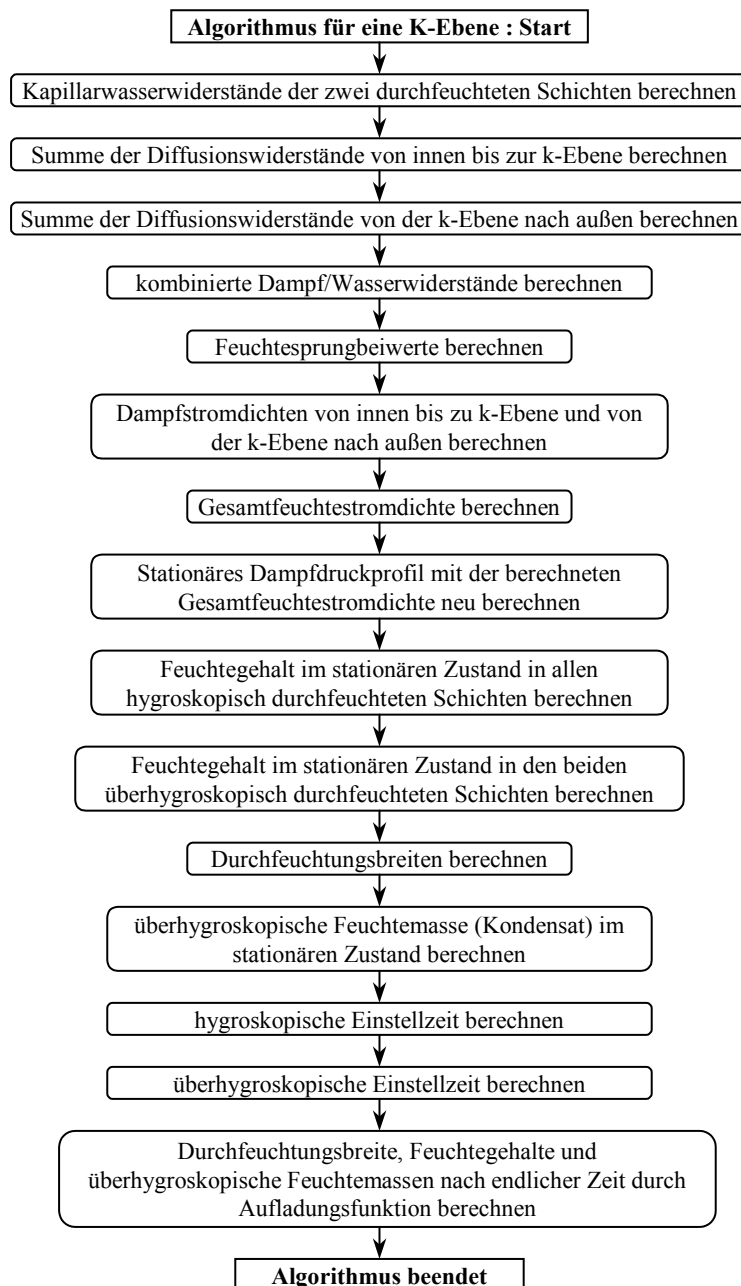


Abbildung 17 Ablaufdiagramm Unteralgorithmus für eine Kondensationsebene

ber als die jeweiligen Schichtbreiten, so läuft das Kondensat in eine benachbarte Schicht und die Berechnung muss für einen erweiterten Kondensationsbereich (alternativer Algorithmus) erneut durchgeführt werden.

2. Überschreitet der berechnete Feuchtegehalt die Sättigungsfeuchte in den Schichten (es kommt also bereits nach endlicher Zeit zu einer theoretischen Übersättigung), so ist die Berechnung mit einem entsprechenden Algorithmus¹³ zu wiederholen.

13. Der Algorithmus müsste eine teilweise Sättigung der Schicht berücksichtigen. Dieser Fall tritt verhältnismäßig selten auf und soll nicht Bestandteil dieser Arbeit sein.

Für den Fall, dass beide Neurechnungs-Kriterien nicht erfüllt werden, kann davon ausgegangen werden, dass die berechnete Lösung nach dem ersten Algorithmus zutreffend ist. Andernfalls ist der allgemeine Algorithmus für mehrere Kondensatebenen zu verwenden.

9.1.4 Unteralgorithmus für mehrere Kondensatebenen und dazwischenliegende, vollständig überhygroskopisch durchfeuchtete Schichten

Die Berechnung der Feuchtestromdichten erfolgt analog zum vorherigen Algorithmus, es wird lediglich die allgemeine Formel für die Berechnung der Gesamtfeuchtestromdichte verwendet. Ebenso sind entsprechend andere Feuchtesprungwerte zu berechnen, die in diese Gleichung eingehen. Mit Kenntnis der Gesamtfeuchtestromdichte lassen sich nun die Feuchtefelder im stationären Zustand berechnen.

Die Rückrechnung auf den Zustand nach einer endlichen Zeit, erfolgt durch die im Abschnitt 7.2 abgeleiteten Formeln.

Schließlich ist wieder zu prüfen, ob die Berechnungsergebnisse die Voraussetzungen für die Anwendung des Berechnungsschemas erfüllen. Dabei sind die Abgrenzungskriterien die gleichen wie im vorangehenden Algorithmus: die berechnete Durchfeuchtungsbreite muss kleiner als die Schichtbreite sein und es darf nirgendwo die Sättigungsfeuchte erreicht werden.

Sollte der Kondensationsbereich erneut die Schichtgrenze überschreiten, so ist der überhygroskopische Bereich entsprechend zu vergrößern und der Algorithmus für diesen Bereich erneut zu durchlaufen.

Als Abbruchkriterium gilt neben dem Erreichen der Sättigungsfeuchte auch das „Herauslaufen des Kondensats aus der Konstruktion“. Infolge der getroffenen Vereinfachungen kann es bei bestimmten Kombinationen von Schichtaufbau und Klimabedingungen dazu kommen, dass eine am Rand liegenden Schicht vollständig überhygroskopisch durchfeuchtet wird. Dieses Ergebnis ist auf die Vereinfachungen¹⁴ in der Theorie zurückzuführen und entspricht nicht der Realität. Durch Modellierung einer dünnen Luftschicht vor der Randschicht mit nicht vorhandener kapillarer Leitfähigkeit lässt sich das Ergebnis verbessern. Man sollte sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die getroffenen Annahmen und Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens nicht mehr zutreffend sein können und damit das Ergebnis unbrauchbar wird.

Sind die Bedingungen für die Anwendung des Algorithmus eingehalten, ist die Berechnung der Feuchtefelder und Kondensatmenge beendet.

9.1.5 Berechnung der Trocknungsdauer

Nun kann die Dauer bis zum Austrocknen der Konstruktion in der Trocknungsperiode berechnet werden. Dabei wird vereinfachend die kapillare Leitung vernachlässigt¹⁵ und das Verfahren

14. Z.B. Vernachlässigung der Verdunstungsenthalpie und daraus resultierender ungenauen Beschreibung der Verdunstungsfront in Randnähe.

nach Glaser angewendet. Durch die im Vergleich zum Glaserverfahren reduzierte Kondensatmenge, ist auch die Austrocknungszeit geringer.

9.1.6 Berechnung von Vergleichswerten nach DIN 4108

Zu Vergleichszwecken können Ergebnisse einer Berechnung nach DIN 4108 herangezogen werden. Der in der DIN beschriebene Algorithmus basiert auf einer grafischen Lösung, daher soll hier noch einmal der für eine Implementierung in einem Programm zu verwendende Algorithmus dargestellt werden.

1. Die ersten 5 Schritte in Abschnitt 9.1.2 sind abzuarbeiten.
2. Die Abbruchbedingungen aus dem selben Abschnitt sind zu prüfen (die oben angeführten Kriterien haben auch beim Glaserschema Gültigkeit).
3. Die am weitesten innen liegende Schichtgrenze muss ermittelt werden, an der der Sättigungsdruck kleiner als der berechnete ideale Partialdruck ist.
4. Entsprechend muss auch die am weitesten außen liegende Schichtgrenze ermittelt werden, bei der der Partialdruck größer als der Sättigungsdruck ist.
5. Die Dampfstromdichten bis zum Beginn und Ende des Kondensationsbereiches müssen berechnet werden.
6. Die Differenz der Dampfstromdichten multipliziert mit der Dauer der Kondensationsperiode ergibt dann die Kondensatmenge.
7. Analog ist die austrocknende Feuchtemasse in der Trocknungsperiode zu berechnen.

Es ist jedoch zu beachten, dass nur dann die Berechnungsergebnisse der beiden Verfahren sinnvoll verglichen werden können, wenn alle relevanten Eingabegrößen übereinstimmen.

9.2 Programmentwurf

Bevor das eigentliche Programm geschrieben werden konnte, musste zunächst ein Programmentwurf erstellt werden. Dabei mussten im Wesentlichen folgenden Fragen geklärt werden:

1. Welche Anforderungen werden allgemein und speziell an das Programm gerichtet?
2. Welches Berechnungskonzept liegt dem Programm zugrunde?
3. Wie soll die Benutzerführung erfolgen?
4. Welche Datenstruktur ist geeignet?

Die Klärung dieser Fragen führte dann zum ersten Programmkonzept, welches dann während der Umsetzung optimiert und entsprechend der Möglichkeiten ausgebaut wurde. Im Folgenden sollen die Überlegungen dargelegt werden, die zu der Erstellung des Programmes COND in dieser Art geführt haben.

-
15. Durch den schnell abnehmenden Feuchtegehalt sinkt auch der Anteil der kapillaren Leitung und der Einfluss auf den Austrocknungsprozess ist insgesamt klein.

9.2.1 Allgemeine und spezielle Anforderungen an das Programm

Folgende Anforderungen wurden im Speziellen an das Programm gestellt:

COND soll ein interaktives Berechnungsprogramm sein. Das Ziel soll es sein, schnell und einfach verschiedene Kombinationen von Materialkennwerten testen zu können und wenn möglich sofort bei Änderung eines Wertes das Ergebnis zu erhalten. Jede Änderung der Eingaben soll also eine Neuberechnung und Neudarstellung der Berechnungsergebnisse bewirken. Die Eingabemaske und Ausgabe der Berechnungsdaten müssen also gleichzeitig dargestellt werden. Der Zugriff auf Materialkennwerte und den Konstruktionsaufbau soll direkt und einfach möglich sein. Die Ausgabe sollte wenn möglich in eine grafische Diagramm-Ausgabe und eine Tabelle mit den jeweilig ablesbaren Zahlenwerten unterteilt sein.

Es soll möglich sein, mit dem Programm Nachweise zu führen. Es muss also ein übersichtlicher Ausdruck der Eingabewerte und Ausgabewerte möglich sein.

Das Programm soll Zugriff auf die Materialdatenbank des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden erhalten. Die für die Berechnung notwendigen Materialkennwerte müssen dieser Materialdatenbank entnommen werden können.

Da das Programm nicht nur zu Forschungszwecken, sondern auch zur Lehre bzw. im Ingenieurbereich eingesetzt werden soll, werden weiterhin allgemeine Forderungen an die Umsetzung gestellt:

- Das Programm soll zeitgemäß unter effizienter Nutzung der Windows-Oberfläche umgesetzt werden.
- Es soll hohes Augenmerk auf Benutzerfreundlichkeit und intuitive Anwendung des Programmes gelegt werden.
- Die in professioneller Software üblichen Anwendungsdetails¹⁶ sollen wenn möglich implementiert werden.
- Es soll eine einfache Installation von CD-ROM möglich sein.

Die Präzisierung dieser Aufgaben führte dann zum entgeltigen Entwurf. Im Besonderen die Forderung nach der Interaktion mit dem Benutzer, d.h. die Verknüpfung von Änderungen an den Eingabedaten und der Aktualisierung der Berechnungsergebnisse war ein Hauptkriterium für den Entwurf des Berechnungskonzeptes.

9.2.2 Das Berechnungskonzept des COND-Programmes

Bei der numerischen Umsetzung wissenschaftlicher Algorithmen werden im Wesentlichen zwei Wege beschritten.

16. Dazu gehören z.B. eine „kürzlich geöffnete Dateien“-Liste, Druckoptionen und die insbesondere für die Phase der Einarbeitung in das Programm wichtige „Rückgängig“-Funktion

Zum einen wird ein linearer Programmablauf¹⁷, beginnend mit der Eingabe aller zur Berechnung notwendigen Daten, angestrebt. Die Eingabegrößen werden in einer Datenstruktur gespeichert und an den Berechnungsalgorithmus übergeben. Die vom Berechnungsalgorithmus erzeugten Daten werden erneut in einer Datenstruktur gespeichert und an das Ausgabe/Interpretationsmodul oder alternativ an einen weiteren Berechnungsalgorithmus weitergegeben. Die Ausgabe bzw. Darstellung der Ergebnisse in geeigneter Form stellt dann das Ende der Berechnungskette dar. Der lineare Programmablauf ist im Besonderen für linear ablaufende Berechnungsalgorithmen geeignet, bei dem vor der Berechnung feststeht, welche Daten während der Berechnung benötigt werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der selbstständigen Berechnung, Benutzereingaben sind lediglich in der Eingabephase und Ausgabe/Darstellungsphase notwendig.

Als Alternative dazu kann eine vom Berechnungsalgorithmus kontrollierte Interaktion mit dem Benutzer implementiert werden. Dabei fordert der Berechnungsalgorithmus den Benutzer auf, Eingabedaten zu gegebener Zeit zu liefern. Dabei kann jeweils ein Teil der Berechnung erfolgen, bevor die Notwendigkeit zur Eingabe weiterer Daten erfolgt. Der Vorteil dieser Implementierung besteht darin, flexibel auf Verzweigungssituationen zu reagieren. Zum Beispiel könnte der Algorithmus ab einer bestimmten Stelle zwei Möglichkeiten haben, die Berechnung fortzusetzen und der Benutzer muss nun entscheiden, welcher Weg gewählt werden soll. Diese Implementation wäre bei längerfristigen Berechnungen schlecht anwendbar, da entweder der Benutzer untätig wird, während auf eine Eingabeforderung gewartet wird, oder der Berechnungsalgorithmus pausieren muss.

Da es sich beim COND-Algorithmus im Wesentlichen um einen linearen Algorithmus ohne Verzweigungen handelt, bietet sich die erste Implementierung an. Dabei sollte der Berechnungsalgorithmus so effizient arbeiten, dass die Aktualisierung der Ergebnisse nur unwesentliche Rechenzeiten mit sich bringt. Eine Möglichkeit der Optimierung bestünde darin, nur die durch die Änderung einzelner Eingabegrößen veränderten Zwischenergebnisse und Ergebnisse neu zu berechnen. Damit ist jedoch ein erhöhter Verwaltungsaufwand verbunden der außerdem eine sinnvolle Kapselung der Berechnung in verschiedene lineare Algorithmen unmöglich macht.

Der folgende generelle Programmablauf, basierend auf der ersten Implementationsvariante, erfüllt am geeignetsten die Anforderungen:

1. Warten auf Interaktion des Benutzers
2. Falls Änderung der Eingabedaten erfolgte, Berechnung komplett neu durchführen
3. Alle aktivierten Ansichten aktualisieren und wieder auf Interaktion warten (weiter bei 1.)

Der 2. Schritt, die Berechnung, kann demnach vollständig losgelöst vom Rest des Programmes stehen und in Form eines internen Solvers realisiert werden. Daher kann eine klassische Teilung des Programmes in interaktive Benutzerführung und eigentlichem Berechnungsteil erfolgen.

17. Lineare Berechnungsstrukturen finden sich üblicherweise in klassischen Solvern, die Eingabedaten lesen, die Berechnung durchführen und die Ergebnisse wieder in Dateien schreiben

9.2.3 Entwurf der Benutzerführung

Prinzipiell gibt es für die Gestaltung der Oberfläche für die Eingabedaten verschiedene Umsetzungsmöglichkeiten. Die drei gebräuchlichsten sollen hier kurz vorgestellt werden:

1. Die Eingabe erfolgt tabellarisch. Es gibt eine Tabelle für die Schichten der Konstruktion. Dabei gibt es für jede Schicht eine Zeile, in der die Kennwerte einzutragen sind. Für die Klimabedingungen gibt es eine weitere Tabelle.
2. Die Eingabe erfolgt in Dialogen, welche auf einer Objekthierarchie basieren. Für jede Schicht kann eine Eingabemaske als Dialog aufgerufen werden. Dort kann Schichtdicke und Materialzuordnung eingetragen werden. Die Materialkennwerte können in einem weiteren Dialog geändert werden. Die Klimadaten werden ebenso in verschachtelten Dialogen angezeigt. Weiterhin gibt es einen Dialog für die Eingabe einer Randbedingung. In diesem Dialog kann ein Klimadatendialog jeweils für das Winter- und Sommerklima aufgerufen werden.
3. Alle Daten werden in einem Formular/Dialog eingegeben. Entsprechend dem Typ der Daten, die einzugeben sind, werden die Elemente des Formulars dynamisch verändert. Die Auswahl der Eingabedaten (d.h. welche Schicht zu bearbeiten ist oder welche Klimadaten bearbeitet werden sollen) erfolgt über eine Übersichtsskizze.

Alle Umsetzungsmöglichkeiten haben je nach Einsatzgebiet Vor- und Nachteile. Da ein Hauptziel des Programmes sein sollte, möglichst schnell und direkt auf alle Eingabewerte für die Berechnung zugreifen zu können, können die Varianten unter diesem Gesichtspunkt gewichtet und ausgewählt werden.

Die erste Variante ist die „klassische“ Eingabevariante in numerischen Berechnungsprogrammen. Sie lässt sich leicht umsetzen und bietet direkten Zugriff auf alle Daten. Nachteilig ist die mangelnde Übersicht und Visualisierung der Eingabewerte. Eingabewerte in einer Tabelle sind zumeist auf festgelegte Einheiten beschränkt. Bei niedrigen Bildschirmauflösungen können die Eingabedaten einer Zeile nicht vollständig dargestellt werden; horizontales Scrollen wird notwendig (damit Verminderung der Übersicht). Einfügen und Entfernen von Schichten ist in einer Tabellenstruktur schwierig und ohne größeren Aufwand nicht in einer Art umsetzbar, so dass intuitive Bedienung möglich wird. Dennoch ist diese Variante als Umsetzung für das COND-Programm geeignet.

Die zweite Variante widerspricht klar dem Konzept des direkten Zugriffs auf die Daten. Obwohl dialogbasierte Systeme den Vorteil haben, dass einzelne Dialoge in unterschiedlichen Zusammenhängen Verwendung finden können¹⁸, ist die Anzahl der Benutzeraktionen bis zur Beendigung der gewünschten Änderung wesentlich größer als bei Variante 1 und 3.

Die letzte Variante kombiniert zum Teil die 1. und 2. Variante. Zum einen bleibt die gesamte Eingabe in einem Formular, ohne dass andere Dialoge geöffnet werden müssen. Und zum an-

18. Der Materialparameterdialog könnte bei der Schichteingabe sowie bei Bearbeitung der Materialliste verwendet werden.

deren wird ein Datensatz (z.B. der einer Schicht) komplett angezeigt. Es können zwar nicht alle Schichtdaten gleichzeitig bearbeitet werden (wie bei Variante 1), das Umschalten zwischen Schichtdaten geht jedoch genauso schnell (ein Mausklick). Zudem bietet die Anordnung in einem dynamischen Formular die Möglichkeit, eine Übersichtsskizze mit Funktionalität zu verbinden¹⁹. Die Aktionen zur Änderung eines Parameters wären somit beschränkt auf die Auswahl einer Schicht (wie bei den anderen beiden Varianten auch) und dem Editieren des jeweiligen Eingabefeldes. Außerdem ist bei dieser Benutzerführung eine eingängige und anschauliche Umsetzung der Konstruktionserstellung möglich.

Die Variante 3 ist also die Vorzugsvariante für das Programm und wurde entsprechend umgesetzt (siehe Abschnitt 10.1.3).

9.2.4 Konzept der Datenstruktur

In Abschnitt 9.1.1 wurden die benötigten Eingabedaten bereits dargestellt. Erweitert man diese um die Ergebnisse, erhält man die im Programm zu verwaltende Datenmenge. Generell gibt es für die Ablage dieser Daten zwei Konzepte: Listen- oder feldbasierte Ablage der Daten und objektorientierte Datenkapselung. Im ersteren Fall würden jeweils gleiche physikalische Größen in Feldern gespeichert werden, also z.B. alle Schichtdicken in einem Feld, alle Wärmeleitfähigkeiten in einem Feld etc. Dieses hätte Vorteile bei der Berechnung, würde jedoch im Vergleich zu objektorientierten Datenstrukturen einen erhöhten Programmieraufwand bedeuten. In einer objektorientierten Datenstruktur werden einzelne Daten ihrer Zusammengehörigkeit nach gruppiert. So würden z.B. die Kennwerte eines Materials in einem Objekt zusammengefaßt werden, um dann zusammen mit der Schichtdicke eine Schicht zu beschreiben. Diese Gruppierung erlaubt eine logische und übersichtliche²⁰ Beschreibung der Daten, bei der jedes Objekt einen neuen benutzerdefinierten Datentyp darstellt. In Abbildung 18 ist das Konzept für die Datenstruktur eines COND-Projektes dargestellt.

9.3 Realisierung und Umsetzung des Programmes

9.3.1 Grundlegender Programmablauf

Durch die Verwendung einer ereignisgesteuerten Oberfläche besteht der Programmablauf nach der Initialisierungsphase aus einem einfachen Interaktionsprinzip. Bei jeder Aktion des Benutzers, welche eine Änderung der Eingabedaten zur Folge hat, wird der Berechnungsalgorithmus durchlaufen und die Ergebnisse werden aktualisiert.

Die Umsetzung des Programmes setzte sich somit aus der Lösung folgender Teilprobleme zusammen:

19. Vergleiche dazu die Benutzerführung im numerischen Simulationsprogramm „Delphin“.

20. Übersichtlichkeit spielt vor allem bei zukünftiger Wartung und Erweiterung des Programmes eine entscheidende Rolle.

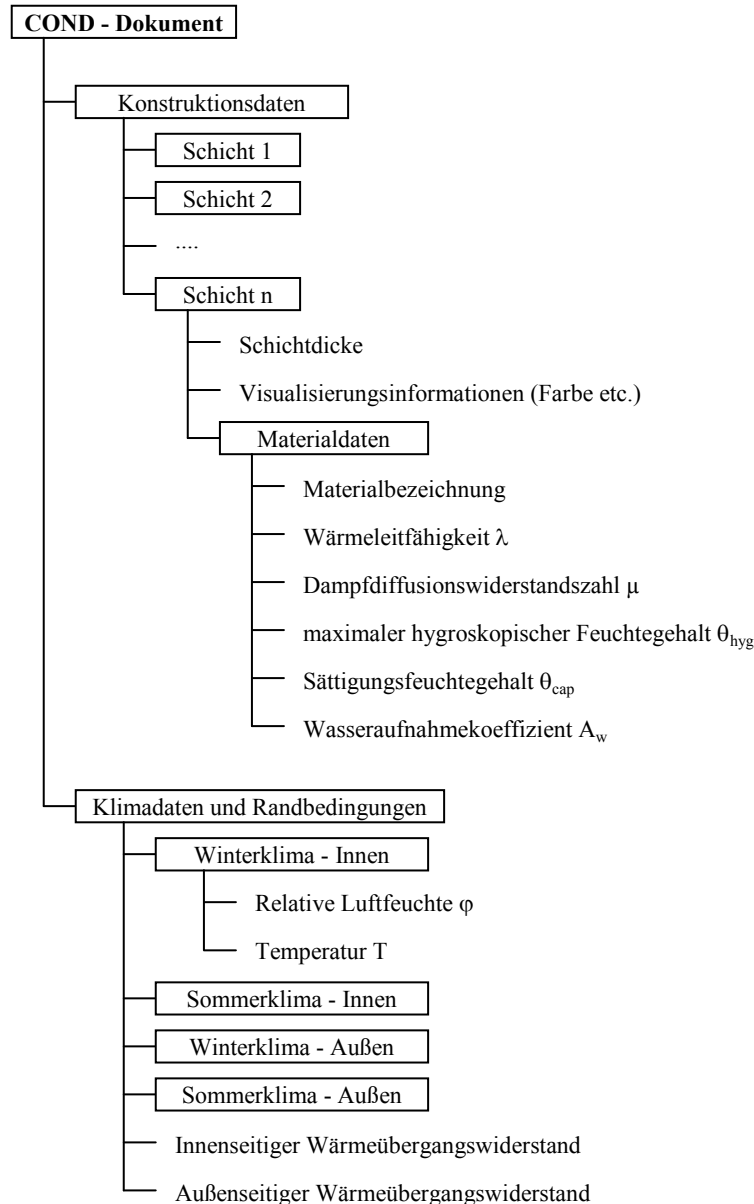


Abbildung 18 Datenstruktur eines COND-Projektes

1. Entwurf und Erstellung der Oberfläche (Anordnen der visuellen Komponenten, Definition von Objekteigenschaften etc.)
2. Entwurf und Erstellung der nicht-standardisierten Dialoge
3. Implementierung der Ereignisbehandlungsroutinen (für Schaltflächen, Menübefehle, Größenänderungen, Selektierung von Schichten etc.)
4. Implementierung der internen Datenstruktur
5. Implementierung des Berechnungsschemas
6. Entwurf und Umsetzung des Drucklayouts (für den Report)
7. Integration in die Windowsumgebung²¹

21. Dazu gehört z.B. die Integration der Programmkonfiguration in die Windows-Registry sowie die Konfiguration eines Installationsprogrammes.

8. Testen des Programmes unter verschiedenen Windowsversionen und Vergleichen der Ergebnisse mit manuellen Rechnungen
9. Erzeugung einer Programmdokumentation (siehe nächstes Kapitel)

Wie man schon anhand dieser Aufzählung sehen kann, ist bei einer heutigen Anwendung der eigentliche Kern des Programmes, d.h. die Berechnungsroutine nur noch ein geringer Teil des Gesamtaufwandes. Damit das Programm überhaupt sinnvoll²² verwendet werden kann, muss dieser Aufwand jedoch getrieben werden. Die Anforderungen an heutige Programme sind gleichermaßen wie die rechentechnischen Möglichkeiten gewachsen.

Im Folgenden soll jedoch nicht auf alle angeführten Punkte eingegangen werden, sondern nur wichtige Implementationsdetails²³ beschrieben werden.

9.3.2 Die COND-Projektdatei

Für den Datenaustausch mit anderen Programmen ist das Format der COND-Projektdatei entscheidend. Die Projektdaten werden als Textdateien gespeichert, wobei ein simplifiziertes, objektorientiertes Datenformat verwendet wird (siehe Abbildung 19). Die Struktur ist dabei an die interne Projektdatenstruktur angelehnt und sollte anhand des Beispiels selbsterklärend sein. Voraussetzung für die Generierung eigener COND-Projektdateien ist die Verwendung von vier Klimadefinitionen. Die Konstruktion wird von links nach rechts definiert (d.h. so, wie sie im Programm dargestellt wird). Die Anzahl der Schichten ergibt sich beim Einlesen aus der Anzahl der LAYER_DEFINITION-Blöcke.

9.3.3 Implementierung der Datenstrukturen für Eingabe und Berechnungsergebnisse

Intern werden die Eingabedaten und Berechnungsergebnisse strikt getrennt. Die Eingabedaten werden in der Klasse CondDocument verwaltet. Die Klasse CondResult, die alle Berechnungsergebnisse aufnimmt, kapselt gleichzeitig auch die Berechnungsfunktionen. Für die Interaktion mit den übrigen Programmteilen ist dabei folgende Funktionalität implementiert.

1. Ändert der Benutzer den Inhalt einer visuellen Komponente, wird diese Änderung nach Überprüfung auf Gültigkeit in die interne Eingabedatenstruktur übertragen.
2. Die CondDocument-Klasse signalisiert den zugeordneten Ansichten (in erster Linie dem Hauptformular), dass eine Änderung der Daten von irgendwoher stattgefunden hat und alle angezeigten Werte aktualisiert werden müssen.
3. In allen angezeigten Ansichten (also z.B. dem Diagramm oder der Ergebnistabelle) wird jetzt die Anzeige aktualisiert, dabei fordern alle Formulare unabhängig voneinander die CondResult-Klasse auf, die Berechnungsergebnisse zu aktualisieren²⁴.

22. Das schließt auch eine intuitive Bedienung und eine schnelle Einarbeitungszeit ein.

23. Damit sind Details gemeint, die für die Erweiterung des Programmes und Anbindung an andere Programme von Interesse sind

24. Dafür existiert eine öffentliche Funktion update(), die von allen Programmteilen her aufgerufen werden kann. Um Rechenzeit zu sparen, wird bei jeder Änderung der Dokumentdaten das Berechnungsschema nur einmal durchlaufen, unabhängig davon, wie oft eine Anfrage zum Aktualisieren gestellt wird.

```
FileVersion: 1.0

DOCUMENT {
  CLIMATE_LIST {
    CLIMATE_DEFINITION {
      Name:      Winter - Innen
      Temperatur: 20 [°C]
      RelHum:    50 [%]
    }
    CLIMATE_DEFINITION {
      Name:      Sommer - Innen
      Temperatur: 18 [°C]
      RelHum:    60 [%]
    }
    CLIMATE_DEFINITION {
      Name:      Winter - Außen
      Temperatur: -5 [°C]
      RelHum:    60 [%]
    }
    CLIMATE_DEFINITION {
      Name:      Sommer - Außen
      Temperatur: 20 [°C]
      RelHum:    70 [%]
    }
  }
}

STRUCTURE {
  LAYER_DEFINITION {
    Width:      0.05 [m]
    Colour:     16744576
    MATERIAL_DEFINITION {
      Name:      Calciumsilikatdämmung
      Lambda:    0.05 [W/mK]
      Mew:       2 [---]
      W_hyg:     0.005 [m3/m3]
      W_sat:     0.8 [m3/m3]
      A_w:       0.776 [kg/m2*s^0.5]
    }
  }
  LAYER_DEFINITION {
    Width:      0.365 [m]
    Colour:     65408
    MATERIAL_DEFINITION {
      Name:      Ziegel
      Lambda:    0.75 [W/mK]
      Mew:       7 [---]
      W_hyg:     0.01 [m3/m3]
      W_sat:     0.3 [m3/m3]
      A_w:       0.1 [kg/m2*s^0.5]
    }
  }
}

RO_Left:      0.13
RO_Right:     0.04
}
```

Abbildung 19 beispielhafte Projektdatei für COND

4. Die Aktualisierungsfunktion liest die Dokumenteingabedaten aus, prüft die Werte auf Vollständigkeit und offensichtliche Eingabefehler²⁵ und führt den Berechnungsalgorithmus aus. Die dabei berechneten Ergebnisse werden von der CondResult-Klasse öffentlich zur Verfügung gestellt und können nun von anderen Programmteilen interpretiert und dargestellt werden.

Da die Ergebnisse komplett in der CondResult-Klasse gekapselt sind, können diese auch in ihrer Gesamtheit an andere Funktionen (z.B. für den Ausdruck oder Ausgabe) übergeben werden.

9.3.4 Implementierung des Berechnungsschemas

Der Berechnungsalgorithmus, der in Abschnitt 9.1.2 beschrieben wurde, wurde abgesehen von Optimierungsdetails direkt in C++ Programmcode übertragen. Als Beispiel soll der folgende Auszug aus dem Algorithmus für eine Kondensationsebene dienen (siehe Abbildung 20).

```
// ... BEGIN Quelltextauszug

// 1. Index der K-Ebene ermitteln
int k_ebene=k_fields[0].start;
// 2. Dampfdiffusionswiderstände berechnen (sind schon berechnet)
// 3. Kapillarwasserwiderstände berechnen (sind schon berechnet)
// 4. Summe der Dampfdiffusionswiderstände von innen bis zur k-Ebene berechnen
IBK::vector<double>::iterator k_it( R_vap.begin()+ k_ebene );
double rd_i = std::accumulate<double>(R_vap.begin(), k_it, 0.0);
// 5. Summe der Dampfdiffusionswiderstände von der k-Ebene bis nach außen berechnen
double rd_e = std::accumulate<double>(k_it, R_vap.end(), 0.0);
// 6. Kombiniertes Dampf/Kapillarwiderstand für die k-te Schicht
unsigned int k = k_ebene-1;
double rf_i = R_w[k]*rd_i/R_vap[k];
// 7. Kombiniertes Dampf/Kapillarwiderstand für die k+1-te Schicht
double rf_e = R_w[k+1]*rd_e/R_vap[k+1];
// 8. Feuchtesprungbeiwert G_k für Schicht k und k+1 berechnen
double G_k = (mat[k]->w_sat - mat[k]->w_hyg) / (mat[k+1]->w_sat - mat[k+1]->w_hyg);
// 9. Dampfstromdichte von innen bis zur k-Ebene berechnen
gd_i = (pd.front()-ps[k_ebene])/rd_i;
// 10. Dampfstromdichte von der k-Ebene bis nach außen berechnen
gd_e = (ps[k_ebene]-pd.back())/rd_e;
// 11. Gesamtfeuchtestromdichte berechnen
g = (gd_i*rf_i + gd_e*rf_e*G_k*G_k) / (rf_i + rf_e*G_k*G_k);

// ... ENDE Quelltextauszug
```

Abbildung 20 Auszug aus dem Quelltext der Berechnungsroutine

9.3.5 Extrahierung des Berechnungscodes in einen Solver

Die Trennung zwischen Berechnungsalgorithmus und Oberfläche bietet zugleich die Möglichkeit, den in die Klasse CondResult gekapselten Algorithmus für andere Programme nutzbar zu machen²⁶.

25. Wie z.B. eine Wärmeleitfähigkeit von 0.

26. Damit wird außerdem gewährleistet, dass nur an einer Stelle das Berechnungsschema erweitert und gewartet werden muss.

Um den COND-Algorithmus von anderen Programmen zu verwenden, ohne die COND-Oberfläche zu verwenden, gibt es einige Möglichkeiten. Das COND-Programm könnten via Kommandozeilenparameter gesteuert werden und im Falle einer direkten Berechnungsanfrage für eine bestimmte Projektdatei diese berechnen (ohne die Oberfläche anzuzeigen). Alternativ kann ein extra Programm, ein Solver geschrieben werden, der nur auf die nicht-interaktive Berechnung von Projektdateien spezialisiert ist. Zuletzt kann die Funktion in einer Bibliothek zur Verfügung gestellt werden, die dann von anderen Programmen mitverwendet werden kann.

Der Solver-Ansatz bietet dabei die besten Möglichkeiten und ist dabei am einfachsten zu realisieren. Außerdem besteht aufgrund der Strukturierung der internen Cond-Daten und der Cond-Ergebnisse in Standard C++ Klassen die Möglichkeit, diesen plattformunabhängig²⁷ zu programmieren.

Als Teil des COND-Programmes wurde also ein Solver erstellt, der es erlaubt, per Kommandozeilenoption die Eingabe-Projektdatei und die Ausgabedatei für die Ergebnisse zu spezifizieren.

Der Solver wird aufgerufen mit

```
cond_solver [Optionen] <Eingabedatei> <Ausgabedatei>
```

wobei die Option `-h` oder `--help` die möglichen Parameter bzw. Optionen anzeigt.

27. Einen geeigneten Compiler vorausgesetzt, lassen sich Standard C++ Programme auf nahezu allen Systemen compilieren.

10 Beschreibung des Programmes COND

Das Programm COND ist trotz seiner Namensverwandschaft zur DOS-Version grundverschieden. Wie schon im vorangehenden Kapitel beschrieben, waren die Entwurfskriterien neben der geforderten Funktionalität vor allem Benutzerfreundlichkeit, intuitive Benutzerführung und Interaktion bei automatischer Aktualisierung der Berechnungsergebnisse.

In den folgenden Abschnitten sollen die einzelnen Dialogfelder, Menüs und die Bedienung des Programmes erläutert werden. Schließlich soll anhand einer zu berechnenden Konstruktion beispielhaft ein Feuchtenachweis durchgeführt werden.

10.1 Das Hauptformular

Während der Benutzung von COND ist das COND-Hauptformular stets sichtbar. Es ist im Wesentlichen eine flexible Eingabemaske, welche eine übersichtliche Eingabe der Konstruktionsdaten erlaubt. Das Formular steuert weiterhin die Ein- und Ausgabe, die Berechnung und die Projektverwaltung. Andere Fenster, insbesondere die automatisch aktualisierten Ausgabefenster, können bei Bedarf ein- und ausgeschaltet werden. So kann man auch bei kleinen Bildschirmauflösungen die Eingabedaten ändern und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse sehen.

Das Menü des Hauptformulars enthält alle Befehle zur Steuerung des Programmes. Alternativ können für häufig benötigte Aktionen die Schaltflächen auf der Werkzeugleiste verwendet werden.

10.1.1 Das Hauptmenü

Das Menü ist in vier Hauptmenüpunkte gegliedert: Datei, Bearbeiten, Ansicht und Hilfe.

- Im Menü **Datei** befinden sich alle Befehle für die Projektverwaltung, Druckersteuerung, Materiallistenbefehle.
- Das Menü **Bearbeiten** stellt Befehle für die Modifizierung der Konstruktion bzw. der persönlichen Materialliste (siehe) zur Verfügung.
- Im Menü **Ansicht** können die Ergebnisansichten an- und ausgeschaltet werden. Diese werden, wenn angezeigt, automatisch mit den berechneten Ergebnissen aktualisiert.
- Schließlich sind im Menü **Hilfe** die Befehle für den Aufruf der Programmhilfe enthalten.

10.1.1.1 Das Datei-Menü

Das Dateimenü (siehe Abbildung 21) enthält die wesentlichen Befehle zur Projektsteuerung.

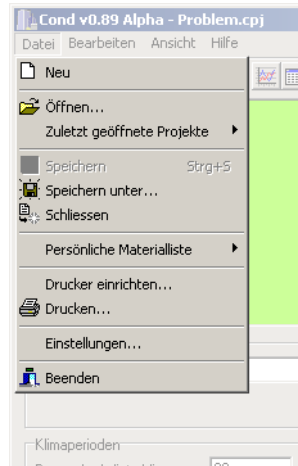


Abbildung 21 Das Datei-Menü

Die Struktur des Menüs entspricht dem gängigen Layout in Windowsanwendungen. Mittels der Befehle **Neu**, **Öffnen...**, **Speichern**, **Speichern unter...** und **Schliessen** wird ein Projekt verwaltet. Der Menüpunkt **Zuletzt geöffnete Projekte** zeigt ein Untermenü mit den zuletzt bearbeiteten Projekten an. Die Anzahl der Einträge in diesem Untermenü lässt sich in den Programmeinstellungen festlegen (siehe 10.6.1).

Die Optionen für das Öffnen und Speichern der persönlichen Materialliste sind im Untermenü **Persönliche Materialliste** enthalten (siehe 10.4).

Die Druckersteuerung erfolgt über die Menüpunkte **Drucker einrichten...** und **Drucken...** (siehe 10.5).

Alle benutzerspezifischen Programmeinstellungen können im Einstellungsdialog (siehe 10.6) durchgeführt werden. Dieser wird durch den Menübefehl **Einstellungen...** angezeigt.

Beenden bewirkt, abgesehen von der Beendigung des Programmes, noch das Schließen des aktuellen Projekts, welches gegebenenfalls vorher noch gespeichert wird. Ebenso werden Änderungen in der persönlichen Materialliste gespeichert. Vorher wird jeweils eine Bestätigung vom Benutzer angefordert.

10.1.1.2 Das Bearbeiten-Menü

In diesem Menü (siehe Abbildung 22) sind die allgemeinen Befehle zum Bearbeiten der Konstruktion enthalten.

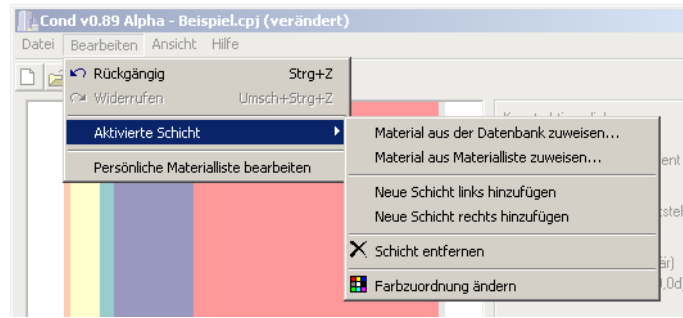


Abbildung 22 Das Bearbeiten-Menü mit dem Schicht-Untermenü

Rückgängig macht die letzte Änderung der Eingabedaten rückgängig, **Widerrufen** bewirkt entsprechend die erneute Ausführung der zurückgenommenen Änderung.

Das Untermenü **Aktivierte Schicht** kann nur geöffnet werden, wenn eine Materialschicht der Konstruktion ausgewählt wurde (also keine Klimabedingung). Das Untermenü enthält Einträge zur Veränderung des Konstruktionsmodells und soll im Abschnitt 10.1.3.1 im Detail erläutert werden.

Der Menübefehl **Persönliche Materialliste bearbeiten** öffnet den Dialog mit der Materialliste (siehe 10.4).

10.1.1.3 Das Ansicht-Menü

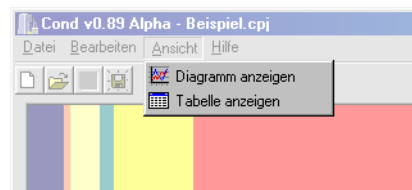


Abbildung 23 Das Anzeige-Menü

Die Ausgabedaten lassen sich in zwei getrennten Fenstern anzeigen. Die graphische Darstellung erfolgt im COND-Diagramm, während die berechneten Zahlenwerte in der COND-Tabelle angezeigt werden. Je nach Bedarf können diese Fenster ein- oder ausgestellt werden, die Optionen **Diagramm anzeigen** und **Tabelle anzeigen** im Ansicht-Menü können jeweils aktiviert und deaktiviert werden.

10.1.1.4 Das Hilfe-Menü

Falls zum Programm oder einem speziellen Problem Hilfe benötigt wird, kann die COND Hilfe aufgerufen werden.

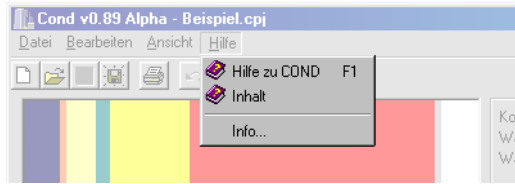


Abbildung 24 Das Hilfe-Menü

Hilfe zu COND zeigt die Startseite der Hilfedatei. Alternativ kann auch die Taste F1 zum Aufruf der Hilfe verwendet werden. **Inhalt** öffnet das Inhaltsverzeichnis der Hilfe. **Info...** zeigt eine Meldungsbox mit Programminformation (Version, Autor, Kontaktadresse etc.).

10.1.2 Die Werkzeugleiste

Die Werkzeugleiste dient der Vereinfachung und Beschleunigung der Programmbedienung und stellt die häufig verwendeten Menübefehle als Schaltflächen zur Verfügung.

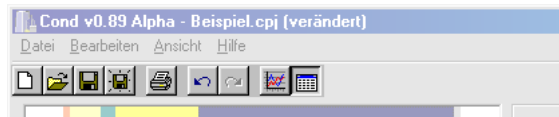


Abbildung 25 Die Werkzeugleiste

In der Reihenfolge von links nach rechts entsprechen die Schaltflächen den folgenden Menübefehlen:

1. Datei->Neu
2. Datei->Öffnen...
3. Datei->Speichern
4. Datei->Speichern unter...
5. Datei->Drucken...
6. Bearbeiten->Rückgängig
7. Bearbeiten->Widerrufen
8. Ansicht->Diagramm anzeigen
9. Ansicht->Tabelle anzeigen

10.1.3 Die Eingabemasken des Hauptformulars

Im Hauptformular können alle Daten für die Berechnung einer Konstruktion eingegeben werden. Dabei ändert sich die Eingabemaske in Abhängigkeit davon, ob eine Schicht der Konstruktion oder eine der zu beiden Seite anliegenden Klimadaten ausgewählt wurde.

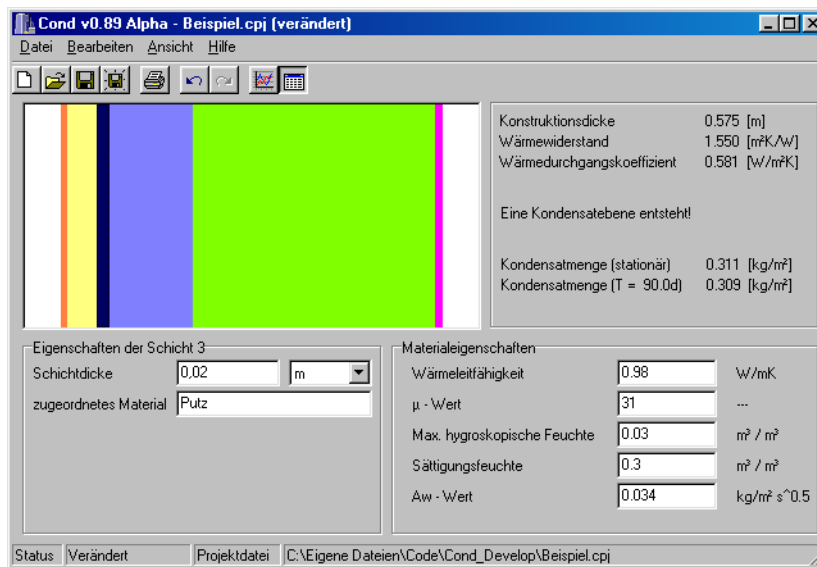


Abbildung 26 Das Haupteingabeformular des COND-Programmes

Das Hauptformular gliedert sich in drei Bereiche:

1. Das Konstruktionsmodell, bestehend als den farbig gekennzeichneten Schichten der Konstruktion sowie den beiden weißen Schichten zu beiden Seiten, welche die Klimarandbedingungen zu beiden Seiten der Konstruktion repräsentieren.
2. Die rechts neben der Schichtendarstellung angeordnete Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse (soweit diese schon berechnet wurden).
3. Die Eingabedaten einer Schicht bzw. die Klimadaten sind im unteren Bereich des Hauptformulars angeordnet. Die Eingabemasken in diesem Bereich werden dynamisch verändert.

10.1.3.1 Das Konstruktionsmodell

Das Konstruktionsmodell zeigt den Aufbau der Konstruktion mit den verhältnismäßigen Schichtdicken. Die einzelnen Schichten werden zur Unterscheidung farblich gekennzeichnet. Die beiden weißen Schichten am Rand repräsentieren jeweils die linke und rechte bzw. obere und untere Klimarandbedingung. Die Auswahl einer Schicht mit der linken Maustaste bewirkt die Aktualisierung der Eingabemasken. Dabei wird abhängig davon, ob eine Klimabedingung oder eine Konstruktionsschicht gewählt, wird die Schichteingabemaske (siehe Abbildung 28) oder Klimaeingabemaske (siehe Abbildung 29) angezeigt.

Wird eine Konstruktionsschicht ausgewählt, so kann das Konstruktionsmodell über das Untermenü **Bearbeiten->Aktivierte Schicht** oder das mittels Rechtsklick anzeigbare Kontextmenü verändert werden.

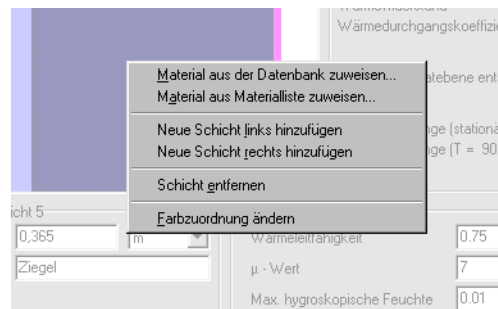


Abbildung 27 Das Kontextmenü des Konstruktionsmodells

Der erste Menüpunkt **Material aus der Datenbank zuweisen...** öffnet die Materialdatenbank zur Auswahl eines Materials (siehe 10.3). Die aus der Materialdatenbank übernommenen Materialkennwerte werden dann in die Materialeingabemaske übertragen. Alternativ können die Materialparameter auch aus der persönlichen Materialliste übernommen werden. Diese wird durch den zweiten Menüpunkt **Material aus Materialliste zuweisen...** geöffnet. Versehentliches Überschreiben manuell eingegebener Materialkennwerte in der Materialeingabemaske durch zugewiesene Materialparameter kann durch die Rückgängig-Funktion jederzeit ungültig gemacht werden.

Neue Schichten können dem Konstruktionsmodell mittels der nächsten beiden Menüpunkte hinzugefügt werden. Diese neuen Schichten enthalten noch keine Materialkennwerte. Diese können dann entweder durch die oben beschriebenen Zuweisungsfunktionen belegt werden oder manuell in der Materialeingabemaske eingegeben werden.

Der vorletzte Menüpunkt entfernt die markierte Schicht aus der Konstruktion. Die Rückgängig-funktion kann auch hier versehentliches Löschen ungeschehen machen.

Der letzte Menüpunkt **Farbzuordnung ändern** dient lediglich der Verbesserung bzw. persönlichen Anpassung der Darstellung, hat jedoch keinerlei Auswirkungen auf den Ausdruck oder gar die Berechnung.

10.1.3.2 Die Eingabemaske für die Schichtdaten

Diese Eingabemaske wird immer dann angezeigt, wenn eine Materialschicht ausgewählt wurde.

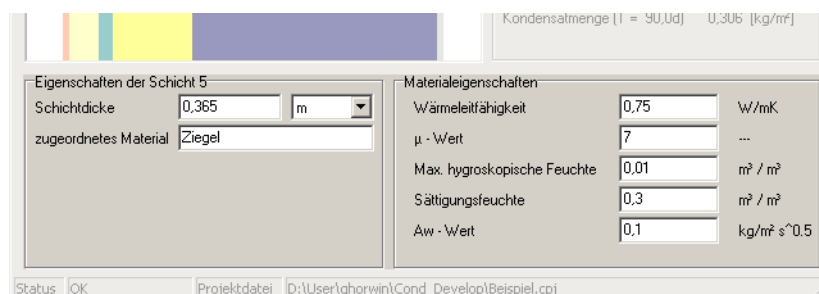


Abbildung 28 Die Eingabemaske für eine Schicht

Auf der linken Seite kann die Schichtdicke und Materialbezeichnung eingegeben werden. Die Dicke kann dabei in verschiedenen Einheiten angegeben werden, dabei bewirkt die Wahl der

Einheit aus der Auswahlliste eine Umrechnung der aktuell eingegebenen Schichtdicke. Die Materialbezeichnung kann beliebig verändert werden. Wird keine Materialbezeichnung eingegeben, entspricht das einem noch nicht zugeordneten Material²⁸.

Die rechte Seite der Materialeingabemaske enthält die fünf charakteristischen und für die COND-Berechnung notwendigen Materialparameter. Bei der Eingabe der Parameter werden diese noch nicht auf inhaltliche Richtigkeit (d.h. ob die Werte innerhalb gültiger Wertebereiche liegen) geprüft. Das geschieht erst vor der Berechnung²⁹ und eventuell fordert das Programm dann zu einer Korrektur dieser Werte auf.

10.1.3.3 Eingabe der Klimadaten

Wird im Konstruktionsmodell eine Klimarandbedingung ausgewählt, so wird die Klimadaten-eingabemaske angezeigt.

Abbildung 29 Klimadaten-Eingabemaske

Im linken oberen Rahmen kann der Übergangswiderstand zwischen Luftschicht und Materialoberfläche eingegeben werden. Die beiden auf der rechten Seite befindlichen Flächen enthalten die für diese Klimabedingung geltenden Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten, jeweils für die Kondensationsperiode (Winterklima) und die Verdunstungsperiode (Sommerklima).

Schließlich kann im linken unteren Rahmen die Dauer des Sprungklimas angegeben werden. Diese Eingabe gilt für beide Klimarandbedingungen, während alle anderen Eingaben spezifisch für die jeweilige Seite der Konstruktion sind. Die Einheit der Zeitdauer kann durch die Auswahlliste geändert werden. Dabei wird der aktuell eingegebene Wert entsprechend umgerechnet.

Bei der Erstellung eines neuen Projektes werden die Klimadaten entsprechend der in der DIN angegebenen Klimadaten gesetzt.

10.1.3.4 Die Berechnungszusammenfassung

Im Rahmen rechts neben dem Konstruktionsmodell werden die bisher berechneten Ergebnisse dargestellt. Dabei werden nur die wesentlichen Informationen angegeben, wie z.B. der Wärme-

28. Damit die Berechnung durchgeführt werden kann, muss jedoch jeder Schicht ein Material zugewiesen werden.

29. Die Überprüfung findet erst vor der Berechnung statt, da auch eingelesene oder importierte Materialkennwerte ungültig sein können. Somit muss nur einmal im Programm eine Überprüfung stattfinden.

durchgangskoeffizient, ob und wieviel Kondensat entsteht und die Masse des in der Verdunstungsperiode ausdiffundierenden Wassers. In Abhängigkeit von der Durchfeuchtung der Konstruktion müssen verschiedenen Berechnungsalgorithmen verwendet werden. Bei bestimmten Randbedingungen kann auch gar keine Berechnung durchgeführt werden (z.B. wenn Oberflächenkondensat entsteht). Die Information über den verwendeten Algorithmus findet sich in der Mitte des Rahmens und kann folgende Einträge enthalten:

1. Keine Berechnung durchgeführt

Es fehlen noch Eingabewerte, z.B. Materialparameter einer Schicht müssen noch eingegeben werden oder eine Schicht enthält ungültige Kennwerte. Das Eingabe-Check-Formular gibt genaue Auskunft über die fehlenden Parameter.

2. Es entsteht Oberflächenkondensat (links)!

Der Temperaturabfall an der Bauteiloberfläche (infolge des Übergangswiderstandes) ist so groß, dass die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Es kommt zur Oberflächenkondensation an der linken Seite der Konstruktion. Für diesen Fall kann keine Berechnung durchgeführt werden.

3. Es entsteht Oberflächenkondensat (rechts)!

Wie 2., nur dass diesmal das Oberflächenkondensat auf der rechten Seite entsteht.

4. Es existiert noch kein Algorithmus für dieses Problem!

Aufgrund der vielfältigen Kombinationen, die bei der Durchfeuchtung der Schichten auftreten können, kann mitunter eine Kombination von teilweise bzw. vollständig überhygroskopisch durchfeuchteten Schichten (noch) nicht berechnet werden.

5. Es entsteht kein Kondensat

In der gesamten Konstruktion ist der Sättigungsdampfdruck stets höher als der Partialdruck; es kommt gar nicht zur Kondensation. (entspricht Fall 1 bei Glaser)

6. Es entsteht eine Kondensatebene

Das Kondensat entsteht an einer Ebene und breitet sich in beide Richtungen durch kapillare Leitung aus. (entspricht Fall 2 bei Glaser)

7. Es entsteht ein Kondensationsbereich

Es wird mindestens eine Schicht vollständig überhygroskopisch durchfeuchtet. (entspricht Fall 3 bei Glaser)

Für die letzten 3 Fälle werden zusätzlich zu den Konstruktionskennwerten noch die folgenden Ergebnisse angezeigt:

- **Kondensatmenge**

In den Klammern wird die Dauer der Kondensatperiode angegeben, der Ergebnisswert ist die Tauwassermasse innerhalb dieses Zeitraumes.

- **Einstellzeit**

Dieses Ergebnis gibt die hygroskopische Einstellzeit³⁰ und die überhygroskopische Einstellzeit³¹ an.

30. Das ist die Zeit bis zum Erreichen von 100% Luftfeuchte in der Kondensatebene.

- **Trocknungszeit**

Die Zeit, die im Trocknungszeitraum (Sommer) für das vollständige Ausdiffundieren der berechnete Kondensatmenge benötigt wird.

10.2 Die Ausgabefenster

Die berechneten Ergebnisse können in den zwei Fenstern, dem Feuchtemassen-Diagramm und der Ergebnistabelle, dargestellt werden. Im Diagrammfenster können die berechneten Werte selektiv angezeigt werden. Die Ausgabetablelle beinhaltet die berechneten Temperaturen, Dampfdrücke und Feuchtegehalte sowie die Kondensat- und Trocknungsmengen.

Die Ausgabefenster können über das Menü **Ansicht** (siehe 10.1.1.3) oder die Werkzeugleiste (siehe 10.1.2) ein- und ausgeschaltet werden.

10.3 Die Materialdatenbank

Sofern man die IBK-Materialdatenbank installiert hat, kann man die Materialdaten importieren und einzelnen Schichten zuweisen. Bei Auswahl des Menübefehls **Bearbeiten->Aktivierte Schicht->Material aus der Datenbank zuweisen...** wird die Datenbank geöffnet und die Materialdaten angezeigt (siehe Abbildung 30).

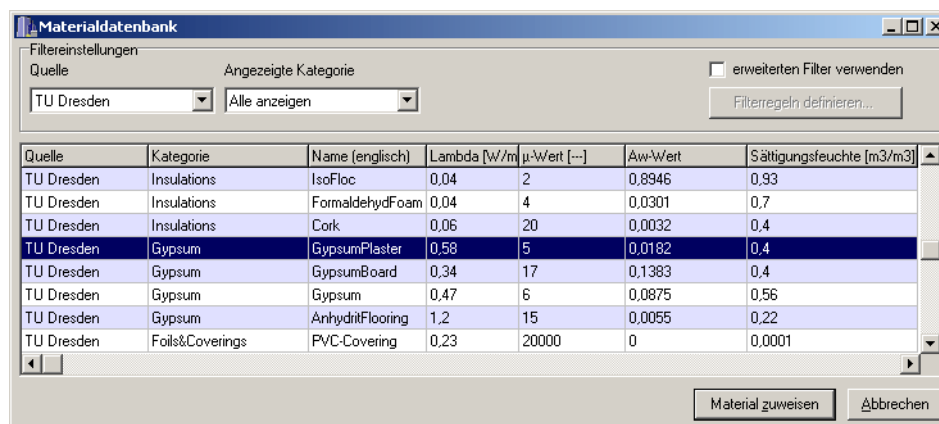


Abbildung 30 Materialdatenbank - Importdialog

Um das Aufsuchen von Materialdaten zu erleichtern, können die Spalten wahlweise ein- und ausgeblendet werden. Des Weiteren gibt es verschiedene Filtermöglichkeiten, um gezielt Materialgruppen anzuzeigen. Ein ausgewähltes Material kann über die Schaltfläche **Material zuweisen** oder über den entsprechenden Kontextmenübefehl in die Materialdaten einer Schicht übertragen werden.

31. Das ist die Zeit bis zum Erreichen von 95% der Durchfeuchtungshöhe im stationären Zustand.

10.3.1 Ausblenden von Spalten

Die einzelnen Spalten können über das Kontextmenü (siehe Abbildung 31) ein- und ausgeschaltet werden.

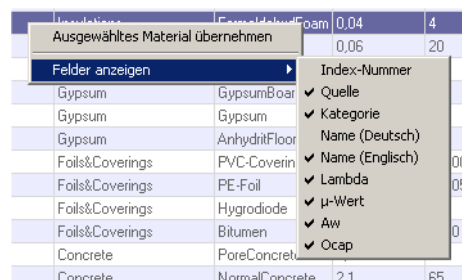


Abbildung 31 Kontextmenü der Materialdatenbank

10.3.2 Der Datenbankfilter

Für das Filtern der Materialdaten gibt es zunächst zwei Schnellfilter, den Quellen- und den Kategoriefilter. Beide können über die Auswahllisten gesteuert werden und schränken die angezeigten Materialdaten entsprechend ein.

Alternativ kann der erweiterte Filter verwendet werden. Nach Auswahl des erweiterten Filters kann der Filterdialog (siehe Abbildung 32) durch die Schaltfläche **Filterregeln definieren...** angezeigt werden.

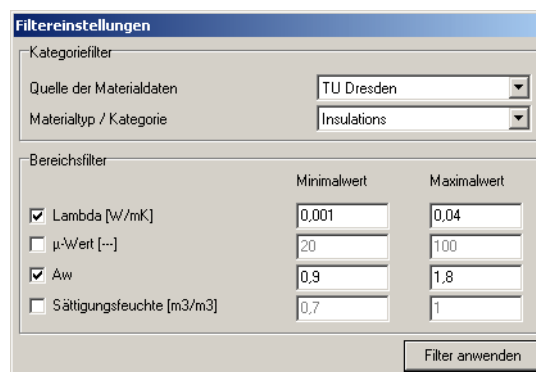


Abbildung 32 Filterdialog für Materialdatenbank

Die Auswahllisten entsprechen den Schnellfiltern des Materialdaten-Import-Dialoges. Die Bereichsfilter erlauben es nun, für die einzelnen Materialparameter Filterbereiche anzugeben. Nur die mit einem Haken versehenen Auswahlboxen werden als Filter angewendet.

Für die Bereiche können jeweils eine obere und untere Grenze angegeben werden. Wird keine Grenze angegeben, d.h. das Eingabefeld ist leer, wird die jeweilige Grenze nicht als Filter definiert. Wenn man z.B. alle Materialien mit einem Wärmeleitwiderstand kleiner als 0,04 W/m²K angezeigt haben möchte, dann trägt man beim Maximalwert die 0,04 ein und entfernt den Eintrag beim Minimalwert.

10.3.3 Zugriff auf die Materialdatenbank

Wenn man das Programm COND installiert und den Rechner neu gestartet hat, sollte das Datenbank-Alias für die IBK-Materialdatenbank gesetzt sein. COND kann nun auf die Materialdaten zugreifen. Möchte man den Ort der Datenbank manuell verändern, so kann das über die BDE-Einstellungen in der Systemsteuerung erledigt werden. Sind die Einstellungen falsch oder ist die Materialdatenbank gar nicht installiert, gibt COND einen entsprechenden Fehler aus.

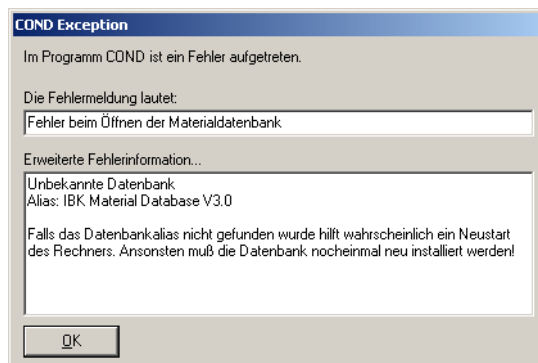


Abbildung 33 Mögliche Fehlermeldung beim Öffnen der Materialdatenbank

Eine ähnliche Meldung wird angezeigt, wenn die Dateien der Materialdatenbank nicht gefunden werden konnten. In jedem Fall sollte eine Installation der Materialdatenbank bzw. Korrektur der BDE-Einträge dieses Problem beseitigen.

10.4 Die persönliche Materialliste

Mitunter sind die in der Datenbank enthaltenen Materialien nicht ausreichend oder man möchte ein selbstdefiniertes Material in mehreren Projekten verwenden. In diesem Fall bietet die persönliche Materialliste die Möglichkeit, Materialdaten einzugeben und zu speichern. Dabei kann diese Materialliste dann auch von mehreren Benutzern verwendet werden. Generell wird die persönliche Materialliste bei Programmstart geladen und bei Programmende gespeichert.

10.4.1 Die persönliche Materialliste bearbeiten

Mit dem Menüpunkt **Bearbeiten->Persönliche Materialliste bearbeiten** öffnet man die Materialliste.

| Material | Lambda [W/mK] | μ-Wert [---] | W-hyg [m3/m3] | W-sat [m3/m3] | Aw-Wert |
|-----------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------|
| Calciumsilikatdämmung | 0,05 | 2 | 0,005 | 0,8 | 0,775 |
| Gipskarton | 0,34 | 18 | 0,01 | 0,4 | 0,35 |
| Kalksandstein | 1,25 | 18 | 0,08 | 0,3 | 0,088 |
| Putz | 0,98 | 31 | 0,03 | 0,3 | 0,034 |
| Putz (außen) | 0,95 | 7 | 0,02 | 0,4 | 0,01 |
| Ziegel | 0,75 | 7 | 0,01 | 0,3 | 0,1 |

Abbildung 34 Bearbeitungsdialog für die Materialliste

Die einzelnen Einträge lassen sich einfach durch Doppelklick bearbeiten. Die Schaltfläche **Neues Material definieren...** fügt ein neues Material der Liste hinzu. Alternativ kann auch das Kontextmenü verwendet werden. Rechtsklick auf die Tabelle zeigt das Kontextmenü mit zwei Einträgen an. Es kann ein neues Material hinzugefügt werden oder die ausgewählten Materialien können aus der Liste entfernt werden.

10.4.2 Die Materialliste laden/speichern

Die Materialliste wird beim Programmstart automatisch geladen und die Änderungen werden beim Programmende gespeichert³². Möchte man die Materialliste gesondert abspeichern, so kann man die Liste mit dem Befehl **Datei->Persönliche Materialliste->speichern...** separat sichern. Ebenso kann eine abgespeicherte Materialliste importiert werden. Dazu den Menü-Befehl **Datei->Persönliche Materialliste->laden...** ausführen. Die eingelesenen Materialdaten können nun wahlweise der bisherigen Materialliste hinzugefügt werden oder aber die alte Materialliste ersetzen: eine Meldungsbox fordert zu dieser Entscheidung auf.

10.4.3 Pfad der Materialliste festlegen

In der Standardeinstellung wird die persönliche Materialliste in das Programmverzeichnis vom COND gespeichert. Bei Beschränkung des Schreibzugriffs auf dieses Verzeichnis ist es notwendig, die Materialliste in einem anderen Verzeichnis zu speichern. Dieses kann im Einstellungsdialog festgelegt werden (siehe 10.6.1).

Will man eine persönliche Materialliste mit anderen Benutzern teilen, so kann man die Materialliste in einem für alle Benutzer zugänglichen Verzeichnis ablegen. Jetzt können alle Benutzer, die Zugriff auf diese Materialliste haben wollen, diesen Pfad als Materiallistenpfad eintragen. Es ist dann jedoch darauf zu achten, dass nur ein Nutzer Änderungen an der Materialliste vornimmt, da sonst die Änderungen eines anderen Nutzers verloren gehen.

10.5 Drucken und Druckvoransicht

COND kann die Daten als Report drucken. Dabei kann man die einzelnen Bestandteile des gedruckten Reports beliebig auswählen. Der Druckdialog lässt sich über den Menübefehl **Datei->Drucken...** bzw. der Drucker-Schaltfläche auf der Werkzeugleiste anzeigen. Wie in Windows-Anwendungen üblich, lässt sich der Drucker über den Druckereinstellungsdialog, angezeigt durch **Datei->Drucker einrichten...**, auswählen und einrichten.

32. Die Materialliste wird nur gespeichert, wenn sie verändert wurde. In diesem Fall wird vor dem Speichern eine Bestätigung eingeholt.

10.5.1 Drucker einrichten

Der Druckereinstellungsdialog entspricht weitestgehend dem unter Windows üblichen Einrichtungsdialog für Drucker und dient im wesentlichen der Auswahl des zu verwendenden Druckers.

10.5.2 Der Druckdialog

Im Druckdialog (siehe Abbildung 35) können die einzelnen Bestandteile des Reports ausgewählt werden. Die Schaltfläche **Druckvoransicht...** zeigt eine skalierbare Ansicht der gedruckten Seite.

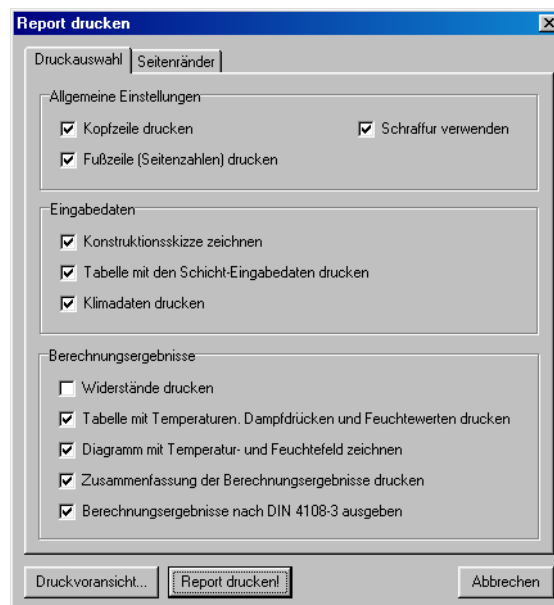


Abbildung 35 Der Druckdialog

Die einzelnen Auswahlboxen bewirken folgendes:

Allgemeine Einstellungen

- **Kopfzeile drucken**
Eine Kopfzeile mit Firmenlogo/Adresse, Programmversion und dem aktuellen Datum wird gedruckt (auf jeder Seite).
- **Fußzeile drucken**
Eine Fußzeile mit den Seitenzahlen wird gedruckt (auf jeder Seite).
- **Schraffur verwenden**
In der Konstruktionsskizze werden Schraffuren verwendet.

Eingabedaten

- **Konstruktionsskizze zeichnen**
Ein bemaßter Wandquerschnitt wird ausgegeben.

- **Tabelle mit den Schicht-Eingabedaten drucken**

Die Konstruktionseingabedaten, d.h. Materialkennwerte, Schichtdicken etc. werden in mehreren Tabellen gedruckt.

- **Klimadaten drucken**

Die Klimaeingabedaten werden gedruckt.

Berechnungsergebnisse

- **Widerstände drucken**

Die berechneten Wärmeleit-, Dampfdiffusions- und Kapillarwasserleitwiderstände werden in einer gesonderten Tabelle für jede Schicht ausgegeben.

- **Tabelle mit Temperaturen, Drücken etc. drucken**

Druckt eine Tabelle mit den berechneten Temperaturen, Dampfdrücken und Feuchtegehalten sowie den überhygroskopischen Feuchtemassen.

- **Diagramm mit Temperatur und Feuchtefeld zeichnen**

Ein Diagramm mit Feuchtefeldern nach Ende der Kondensationsperiode wird ausgedruckt.

- **Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse drucken**

Es wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse gedruckt .

- **Berechnungsergebnisse nach DIN 4108 ausgeben**

Die mit den Formeln der DIN (Glaser-schema) berechneten Werte werden gedruckt.

Schließlich können im Druckdialog, Registerkarte *Seitenränder* noch die Seitenränder eingestellt werden. Beim Start des Programmes werden diese aus den Benutzereinstellungen gelesen. Verändert man jedoch die Einstellungen für die Seitenränder, so bleiben diese Änderungen für die Dauer der Programmausführung bestehen.

Die Schaltfläche **Report drucken** bewirkt den Ausdruck aller Report-Seiten.

10.5.3 Druckvoransicht

Die Einstellungen im Druckdialog können in der Druckvoransicht überprüft werden. Dabei wird eine skalierbare Ansicht mit jeweils einer Ausdruckseite angezeigt.

Druckvoransicht

[Druckvoransicht beenden] Aktuelle Seite drucken

TU Dresden
Institut für Baubau
Anlagenbau und BTH-Systeme
05.08.2002

Wärmeleit-, Dampfdiffusions- und Kapillarwasserleitwiderstände

| Schicht/Material | r_1 [m ² K/W] | r_2 [m/s] | r_{p2} [m ² /kg] |
|----------------------------------|----------------------------|-------------|-------------------------------|
| 1 Gipskarton | 0,029 | 9,220E+05 | 9,585E+01 |
| 2 Calciumsilikatdämmung | 0,090 | 4,860E+05 | 7,310E+01 |
| 3 Putz | 0,020 | 3,240E+05 | 6,811E+01 |
| 4 Kalksandstein | 0,095 | 1,260E+10 | 3,309E+01 |
| 5 Ziegel | 0,487 | 1,380E+10 | 1,790E+04 |
| 6 Putz (außen) | 0,021 | 3,780E+05 | 1,997E+01 |
| Gesamtwiderstand aller Schichten | 1,543 | 3,090E+10 | 1,385E+05 |

Wärmedurchlasswiderstand inklusive Übergangswiderstand: $R_2 = 1,713$ [W/m²K]
Wärmedurchgangswert der Konstruktion: $U = 0,584$ [m²/W]

Temperaturen, Dampfdrücke und Feuchtegehalte

| Schicht/Material | T [°C] | $p_{s,p}$ [Pa] | p_v [Pa] | ρ [kg/m ³] | $d_{s,p}$ [mm] | $q_{s,p}$ [kg/m ²] |
|-------------------------|--------|----------------|------------|-----------------------------|----------------|--------------------------------|
| Luftschicht (links) | 20,0 | 2239 | 1169 | | | |
| | 18,1 | 2078 | 1169 | 0,006 | | |
| 1 Gipskarton | 17,7 | 2022 | 1151 | 0,006 | | |
| 2 Calciumsilikatdämmung | 4,5 | 845 | 845 | 0,001 | 11,4 | 0,23 |
| 3 Putz | 4,2 | 828 | 808 | 0,030 | 11,4 | -0,08 |
| 4 Kalksandstein | 2,8 | 750 | 589 | 0,076 | | |
| 5 Ziegel | 4,3 | 428 | 329 | 0,063 | | |
| 6 Putz (außen) | 4,4 | 422 | 321 | 0,006 | | |
| Luftschicht (rechts) | 4,0 | 403 | 321 | 0,013 | | |
| | 4,0 | 403 | 321 | 0,013 | | |

Gesamtkondensationsmenge in der Kondensationszone

Abbildung 36 Druckvoransicht

Mit den Pfeil-Tasten kann zwischen den einzelnen Seiten umgeschaltet werden. Die Schaltfläche **Aktuelle Seite drucken** bewirkt den Ausdruck der gerade angezeigten Seite.

10.6 Programmeinstellungen

Einige Einstellungen im COND-Programm können im Einstellungsdialog verändert werden. Diesen kann man mit dem Befehl **Datei->Einstellungen...** anzeigen.

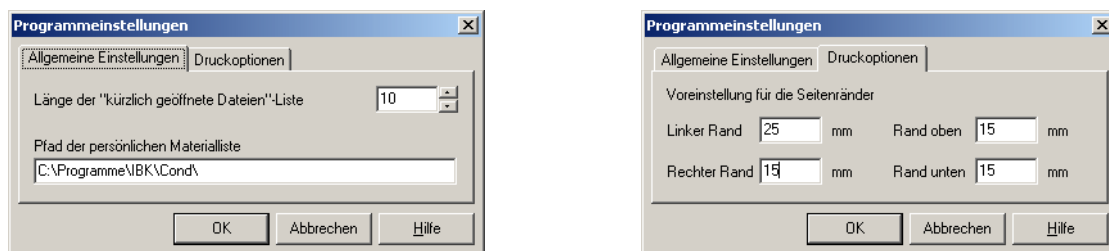


Abbildung 37 Der Einstellungsdialog

Die Programmeinstellungen gelten für den jeweils angemeldeten Benutzer (Win95/Win98 für alle Benutzer) und werden beim Programmende gesichert.

10.6.1 Allgemeine Einstellungen

Die in dieser Registerkarte enthaltenen Optionen regeln generelle Einstellungen im Programm. Der Pfad der Materialliste muss dabei als vollständiger Pfad (mit abschließendem '\') eingegeben werden.

10.6.2 Druckoptionen

Die Registerkarte *Druckoptionen* beinhaltet druckerunabhängige Voreinstellungen für den Druckdialog. Die Einstellungen in diesem Dialog werden beim Programmstart in den Druckdialog übertragen. Während der Ausführung des Programms bleiben Änderungen im Druckdialog jedoch bestehen.

10.7 Installation und Benutzereinrichtung

Das Programm kann direkt von der CD über das Programm **SETUP.EXE** installiert werden. Bei Mehrbenutzer-Betriebssystemen (Win2000, WinNT, WindowsXP) wird das Programm dabei nur für den gerade angemeldeten Benutzer installiert. Möchte ein anderer Nutzer das Programm ebenso benutzen, so braucht er lediglich COND zu starten. Die persönlichen Programmeinstellungen werden dann zunächst mit Standardwerten belegt, die jedoch im Einstellungsdialog jederzeit geändert werden können. Generell werden alle Programm-Einstellungen (siehe 10.6) für jeden Benutzer extra gespeichert. So kann jeder Benutzer das Programm an seine persönlichen Bedürfnisse anpassen.

Soll für einen weiteren Benutzer ein Eintrag im Windows-Programme-Menü erzeugt werden, so muss lediglich das Setup-Programm mit benutzerdefiniertem Setuptyp aufgerufen werden und dabei alle Installationsoptionen ausgewählt werden. Nun werden keine Programmteile installiert, sondern nur die Registry-Informationen und die Verknüpfungen für den aktuellen Nutzer erstellt.

10.7.1 Netzwerkinstallation

Möchte man das COND-Programm und/oder die Materialdatenbank von einem Netzwerk mit Dateiaustausch (Filesharing) laden, so muss es zunächst von einem Systemadministrator auf den Netzwerkserver installiert werden. Danach muss auf allen Client-Rechnern lediglich ein Link auf das COND Programm auf dem Server erzeugt werden. Die Benutzereinstellungen werden dann lokal auf dem Client-Rechner gespeichert.

10.8 Ein Beispielprojekt für den Nachweis einer Konstruktion

Im Folgenden soll anhand eines Beispielprojektes die generelle Vorgehensweise bei der Eingabe und Berechnung mit COND demonstriert werden.

10.8.1 Ein neues Projekt erstellen

Nach der gelungenen Installation (inklusive der Datenbank) kann COND gestartet werden. Es erscheint das zunächst leere Hauptformular. Nach dem Anlegen eines neuen Projektes mittels **Datei->Neu** bzw. der **Neu**-Schaltfläche erscheint die Eingabemaske für die Konstruktion. Beim Erstellen eines neuen Projektes wird automatisch eine aus einer Schicht bestehende Konstruktion erzeugt. Zusätzlich werden zwei Randbedingungen entsprechend der Klimadaten der DIN für eine Wandkonstruktion erzeugt. Dabei wird auf der linken Seite der Schicht ein Innenklima eingetragen und auf der rechten Seite das dazugehörige Außenklima, jeweils für die Kondensations- und Trocknungsperiode. Die Übergangswiderstände werden dementsprechend für die linke (Innen-) Seite und die rechten (Außen-) Seite eingetragen.

10.8.2 Schichten hinzufügen

In diesem Beispiel soll eine Konstruktion aus 5 Schichten berechnet werden. Der Schichtaufbau ist der folgende (von innen nach außen):

1. Gipskarton (10 mm)
2. Calciumsilikatdämmung (45 mm)
3. Kalkputz (15 mm)
4. Ziegel (365 mm)
5. Kalk-Zementputz (10 mm)

Die Anzahl der Schichten in der Konstruktion kann durch Verwendung des Kontextmenüs oder des Untermenüs **Bearbeiten->Aktivierte Schicht** mit den Befehlen **Schicht links/rechts hinzufügen** verändert werden. Die neu hinzugefügten Schichten haben zunächst die Dicke 10 cm und haben noch kein Material zugeordnet.

10.8.3 Parameter der Schichten eintragen

Als nächstes lassen sich die Schichten einzeln auswählen und die Schichtdicken eintragen.

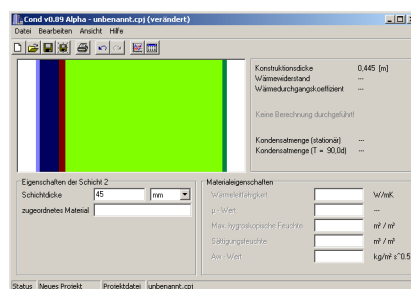


Abbildung 38 Konstruktion mit den einzelnen Schichten (noch ohne Materialzuordnung)

Das Konstruktionsmodell wird bei der Eingabe gemäß der Schichtbreiten skaliert (siehe Abbildung 38).

Als nächstes können den einzelnen Schichten Materialkennwerte zugewiesen werden. Dazu kann entweder die Datenbank oder die persönliche Materialliste verwendet werden. Alternativ können die Materialparameter auch manuell eingegeben werden. Dazu müssen zunächst der Materialname und dann in den nun aktivierten Eingabefeldern die Materialparameter eingegeben werden.

Sind die Materialparameter korrekt eingegeben, wird automatisch die Berechnung durchgeführt.

10.8.4 Klimabedingungen anpassen

Per default sind die Klimabedingungen entsprechend der DIN 4108 eingetragen. Diese können jedoch bei Bedarf geändert werden. Dazu muss eine Klimarandbedingung ausgewählt werden (Klick auf die weißen Schichten an beiden Seiten des Konstruktionsmodells). Es erscheint die im Abschnitt 10.1.3.3 beschriebene Klimadateneingabemaske für die jeweilige Randbedingung. Hier können jetzt die gewünschten Änderungen durchgeführt werden.

10.8.5 Berechnungsergebnisse überprüfen

Die wesentlichen Berechnungsergebnisse werden gekürzt im Zusammenfassungsrahmen angezeigt. Dieser enthält die wichtigsten Ergebnisse wie z.B. Wärmedurchgangskoeffizient, ob- und wieviel Kondensat entsteht und wieviel davon in der Verdunstungsperiode wieder trocknet. So kann auf einen Blick entschieden werden, ob die Konstruktion kritisch zu beurteilen ist.

In dem hier betrachteten Beispiel sollte eine Kondensatebene entstehen. Falls noch keine Berechnung durchgeführt werden konnte, wird bei Aktivierung des Ausgabediagramms bzw. der Ausgabetable auf die fehlenden bzw. ungültigen Materialkennwerte hingewiesen.

Mit den Menübefehlen **Ansicht->Diagramm anzeigen** und **Ansicht->Tabelle anzeigen** bzw. den alternativen Schaltflächen auf der Werkzeuggestreife werden die Ausgabefenster angezeigt. Das Diagramm enthält das Temperaturprofil, die Dampfdrücke sowie den Feuchteverlauf. Die Tabelle enthält die dazugehörigen Zahlenwerte und weitere Berechnungsergebnisse.

Jetzt können einzelne Schichten oder Materialparameter gezielt verändert werden, um dadurch günstigere Ergebnisse zu erzielen. Bei jeder Änderung der Eingabe werden die Ergebnisse aktualisiert und entsprechend dargestellt.

10.8.6 Report drucken

Mit der Druckfunktion (**Datei->Drucken...**) kann nun ein vollständiger Report gedruckt werden. Wahlweise können die einzelnen Komponenten des Reports ein- und ausgeschaltet werden. Sinnvoll ist die Verwendung der Druckvoransicht, um einen Überblick über die zu druckenden Seiten zu bekommen.

11 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

11.1 Bewertung der Ergebnisse

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war es, das im ersten Teil dieser Arbeit vorgestellte Verfahren zur hygrothermischen Bewertung von mehrschichtigen Bauteilen in ein nutzerfreundliches Programm zu integrieren, um damit die Anwendung dieses Verfahrens in der Praxis zu erleichtern. Dieses Ziel konnte mit der Erstellung des Windows-Programmes COND erreicht werden. Es erlaubt auf sehr einfache und intuitive Weise die Berechnung und Optimierung von Konstruktionen. Weiterhin ist es im Programm wie gefordert möglich, auf die Materialdatenbank des Institutes für Bauklimatik der TU Dresden zuzugreifen und benötigte Materialkennwerte zu entnehmen.

Die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen der Berechnungsalgorithmus basiert, wurden in dieser Arbeit zusammenfassend dargestellt und erläutert. Die Ableitung der im Algorithmus verwendeten Gleichungen ist die Voraussetzung dafür, dass der Algorithmus und damit das Programm in der Bemessungspraxis Anwendung finden kann.

Das Programm erfüllt alle Anforderungen, die derzeit an ein kommerzielles Programm zur Erstellung eines bauphysikalischen Nachweises einer Umfassungskonstruktion gemäß der Regularien gestellt werden können. Es muss jedoch die Einschränkung gemacht werden, dass das Programm noch nicht jede erdenkliche Konstruktion berechnen kann. Die am häufigsten auftretenden Fälle können jedoch mit dem Programm berechnet werden. Daher kann es für diese Konstruktionen an Stelle des Glaserschemas eingesetzt werden.

Das entstandene Programm ist dabei keinesfalls ein abgeschlossenes System. Es ist bewusst als modulare Anwendung entwickelt worden, so dass andere Programme den Berechnungsalgorithmus ebenso verwenden können. Als Beispielapplikation wurde dazu der COND-Solver programmiert. Des Weiteren wurde der Berechnungsalgorithmus klar strukturiert umgesetzt, so dass zukünftige Erweiterungen leicht zu implementieren sind.

11.2 Weiterführende Arbeit

Aufgrund der Vielfalt der möglichen Konstruktionen, d.h. Kombinationen der Anordnung von Schichten mit unterschiedlichen Dicken und Materialien, können Fälle auftreten, die der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus nicht berechnen kann. So ist es zur Zeit noch nicht möglich, Schichten mit gesättigten Bereichen oder räumlich getrennte Kondensationsbereiche zu berechnen. Die Einarbeitung dieser Algorithmen würde dazu führen, dass das Programm nahezu alle Konstruktionen berechnen und damit das Glaserschema fast gänzlich ersetzen könnte.

11.3 Schlußbemerkungen

Trotz der wissenschaftlich fundierten Ableitung des Verfahrens und der Entwicklung eines zeitgemäßen Programmes zur Anwendung desselben bleibt es eine Erweiterung des in den Normen festgeschriebenen Wasserdampfdruckschemas. Es ist zu erwarten, dass sich dieses Verfahren erst dann durchsetzen wird, wenn die Bauphysiker und Ingenieure gleichermaßen die Vorteile gegenüber den herkömmlichen Bemessungs- und Berechnungsverfahren erkennen. Dazu könnte das Programm COND beitragen, da es mit seiner einfachen und leicht verständlichen Handhabung eine hohe Verbreitung finden könnte und damit auch auf das dem Programm zugrunde liegende Verfahren aufmerksam machen würde.

Referenzen

- [1] HÄUPL, P., „*Ein analytisches Modell zum Feuchtedurchgang durch mehrschichtige Konstruktionen*“, Beitrag zum 11. Bauklimatischen Symposium in Dresden, Band 2, S.526 ff., September 2002.
- [2] HÄUPL, P., „*Bauphysik für Ingenieure - Grundlagen der thermischen Bauphysik*“, Vorlesungsskript, Wintersemester 1999/2000.
- [3] GRUNEWALD, J., „*Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen*“, Dissertation, TU Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, Oktober 1999.
- [4] DIN 4108, „*Wärmeschutz im Hochbau*“, Deutsches Institut für Normung, 1981.
- [5] GRUNEWALD, BOMBERG, „*An engineering approximation of material characteristics for input to Heat, Air, and Moisture transport simulations*“, Beitrag zum 11. Bauklimatischen Symposium in Dresden, Band 1, S.272 ff., September 2002.
- [6] FUNK, GRUNEWALD, „*Die thermodynamischen Grundlagen des numerischen Simulationsprogrammes DELPHIN*“, Beitrag zum 11. Bauklimatischen Symposium in Dresden, Band 2, S.491 ff., September 2002.

Literatur

JOSUTTIS, N., „*The C++ Standard Template Library*“, Addison-Wesley, 1999.

MEYERS, S., „*Effektiv C++ programmieren*“, Addison-Wesley Longman, 1998.

Anhang A

A.1 Ableitung der Gleichung der Gesamtfuchtestromdichte bei einer Kondensatebene

Nach dem Umstellen nach der zu eliminierenden Durchfeuchtungshöhe $\Delta\theta_{e,k}^2$ und Gleichsetzen, kann die Gleichung für die Fuchtestromdichte ermittelt werden.

$$j^{m_{l+v}} = j_{1..k}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{l+v,i}}$$

$$j^{m_{l+v}} = j_{k+1..n}^{m_v} + \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2}$$

$$\Delta\theta_{e,k}^2 = 2 \cdot r_{l+v,i} \cdot (j_{1..k}^{m_v} - j^{m_{l+v}})$$

$$\Delta\theta_{e,k}^2 = 2 \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2 \cdot (j^{m_{l+v}} - j_{k+1..n}^{m_v})$$

$$2 \cdot r_{l+v,i} \cdot (j_{1..k}^{m_v} - j^{m_{l+v}}) = 2 \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2 \cdot (j^{m_{l+v}} - j_{k+1..n}^{m_v})$$

$$r_{l+v,i} \cdot j_{1..k}^{m_v} - r_{l+v,i} \cdot j^{m_{l+v}} = r_{l+v,e} \cdot G_k^2 \cdot j^{m_{l+v}} - r_{l+v,e} \cdot G_k^2 \cdot j_{k+1..n}^{m_v}$$

$$r_{l+v,i} \cdot j^{m_{l+v}} + r_{l+v,e} \cdot G_k^2 \cdot j^{m_{l+v}} = r_{l+v,i} \cdot j_{1..k}^{m_v} + r_{l+v,e} \cdot G_k^2 \cdot j_{k+1..n}^{m_v}$$

$$j^{m_{l+v}} = \frac{j_{1..k}^{m_v} \cdot r_{l+v,i} + j_{k+1..n}^{m_v} \cdot r_{l+v,e} \cdot G_k^2}{r_{l+v,i} + r_{l+v,e} \cdot G_k^2}$$

A.2 Ableitung der Gleichung für die Durchfeuchtungsbreite

Nachfolgend ist die Ableitung der Gleichung für die Durchfeuchtungsbreite im stationären Zustand ausgehend von den Geradengleichungen für den Sättigungsdampfdruck und dem Partialdruck gegeben.

$$\begin{aligned}
 p_{\text{sat}, i, k} - \frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{d_k} \cdot x &= p_{i, k} - j_k \frac{m_{i+v} \mu_k}{\delta_{\text{air}}} x \\
 p_{\text{sat}, i, k} - p_{i, k} &= \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{d_k} - j_k \frac{m_{i+v} \mu_k}{\delta_{\text{air}}} \right) x \\
 &= \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{d_k} - j_k \frac{m_{i+v} r_{v, k}}{d_k} \right) x \\
 \frac{p_{\text{sat}, i, k} - p_{i, k}}{r_{v, k}} &= \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_{v, k}} - j_k \frac{m_{i+v}}{d_k} \right) x \\
 &= \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_{v, k}} - j_k \frac{m_{i+v}}{d_k} \right) \frac{d_k - d_{\text{ovh}, k}}{d_k} \\
 \frac{p_{\text{sat}, i, k} - p_{i, k}}{r_v} - \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_v} - j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} \right) &= - \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_v} - j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} \right) \frac{d_{\text{ovh}, k}}{d_k} \\
 j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} - \frac{p_{i, k} - p_{\text{sat}, e, k}}{r_v} &= - \left(\frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_v} - j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} \right) \frac{d_{\text{ovh}, k}}{d_k} \\
 \left(j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} - \frac{p_{i, k} - p_{\text{sat}, e, k}}{r_v} \right) d_k &= \left(j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} - \frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_v} \right) d_{\text{ovh}, k} \\
 d_{\text{ovh}, k} &= d_k \left(\frac{j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} - \frac{p_{i, k} - p_{\text{sat}, e, k}}{r_v}}{j_k \frac{m_{i+v}}{r_v} - \frac{\Delta p_{\text{sat}, k}}{r_v}} \right)
 \end{aligned}$$

A.3 Ableitung der Gleichung für die Gesamtfeuchtestromdichte für zwei benachbarte Kondensationsebenen

Das Gleichungssystem der Gesamtstromdichten enthält zwei unbekannte Durchfeuchtungshöhen und die Gesamtstromdichte. Durch Elimination der Durchfeuchtungshöhen $\Delta\theta_{e,k+1}^2$ und $\Delta\theta_{i,k+1}^2$ kann die Gesamtstromdichte $j^{m_{iv}}$ berechnet werden. Die rechts neben den Gleichungen stehenden Terme stellen die vereinfachte Schreibweise der Variablen für die Ableitung dar.

$$\begin{aligned} j^{m_{iv}} &= j_{1..k}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2 \cdot r_{1+v,i}} & j &= j_i - \frac{\Delta\theta_{e,k}^2}{2r_i} \\ j^{m_{iv}} &= j_{k+1}^{m_v} - \frac{\Delta\theta_{e,k+1}^2 - \Delta\theta_{i,k+1}^2}{2 \cdot r_{w,k+1}} & j &= j_s - \frac{\Delta\theta_{e,s}^2 - \Delta\theta_{i,s}^2}{2r_s} \\ j^{m_{iv}} &= j_{k+2..n}^{m_v} + \frac{\Delta\theta_{i,k+2}^2}{2 \cdot r_{1+v,e}} & j &= j_e + \frac{\Delta\theta_{k+2}^2}{2r_e} \end{aligned}$$

Die erste und letzte Gleichung ergibt nach der Feuchtehöhe umgestellt

$$\begin{aligned} \Delta\theta_k^2 &= 2r_i(j_i - j) \\ \Delta\theta_{k+2}^2 &= 2r_e(j - j_e) \end{aligned}$$

Durch Anwendung der Feuchtesprungbedingungen lassen sich diese Feuchtehöhen in die Feuchtehöhen der durchfeuchteten Schicht umrechnen:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{e,s}^2 &= \frac{2r_i(j_i - j)}{G_1^2} \\ \Delta\theta_{i,s}^2 &= 2r_e(j - j_e)G_2^2 \end{aligned}$$

Eingesetzt in die Gesamtfeuchtestromgleichung der mittleren Schicht ergibt sich

$$\begin{aligned} j &= j_s - \frac{2 \cdot r_e(j - j_e) \cdot G_2^2}{2 \cdot r_s} + \frac{2 \cdot r_i(j_i - j)}{2 \cdot r_s \cdot G_1^2} \\ j \cdot r_s G_1^2 &= j_s r_s G_1^2 - r_e(j - j_e)G_1^2 G_2^2 + r_i(j_i - j) \\ j \cdot r_i + j \cdot r_s G_1^2 + j \cdot r_e G_1^2 G_2^2 &= j_i r_i + j_s r_s G_1^2 + j_e r_e G_1^2 G_2^2 \\ j \cdot (r_i + r_s G_1^2 + r_e G_1^2 G_2^2) &= j_i r_i + j_s r_s G_1^2 + j_e r_e G_1^2 G_2^2 \\ j &= \frac{j_i r_i + j_s r_s G_1^2 + j_e r_e G_1^2 G_2^2}{r_i + r_s G_1^2 + r_e G_1^2 G_2^2} \end{aligned}$$

Mit den ersetzten Abkürzungen ergibt sich die endgültige Gleichung zu

$$j^{\cdot m_{lv}} = \frac{j_i^{\cdot m_v} \cdot r_{lv, i} + j_{k+1}^{\cdot m_v} \cdot r_{w, k+1} G_k^2 + j_e^{\cdot m_v} \cdot r_{lv, e} \cdot G_k^2 G_{k+1}^2}{r_{lv, i} + r_{w, k+1} G_k^2 + r_{lv, e} \cdot G_k^2 G_{k+1}^2}$$

Anhang B

Es folgt der Ausdruck des Programmes COND, welcher die Berechnungsergebnisse für das im Abschnitt 10.8 erläuterte Beispiel zeigt. Dieses Beispiel ist dem Beitrag zum 11. Bauklimatischen Symposium (siehe [1]) von Prof. Dr.-Ing. habil. P. Häupl entnommen.