

Raumklima in einem gedämmten, unbeheizten Dachraum

Ursachenanalyse zum Schimmelbefall nach dem ersten Winter und Prognose für die Zukunft

1 Einleitung

Ein Einfamilienhaus sollte als Bungalow mit einem unbeheizten, belüfteten Dachraum erstellt werden. Auf Wunsch des Bauherrn sollte der Dachraum jedoch möglichst frostfrei gehalten werden, um ihn für bestimmte Lagerzwecke nutzen zu können. Die Bau-firma entschied sich aus diesem Grund dafür, den Dachraum zu dämmen, es wurde jedoch keine Heizung eingebaut. Aufgrund der Dämmung wurde die Dachkonstruktion mit einer raumseitigen Luftdichtheitsschicht ausgeführt.

Während des ersten Winters nach Fertigstellung wurden Schimmelschäden festgestellt. Sie hatten ihre Ursache im Austrocknen von Baufeuchte in Kombination mit zu geringem Luftwechsel im Dachraum. In der Folge wurden die Fußboden- und Dachaufbauten zu großen Teilen rückgebaut. Eine fachgerechte Schimmelsanierung wurde vorgenommen. Und nach mehrmonatiger Trocknung wurden die Konstruktionsaufbauten durch neue ersetzt. Zusätzlich wurde ein Raumluftfeuchte-gesteuerter Lüfter mit entsprechender Zuluftöffnung eingebaut.

Die Raumluftfeuchte im Dachraum hat sich seitdem zwischen 60 % und 65 % eingepegelt. Der eingebaute Lüfter hat eine dreistufige Steuerung. Liegt die Raumluftfeuchte unterhalb von 50 %, schaltet er ab. Zwischen 50 % und 65 % relativer Luftfeuchte läuft der Lüfter in der Grundstufe (35 m³/h), oberhalb von 65 % wird auf Höchststufe mit 60 m³/h geschaltet.

Tatsächlich läuft der Lüfter seit Einbau nahezu ununterbrochen. Dies veranlasste zu der Sorge, es könne nach wie vor ein Problem bestehen, das dazu führt, dass die Konstruktion nicht ohne technischen Zusatz (den Lüfter) funktioniert.

Vor diesem Hintergrund sollte eine bauphysikalische Studie klären, welche Einflüsse das Raumklima im Dachraum maßgeblich bestimmen und wie sich dieses unter den gegebenen Randbedingungen künftig voraussichtlich darstellen wird. Insbesondere galt es zu klären, woher die eingetragene Feuchtigkeit kommt, ob es weitere ggf. verdeckte Feuchtequellen gibt und ob und in welchem Umfang auch künftig mit einem Lüfterbetrieb gerechnet werden muss.

2 Bauphysikalische Überlegungen

Den Ergebnissen der Studie sollen einige bauphysikalische Überlegungen vorangestellt werden.

2.1 Dachraum: unbelüftet-beheizt versus unbeheizt-belüftet

Dachräume werden – etwas pauschal vereinfacht – entweder als beheizte Räume innerhalb der thermischen Gebäudehülle oder als unbeheizte Räume außerhalb der thermischen Hülle ausgeführt. Im ersten Fall liegen die Dachräume zwangsläufig auch innerhalb der Luftdichtheitsschicht des Gebäudes. Im zweiten Fall liegen sie außerhalb der Luftdichtheitsschicht und gelten als mit Außenluft belüftet.

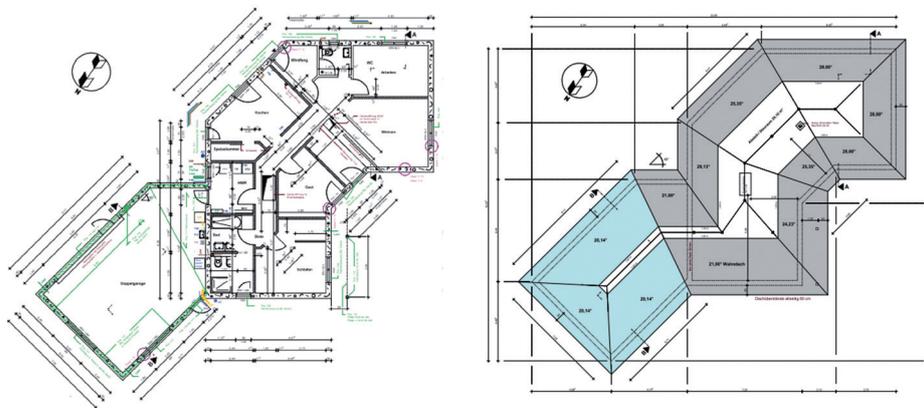
Unbeheizte, belüftete Räume sind bauklimatisch unbedenklich. Das Innenklima (Temperatur und rel. Luftfeuchte) folgt mit einer gewissen Dämpfung dem Außenklima. Es findet ein regelmäßiger Luftaustausch statt, der eine unzulässige Zunahme der Raumluftfeuchte verhindert. Die Räume sind im Allgemeinen trocken und als Abstellflächen geeignet. Sie sind allerdings großen Temperaturschwankungen ausgesetzt und die Temperatur kann im Winter auch unter die Frostgrenze sinken.

Beheizte Dachräume unterliegen denselben Gesetzmäßigkeiten wie alle anderen Räume innerhalb der thermischen Gebäudehülle und damit auch der Luftdichtheitsebene. Aufgrund der Luftdichtheit muss für einen ausreichenden Mindestluftwechsel gesorgt werden. Zusätzliche Feuchtelasten, die im Raum produziert oder in diesen eingebracht werden, müssen durch zusätzliches Lüften abgeführt werden.

Beheizte Räume funktionieren problemlos, wenn sie ausreichend beheizt und gelüftet werden. Werden sie nicht beheizt und/oder ausreichend gelüftet, kann es zu einer Zunahme der relativen Raumluftfeuchte kommen, da diese einerseits in Abhängigkeit von der Temperatur stark schwankt und andererseits mögliche (auch ungewollte) Feuchteinträge nicht ausreichend abgeführt werden können. Dies ist umso ausgeprägter, je größer die Temperaturschwankungen in diesem Raum sind. Räume mit geringer thermischer Speicherfähigkeit – wie beispielsweise Dachräume – sind anfälliger als massiv umbaute Räume.

Vor diesem Hintergrund sind Dachräume, die einerseits unbeheizt sind und andererseits trotzdem innerhalb der Luftdichtheitsschicht des Gebäudes liegen, zumindest als anfällig, wenn

Abb. 1: Grundriss des Gebäudes. Links Grundriss EG, rechts Grundriss des Dachgeschosses. Lediglich der Bereich über den Wohnräumen ist als Dachraum nutzbar und wärmegeklämt/luftdicht ausgebaut.



nicht als ungünstig anzusehen. Denn ein gewisser Feuchteintrag findet – vor allem während der kälteren Jahreszeit – immer statt. Sei es durch Dampfdiffusion aus dem beheizten in den nicht-beheizten Bereich, oder durch direkten Luft- (und Feuchte-)Eintrag aus dem beheizten Bereich über Leckagen oder durch das Öffnen von Türen. Der Temperaturunterschied zum beheizten Bereich begünstigt die jeweiligen Transportmechanismen deutlich.

Wird die eingetragene Feuchte nicht oder nur in geringem Maße abgeführt, kommt es zu einem Anstieg der relativen Luftfeuchte im Dachraum. Dies kann zu Schimmelbefall und anderen Feuchteschäden führen.

Derartige Räume werden deshalb eigentlich nicht geplant und gebaut. Entweder sie werden vollständig mit beheizt oder sie werden als unbeheizt-belüftet ausgeführt. Werden sie dennoch erstellt, sollten diese Räume unbedingt in die Lüftungskonzeption des Gebäudes bzw. der Wohnung einbezogen und dabei mit einem erhöhten Mindestluftwechsel berücksichtigt werden.

2.2 Austrocknung Einbaufeuchte

Eine zusätzliche Feuchtebelastung kann durch die Austrocknung von Einbaufeuchte in der ersten Zeit nach der Erstellung entstehen. Hierbei sind in erster Linie Konstruktionen zu berücksichtigen, deren Herstellung oder Einbau mit Wasserzusatz erfolgt (Beton, Mauerwerk, Putz). Aber auch das Einbringen von Materialien, die im Einbauzustand einen Feuchtegehalt oberhalb der hygroscopischen Ausgleichsfeuchte aufweisen – dies ist häufig bei Holz der Fall – geht mit dem Einbringen einer zusätzlichen Feuchtelast einher.

Je nach Konstruktion und Lüftung trocknet diese Einbaufeuchte innerhalb einiger Monate oder weniger Jahre aus.

Unbeheizte Räume, die als luftdicht innerhalb der thermischen Gebäudehülle ausgeführt sind, sind hierbei besonders empfindlich. Infolge des nutzungsbedingt gering ausfallenden Luftwechsels wirkt sich die Feuchtebelastung stärker aus, als bei anderen Räumen. Bleibt der Raum zudem unbeheizt, verstärkt das die Feuchteauswirkung und reduziert zusätzlich die durch Lüftung abgeführte Feuchtemenge.

3 Vorgehensweise

Anhand der bauphysikalischen Überlegungen wird deutlich, dass es ungünstig ist, einen unbeheizten Raum, insbesondere einen unbeheizten Dachraum, innerhalb der thermischen Gebäudehülle, also wärmegeklämt und luftdicht auszuführen.

Um einerseits Lehren aus dem hier beschriebenen Beispiel ziehen und andererseits die zu erwartende raumklimatische Belastung der kommenden Jahre abschätzen zu können, wurden die qualitativ beschriebenen Einflüsse rechnerisch quantifiziert und schließlich auch raumklimatischen Messdaten gegenübergestellt.

Es wurde ein mehrstufiges Vorgehen gewählt, bei dem zunächst rechnerisch untersucht wurde, welchen Beitrag (Größenordnung) mögliche Feuchtequellen zur relativen Luftfeuchte des Dachraumes liefern können. In einem zweiten Schritt wurde mit Hilfe eines hygrothermischen Raumklimamodells ebenfalls rechnerisch abgeschätzt, welches Raumklima sich damit unter Berücksichtigung des Luftwechsels und des Außenklimas einstellt.

Für einen Zeitraum von zwei Monaten konnten an dem Gebäude Messdaten des Dachraum- und Außenklimas aufgezeichnet werden. Diese Messdaten wurden mit den Ergebnissen des Raumklimamodells verglichen. Die Modellierung wurde daran kalibriert, um schließlich anhand eines umfangreicheren Klimadatensatzes eine Prognose für das zu erwartende Raumklima zu erstellen.

3.1 Gebäude und Geometrie

Das Gebäude, das innerhalb der Studie betrachtet wird, ist ein eingeschossiger Bungalow, der 2011 im Großraum Berlin errichtet wurde. Abb. 1 zeigt schematisch die Grundrisse des Gebäudes. Aufgrund der komplexen Grundriss- und Raumgeometrie wurden vereinfachend folgende Flächen und das Volumen für den zu betrachtenden unbeheizten, unbelüfteten Dachraum angesetzt:

- Grundfläche Decke über EG 120 m²
- Volumen des Dachraumes 80 m³
- Dachfläche Ost (vereinfacht) 70 m²
- Dachfläche West (vereinfacht) 70 m²

3.2 Analyse möglicher Feuchtequellen

Folgende Feuchtequellen wurden hinsichtlich ihres Feuchteintrags in den Dachraum analysiert:

- Einbaufeuchte (Betondecke, weitere Materialien wie Holz, Zellosedämmung),
- Dampfdiffusion durch die Geschosdecke,
- Leckagen aus dem beheizten Gebäudeteil.

Die Analyse erfolgte hinsichtlich des Austrocknungs- und Feuchtetransportverhaltens mit Hilfe der numerischen Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes durch Bauteile. Der Feuchteintrag durch Leckagen aus beheizten Gebäudeteilen wurde anhand typischer Leckagekoeffizienten und Druckdifferenzen abgeschätzt.

3.2.1 Einbaufeuchte und Feuchtedurchgang

Die Simulationsberechnungen zur Bewertung des Feuchteintrags durch die Bauteile wurden mit Hilfe der Software Delphin für gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport nach [4] auf Grundlage der WTA Merkblätter 6-1 und 6-2 durchgeführt. Das Programm erlaubt es, das Wärme- und Feuchteverhalten von ein- und zweidimensionalen Konstruktionsdetails unter stationären und instationären klimatischen Randbedingungen zu berechnen. Dabei werden sowohl der Wärme- und Feuchtetransport, als auch die Wärme- und Feuchtespeicherung berücksichtigt.

Die Geschossdecke wurde als Konstruktion eingegeben (16cm Betondecke, unterseitig mit einem Gipsputz versehen, auf die eine Holzständerkonstruktion aufgebracht wurde). Für den weiteren Aufbau wurden zwei Varianten unterschieden:

- der Originalzustand mit 16cm Mineralwolldämmung und OSB-Abdeckung,
- der Sanierungszustand mit Dielung und 16cm Zellulose-Einblasdämmung.

Beide Konstruktionsvarianten wurden mit zwei verschiedenen Anfangsbedingungen berechnet:

- Start bei Ausgleichsfeuchte (normal-trocken, entspricht 80 % Luftfeuchte),
- Start mit erhöhtem Einbaufeuchtegehalt der Betondecke.

Das Raumklima im Wohnbereich unter der Decke wurde konstant mit 20°C und 50 % rel. Luftfeuchte angesetzt. Für den Dachraum wurde die Temperatur im Jahresgang sinusförmig schwankend zwischen 5°C im Februar und 25°C im August angenommen. Die relative Luftfeuchte im Dachraum wurde konstant mit 65 % berücksichtigt. Die Berechnungen bilden einen Zeitraum von jeweils fünf Jahren ab. Rechnungsbeginn ist der 1. Oktober.

3.2.2 Feuchteintrag durch Leckagen

Obwohl allgemein von Luftdichtheit und Luftdichtheitsebene gesprochen wird, sind Gebäude niemals komplett luftdicht. Die sogenannte Luftdichtheitsebene der Gebäudehülle soll den ungewollten Luftaustausch mit der Außenluft soweit begrenzen, dass die Auswirkungen auf den Gebäudeenergiebedarf und bauphysikalische Belange (Behaglichkeit, Schutz der Konstruktion) innerhalb vorgegebener Grenzen bleiben.

Insbesondere die Öffnungen wie Fenster und Türen weisen stets eine gewisse Undichtigkeit auf. Ihr Maß kann durch den sogenannten Leckagekoeffizienten C quantifiziert werden. Typische Werte für Leckagekoeffizienten unterschiedlicher Gebäudeelemente sind u. a. in [2] und [3] angegeben.

Für die Abschätzung der Größenordnung eines möglichen Feuchteintrages in den Dachraum durch Leckagen wurde zunächst nur die Türöffnung mit ihrer Fugenlänge l betrachtet. Für sie wurden entsprechende Werte angesetzt und in Kombination mit der Bandbreite möglicher Druckdifferenzen ΔP_{wi} nach folgender Formel hinsichtlich des in den Dachraum eingetragenen Luftvolumenstromes \dot{V} ausgewertet.

$$\dot{V} = l \cdot C \cdot \Delta P_{wi}^{2/3}$$

Kann die Raumklimabilanzierung die gemessenen Luftfeuchten auf Grundlage der Feuchteinträge aus Dampfdiffusion, Austrocknung und Leckage nicht nachvollziehen, wäre dies ein Hinweis darauf, dass weitere Leckagen für einen Feuchteintrag in den Dachraum verantwortlich sind, die dann ggf. mit Hilfe der Leckageortung im Rahmen einer Luftdichtheitsprüfung zu lokalisieren wären.

3.3 Raumklimabilanzierung

Anhand der bestimmten Wärme- und Feuchteinträge, des Raumvolumens, des Luftwechsels und des Außenklimas wurde eine einfache Bilanzierung des Raumklimas vorgenommen. Sie liefert die sich einstellenden Werte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte im Raum.

Grundlage der Bilanzierung ist, dass die zeitlichen Änderungen klein sind und sich stets ein Gleichgewicht sowohl hinsichtlich der Temperatur, als auch hinsichtlich der Feuchtemasse

im Raum einstellt. Die Berechnungszeitschritte mussten deshalb entsprechend klein gewählt werden, sodass diese Bedingung erfüllt ist. Dann ist die Änderung der Zustandsgröße (Temperatur oder Feuchte) gleich der Summe aller Zu- und Abflüsse.

Als Zu- und Abflüsse wurden die Beiträge berücksichtigt, die über die Dachfläche (Wärmeleitung, keine Feuchte), die Geschossdecke (Wärmeleitung, Dampfdiffusion) und die Dachluke (Leckagestrom mit Wärme- und Feuchteintrag) eingetragen bzw. abgeführt werden. Hinzu kam der Luftaustausch mit der Außenluft infolge des feuchtegeregelten Lüfters.

Vernachlässigt wurden die Einflüsse der Sonneneinstrahlung (Dach, Dachfenster) sowie sämtliche Speichereffekte. Die Vernachlässigung der solaren Einstrahlung führt vor allem im Sommer zu Abweichungen. Die Vernachlässigung der Speichereffekte führt dazu, dass die berechneten Ergebnisse sehr viel größeren Schwankungen unterliegen als die tatsächlichen bzw. die gemessenen Daten. Die Eingangsgrößen der Berechnung waren damit neben den Anfangsbedingungen das Außenklima (Temperatur und relative Luftfeuchte) sowie die jeweiligen energetischen und hygrischen Beiträge in Abhängigkeit vom Raumklima.

3.4 Messdaten des Raumklimas

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Datenlogger installiert. An einer Messstelle wurden Temperatur und relative Luftfeuchte im Dachraum gemessen. Die zweite Messstelle zeichnete dieselben Größen des Außenklimas auf. Die Daten wurden ausgewertet und interpretiert. Zudem wurden vom Bauherrn in regelmäßigen Abständen Temperatur und Raumluftfeuchte im Dachraum notiert und ebenfalls in die Auswertung einbezogen.

4 Ergebnisse

4.1 Feuchtequellen

4.1.1 Einbaufeuchte und Feuchtedurchgang

Als Ergebnisse der numerischen Simulation wurden die zeitlichen Verläufe der relativen Luftfeuchte an verschiedenen Stellen innerhalb der Konstruktion, sowie die Wärme- und Feuchteströme durch die Konstruktion hindurch in den Dachraum ausgewertet. Für die Ergebnisdiskussion werden zwei Varianten herausgegriffen:

- Betondecke mit Mineralwolle und OSB-Platte – Beton mit hoher Einbaufeuchte,
- Betondecke mit Zellulose-Einblasdämmung und Holzdielung – alle Baustoffe mit Ausgleichsfeuchte.

Anhand der Ergebnisse sind u.a. zwei Dinge erkennbar. Zum einen wird deutlich, dass die Einbaufeuchte der Betondecke zum größten Teil innerhalb des ersten Jahres austrocknet. Die Werte erreichen bereits nach einem Jahr Werte von < 90 %, siehe Abb. 2. Im zweiten und dritten Jahr pegelt sich der Feuchtegehalt im Bereich der normalen Ausgleichsfeuchte (80 %) bzw. sogar deutlich darunter ein. Der Vergleich der Varianten mit und ohne Berücksichtigung der erhöhten Einbaufeuchte des Betons ergab, dass die Auswirkung der Einbaufeuchte maximal zwei Jahre lang spürbar ist.

Zum anderen zeigen die Ergebnisse den Einfluss der jeweils relativ dichten Fußbodenkonstruktion (OSB-Platte bzw. Dielung). Diese führt dazu, dass sich die in Richtung Dachraum diffundierende Feuchte unterhalb dieser Schicht staut. In der Folge ist vor

allein während der kälteren Jahreszeit die relative Luftfeuchte an der Unterseite der OSB-Platte bzw. der Dielung sehr hoch. Dies erklärt nicht nur das zwangsläufige Auftreten des Schimmelpilzbefalls in diesem Bereich (vgl. grüne Kurve in Abb. 2), sondern zeigt auch die Sensitivität der Konstruktion nach der Sanierung (vgl. grüne Kurve in Abb. 3). Denn auch hier werden allein infolge der winterlichen Dampfdiffusionsprozesse immer wieder Werte von über 80 % Luftfeuchte erreicht. Aufgrund der dicht anliegenden Zellulose-Einblasdämmung dürfte sich dies jedoch nicht so kritisch auswirken, wie bei der Mineralwolle. Eine Lochung oder die nicht perfekt dichte Ausführung der Dielung würde weitere Entspannung der Problematik bewirken.

Die infolge des Wärme- und Feuchtetransportes über die Konstruktionsgrenze in den Dachraum abgegebenen Wärme- und Feuchteströme sind in Abb. 4 für die insgesamt vier berechneten Varianten zusammengefasst. Auch hier wird deutlich, dass der Großteil der Einbaufeuchte innerhalb des ersten Jahres austrocknet. In den Folgejahren pegelt sich die Feuchteabgabe auf dem durch die Dampfdiffusion bestimmten Niveau ein.

Die Auswertung der Wärme- und Feuchteströme über die Deckenkonstruktion in den Dachraum hinein ergibt folgende in Tabelle 1 zusammengefasste Werte. Diese werden jeweils bei der hygrothermischen Raumklimabetrachtung als Wärme- bzw. Feuchtequelle in den Raum berücksichtigt.

Tab. 1: Wärme- und Feuchteabgabe in den Dachraum über die Decke

Prozess	Spezifische Werte	Absolutwerte (120 m ²)
Wärmeabgabe (Wärmeleitung)	2 – 3,5 W/m ²	240 – 420 W
Feuchteabgabe (Austrocknung)	0,3 – 0,4 g/(m ² h)	36 – 48 g/h
Feuchteabgabe (Diffusion)	0,05 – 0,1 g/(m ² h)	6 – 12 g/h

4.1.2 Feuchteeintrag durch Leckagen

Als Leckage wird die Dachluke betrachtet, über die der Zugang in den Dachraum ermöglicht wird. Es wird davon ausgegangen, dass diese im Normalfall geschlossen ist. Als Leckage ergibt sich dann die umlaufende Fuge mit einer Länge von 4,20 m (Lukenmaß: 70 cm x 140 cm).

Typische Werte für den Leckagekoeffizienten derartiger Öffnungen sind schwer zu finden. In [3] sind Werte für Fenster und Türen angegeben. Für dicht ausgeführte Fenster mit entsprechenden Dichtungslippen sind dort Leckagekoeffizienten von $C = 0,5 \dots 1 \text{ m}^3/(\text{mhPa}^{2/3})$ angegeben, die hier als Grundlage verwendet werden sollen. Die Druckdifferenz zwischen Wohn- und Dachraum ist schließlich die dritte Einflussgröße, die es abzuschätzen gilt. In DIN 1946-6 [1] sind Werte zwischen 2 und 7 Pa für die Berechnung des Infiltrationsluftwechsels angegeben, die hier ebenfalls berücksichtigt werden sollen. Eine Übersicht der angesetzten Eingangsgrößen gibt Tabelle 2.

Tab. 2: Kennwerte der angenommenen Leckage (Dachluke)

Kenngröße	angesetzte Werte
Leckagekoeffizient C	0,5 – 1 m ³ /(m h Pa ^{2/3})
Fugenlänge l	4,20 m
Druckunterschied ΔP_{wi}	2 – 7 Pa

Wertet man diese Daten aus, ergeben sich für die Dachluke die in Tabelle 3 zusammengefassten Werte für den Wärme- und Feuchteeintrag in den Dachraum.

Tab. 3: Wärme- und Feuchteeintrag in den Dachraum über die Leckage

Prozess	Werte
Luftströmung in den Dachraum \dot{V}	3 – 15 m ³ /h
Wärmeeintrag	10 – 60 W
Feuchteeintrag (g_{Wasser}/h)	30 – 130 g/h

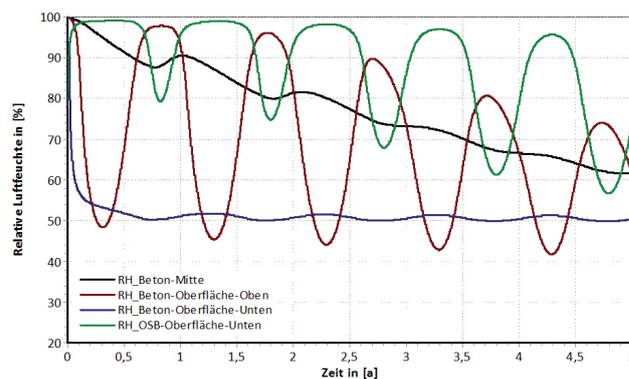


Abb. 2: Relative Luftfeuchte an verschiedenen Stellen innerhalb der Konstruktion für die Variante Beton (hoher Einbaufeuchtegehalt) mit Miwo + OSB.

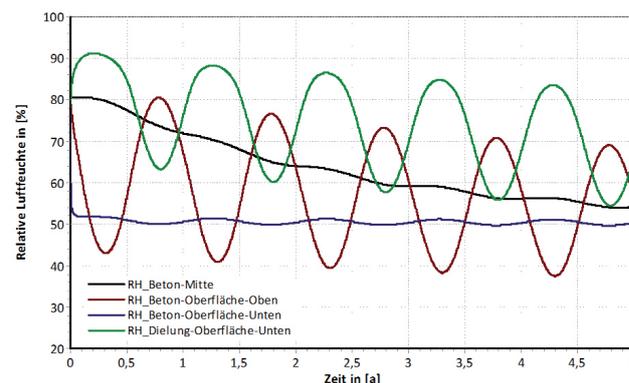


Abb. 3: Relative Luftfeuchte an verschiedenen Stellen innerhalb der Konstruktion für die Variante Beton (Ausgleichsfeuchte) mit Zellulose + Dielung.

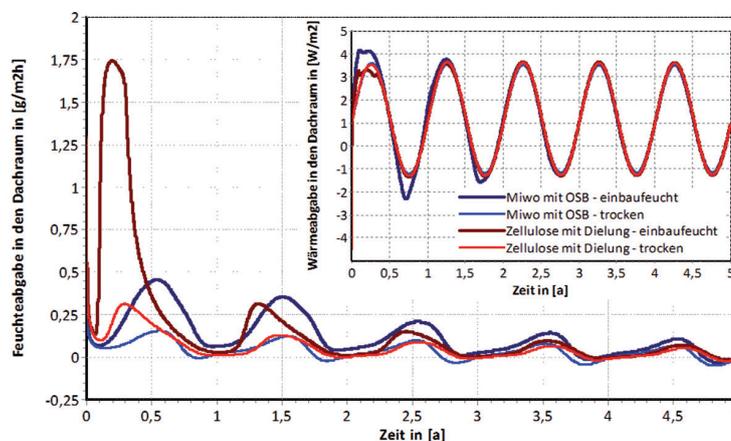


Abb. 4: Feuchteabgabe der Deckenkonstruktion bzw. durch die Konstruktion hindurch in den Dachraum. Zeitliche Verläufe für die vier Varianten. Kleine Grafik: Wärmeabgabe durch die Konstruktion hindurch in den Dachraum. Positive Wärmeströme sind nach oben (in den Dachraum), negative nach unten (in die Konstruktion hinein) gerichtet.

4.2 Messdaten

Nach der Sanierung des Dachraumes und dem Einbau des Lüfters wurden vom Bauherrn in unregelmäßigen Abständen Temperatur und relative Luftfeuchte im Dachraum gemessen. Die Daten zeigen, dass die Temperatur im Dachraum deutlich durch das Außenklima beeinflusst wird und im Winter zwischen 5 und 15°C schwankt, bei Außentemperaturen um und unter 0°C liegt die Raumtemperatur bei maximal 10°C.

Die relative Luftfeuchte unterliegt demgegenüber deutlich geringeren Schwankungen. Sie bewegt sich zwischen 60 und 70% und zeigt über den Winter eine leicht abnehmende Tendenz.

Ende März 2013 wurden die beiden Datenlogger installiert. Das Messintervall betrug 15 Minuten für Temperatur und relative Luftfeuchte. Neben dem Klima im Dachraum wurde auch das Außenklima erfasst.

Im Vergleich liegen die Werte der Handmessung dabei jeweils etwas niedriger, zeigen jedoch insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Daten der Datenlogger.

Die Daten des Raum- und Außenklimas umfassen knapp zwei Wochen mit niedrigen Außentemperaturen, bevor das Frühlingswetter mit entsprechend höheren Temperaturen einsetzte. Anhand der Messdaten selbst sind keine untypischen oder kritischen Verhältnisse ablesbar.

4.3 Raumklimaberechnung

Eine Berechnungssoftware, mit deren Hilfe das Raumklima berechnet werden kann, gibt es in der erforderlichen Genauigkeit nur für rein thermische Betrachtungen. Modelle, bei denen die Feuchte ebenfalls berücksichtigt wird, erlauben leider nur pauschale und zudem meist konstante Ansätze für die einzelnen Größen wie Luftwechsel oder Wärme- und Feuchteeintrag durch

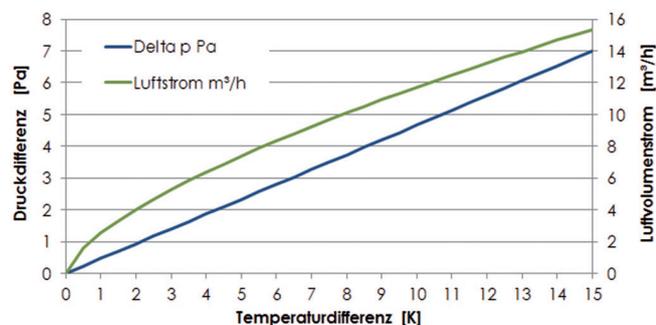


Abb. 5: Druckdifferenz und sich daraus errechnender Luftvolumenstrom durch die Leckage der Dachluke in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Dach- und Wohnraum.

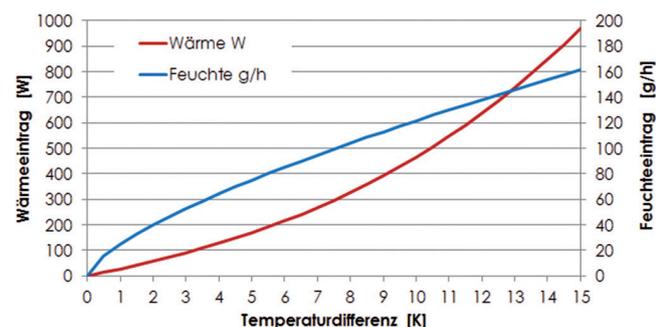


Abb. 6: Wärme- und Feuchteeintrag in den Dachraum in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Dach- und Wohnraum. Die Kurven beinhalten sowohl den Anteil aus der Leckage, als auch aus den Transportvorgängen durch die Decke hindurch (Wärmeleitung und Dampfdiffusion).

Leckagen. Daher wurde eine eigene Modellierung aufgestellt und für kleine Zeitschritte (5 min) gelöst.

Die Modellierung wurde anhand der Messdaten kalibriert und verfeinert. In der Folge wurden insbesondere die Beiträge aus dem beheizten Wohnbereich temperaturabhängig berücksichtigt.

4.3.1 Angesezte Eingangsgrößen

Der Wärmeaustausch über das Dach wurde für alle Innen- und Außentemperaturen berücksichtigt. Die Wärme- und Feuchteinträge über die Decke und die Dachluke wurden nur von unten nach oben berücksichtigt. Erreicht die Temperatur im Dachraum die Wohnraumtemperatur, werden diese Einträge zu Null. Eine Wärme- oder Feuchteabgabe aus dem Dachraum in den Wohnraum wurde nicht berücksichtigt.

Für die Wärme- und Feuchteinträge durch die Leckage wurde ein temperaturabhängiger Luftdruckunterschied angesetzt, in dessen Folge sich dann ebenfalls in Abhängigkeit der Temperatur ein darstellbarer Luftvolumenstrom in den Dachraum ergibt. Beide Größen sind in ihrer Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Dach- und Wohnraum in Abb. 5 dargestellt.

Aus dem Volumenstrom leiten sich die Wärme- und Feuchtebeiträge über die Leckage ab. Zu diesen sind die ebenfalls temperaturabhängigen Beiträge der Wärmeleitung bzw. Dampfdiffusion durch die Decke hinzuaddiert worden. Die so berücksichtigten Gesamtbeiträge sind über der Temperaturdifferenz jeweils in Abb. 6 dargestellt.

Mit diesen Eingangsgrößen und Berechnungsparametern wurde zunächst das tatsächliche Dachraumklima für den Zeitraum verfügbarer Klimadaten berechnet. Anhand dieser Nachrechnung konnten die Einflussparameter überprüft und (im Rahmen der Gesamtgenauigkeit) validiert werden.

In einem zweiten Schritt wurde das Dachraumklima für einen längeren Zeitraum anhand des Testreferenzklimas von Potsdam berechnet, um daraus Aussagen abzuleiten, wie sich das Raumklima künftig und langfristig darstellen wird.

4.3.2 Nachrechnung der Messdaten

Zunächst wurde das Raumklima mit konstanten Wärme- und Feuchtebeiträgen über die Leckage berechnet. Es zeigte sich jedoch, dass dies zu ungenau ist und zu größeren Abweichungen zwischen gemessenem und berechnetem Raumklima führt.

Daraufhin wurden die Abhängigkeiten von der Temperaturdifferenz in die Modellierung integriert. Die entsprechenden Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten.

Leckage Dachluke

Eine der eingangs formulierten Fragestellungen an diese Modellierung ist die Aussage zu Umfang und Durchlässigkeit bestehender Leckagen. Deshalb wurden die Berechnungen für unterschiedliche Leckagekoeffizienten des Dachlukenanschlusses durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen sowohl hinsichtlich der Temperatur (Abb. 7) als auch hinsichtlich der relativen Luftfeuchte (Abb. 8), dass bei der Bilanzierung Speichereffekte vernachlässigt wurden. Die Schwankungen im Außenklima wirken sich bei der Bilanzierung sehr viel schneller und auch stärker aus, als die Messdaten dies wiedergeben. Zur Reduktion der Auswirkung der tageszeitlichen Temperatur- und Feuchtschwankungen des Außenklimas auf das berechnete Raumklima wurden die Ergebnisse als Tages- bzw. Halbtagesmittelwerte ausgegeben.

Bei der Feuchte sind die Schwankungen bei den berechneten Verläufen dennoch sehr groß und zeigen eine deutliche Beeinflussung durch das Außenklima, während die Messdaten im Tagesgang kaum schwanken und sich auch im Gesamttrend nur sehr langsam verändern. Dies liegt daran, dass der Dachraum eine sehr hohe hygroskopische Feuchtespeicherfähigkeit besitzt (viel Holz und hygroskopische Materialien), durch welche die kurzzeitigen Änderungen sehr stark abgepuffert werden.

Die thermische Speicherfähigkeit ist im Vergleich zur Feuchtespeicherfähigkeit gering. Daher sind die Temperaturschwankungen bei den Messdaten größer und lassen hier bereits den Tagesgang erkennen. Die Berechnungsergebnisse sind als Mittelwerte über zwölf Stunden dargestellt, daher schwanken sie verhältnismäßig wenig, folgen jedoch sehr viel schneller als die Messdaten dem Trend des Außenklimas.

Anhand der Temperaturverläufe ist zudem erkennbar, dass die solare Einstrahlung ebenfalls vernachlässigt wurde. Beim Übergang in die wärmere, weitgehend von sonnigem Wetter geprägte Periode nimmt die gemessene Raumtemperatur trotz z.T. sehr niedriger nächtlicher Außentemperaturen schneller zu bzw. langsamer ab, als die berechnete Raumtemperatur.

Interessant und relevant für die Validierung des angesetzten Raumklimamodells ist vor allem der Zeitraum, in dem die Außentemperaturen niedrig sind und dadurch die Beiträge zum Wärme- und Feuchteeintrag in den Dachraum aus dem darunter liegenden Wohnbereich eine größere Relevanz besitzen. Daher sind zur Bewertung der Güte der Modellierung vor allem die Ergebnisse der ersten zwei Wochen wichtig.

Die Dichtheit der Dachluke wurde durch die Leckagekoeffizienten in der Berechnung in drei Stufen zwischen $C = 0,5 \text{ m}^3 / (\text{mhPa}^{2/3})$ (sehr dicht) bis $C = 2 \text{ m}^3 / (\text{mhPa}^{2/3})$ (weniger dicht) berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur weniger sensitiv auf die Genauigkeit der Berücksichtigung (pauschal oder temperaturunterschiedsabhängig) reagiert, als die relative Luftfeuchte. Die berechneten Temperaturverläufe liegen relativ eng beieinander. Die beste Übereinstimmung mit den Messdaten kann hier mit einem Leckagekoeffizienten von $C \approx 1 \text{ m}^3 / (\text{mhPa}^{2/3})$ erzielt werden.

Bei der relativen Luftfeuchte sind die Unterschiede zwischen den betrachteten Dichtheitsstufen sehr viel ausgeprägter und liegen während der ersten Wochen bei knapp 55 % bei extrem dichtem Anschluss ($C = 0,5$), bei rund 60 % bei dichtem ($C = 1,0$), und bei rund 66 % bei weniger dichtem Anschluss der Dachluke ($C = 2,0$). Die beste Übereinstimmung mit den Messdaten wird wiederum mit einem Leckagekoeffizienten von $C \approx 1$ erzielt.

Austrocknung Baufeuchte

Nachdem Einfluss und Durchlässigkeit der Dachlufteuge quantifiziert werden konnten, wurde zusätzlich untersucht, welchen weiteren maximalen Beitrag die Austrocknung der Baufeuchte auf das Raumklima liefern würde. Dazu wurde pauschal der anhand der Simulationsberechnungen ermittelte und in Tabelle 1 angegebene Wert von $0,4 \text{ g} / (\text{m}^2 \text{h})$ angesetzt. Als Maß für die Dichtheit der Dachlufteuge wurde der Leckagekoeffizient von $C = 1 \text{ m}^3 / (\text{mhPa}^{2/3})$ zu Grunde gelegt.

Auf die Raumlufttemperatur hat der zusätzliche Feuchteeintrag so gut wie keine Auswirkung. Bei der relativen Raumluftfeuchte bewirkt die Austrocknung von Baufeuchte eine Zunahme der Luftfeuchte um rund 5 % bei niedrigen Außentemperaturen (Abb. 9). Bei höheren Außentemperaturen fällt die Zunahme etwas geringer aus.

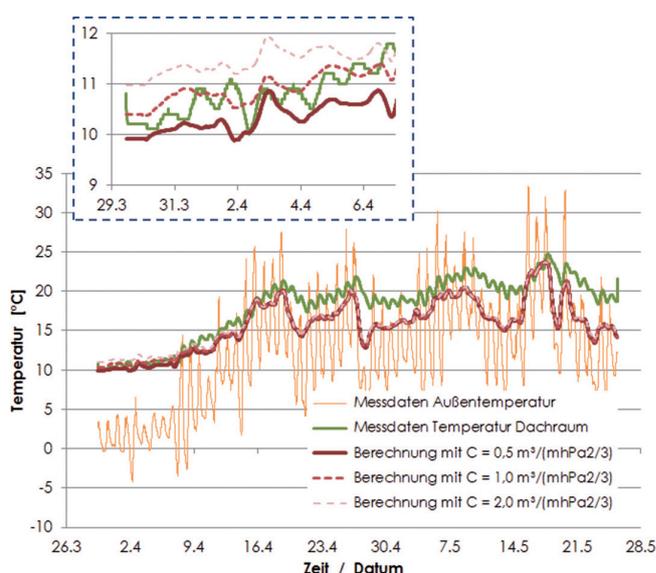


Abb. 7: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturverläufe im Dachraum bei unterschiedlich angesetzten Leckagekoeffizienten C für die Dachluke.

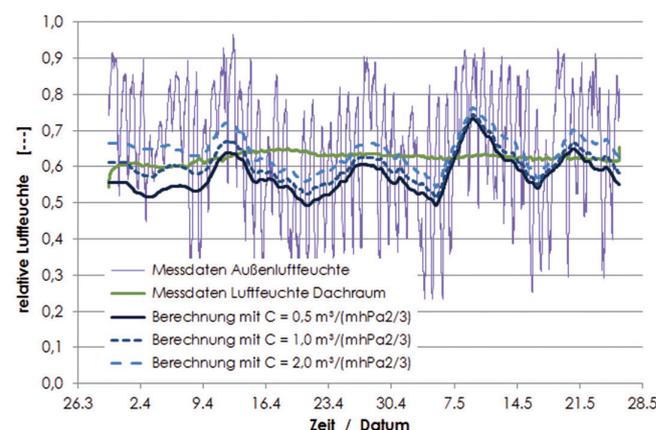


Abb. 8: Vergleich gemessener und berechneter relativer Luftfeuchte im Dachraum bei unterschiedlich angesetzten Leckagekoeffizienten C für die Dachluke.

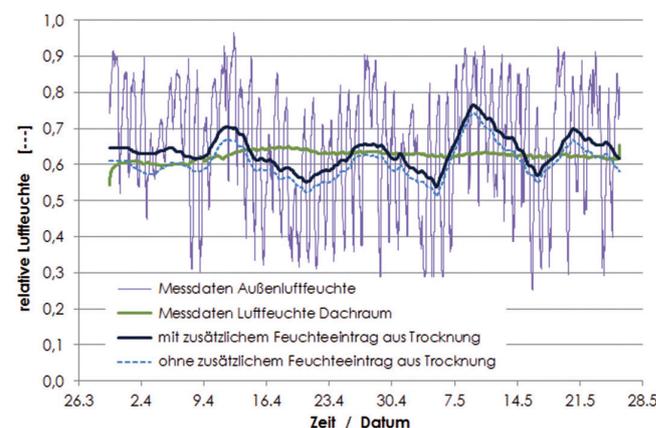


Abb. 9: Vergleich gemessener und berechneter relativer Luftfeuchte im Dachraum mit und ohne zusätzlichem Feuchteeintrag aus der Austrocknung ($C = 1$).

Die Ergebnisse sowohl der hygrothermischen Bauteilberechnung (vgl. Abb. 4), als auch der Raumklimaberechnung haben gezeigt, dass die Austrocknung von Baufeuchte drei Jahre nach Fertigstellung keinen nennenswerten Beitrag mehr zur Feuchtebilanz des Dachraumes liefert.

Zwischenfazit aus den Ergebnissen

Aus den Ergebnissen lassen sich zwei entscheidende Schlüsse ziehen: Zum einen können die Messdaten mit Hilfe der angesetzten Modellierung gut nachvollzogen werden. Da die Beiträge über die Dachflächen und den Luftaustausch feststehende Größen der Konstruktion sind, belegt dies vor allem die Richtigkeit der angesetzten temperaturabhängigen Wärme- und Feuchteinträge in den Dachraum aus dem darunterliegenden Wohnbereich. Demgegenüber sind die strahlungs- und speicherfähigkeitsbedingten Abweichungen plausibel erklärbar. Die Modellierung ist damit geeignet, die gemessenen Verhältnisse nachzubilden und kann verwendet werden, um eine längerfristige Prognose bezüglich des zu erwartenden Dachraumklimas abzugeben.

Zum anderen erlauben die Ergebnisse eine Bewertung der vorhandenen Feuchtequellen. Die Messergebnisse können am besten nachvollzogen werden, wenn für die Dachluke ein Leckagekoeffizient von $C \approx 1 \text{ m}^3/(\text{mhPa}^{2/3})$ angesetzt wird. Das entspricht einer für Fenster normaldichten Ausführung, für eine Dachluke ist dies als ein sehr guter Wert anzusehen. Als Feuchtequellen wurden hier nur die Dampfdiffusion und die konvektiven Beiträge über die Leckage berücksichtigt.

Der Ansatz einer zusätzlichen Feuchtelast für das Austrocknen von Baufeuchte führt zu deutlich höheren rechnerischen Raumluftfeuchten, die nicht mehr mit den Messdaten in Übereinstimmung zu bringen sind (bzw. nur dann, wenn im Gegenzug für die Dachluke ein unrealistisch dichter Leckagekoeffizient angesetzt wird).

Das bedeutet, die Baukonstruktion gibt keine erhöhten Feuchtelasten in den Dachraum ab. Die eingetragene Feuchtigkeit ist auf die normalen Diffusions- und Konvektionsvorgänge zurückzuführen, die bei bestehenden Temperaturdifferenzen zwischen beheizten und unbeheizten Räumen entstehen.

4.3.3 Prognose mit Klima TRY Potsdam

Die zuvor erläuterten und bestätigten Parameter der Modellierung wurden in einem weiteren Schritt auf die Klimadaten des Testreferenzjahres (TRY) von Potsdam angewendet, das gemäß des Deutschen Wetterdienstes (DWD) für die Region um Berlin repräsentativ ist. Berechnungsgrundlage bilden stündliche Werte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte.

Als Zeitraum wurde knapp ein Jahr von Ende September (Beginn der Heizperiode) bis Mitte Juni des Folgejahres gewählt, um einerseits eine komplette Heizperiode mit anschließendem Sommer abzubilden, gleichzeitig jedoch in der grafischen Darstellung die Ergebnisse noch einigermaßen überschaubar zu belassen.

Die Berechnungsergebnisse sind als Temperaturverläufe in Abb. 10 und als Verläufe der relativen Luftfeuchte in Abb. 11 dargestellt. Zur Bewertung der Bandbreite möglicher Temperatur- und Feuchtezustände wurde die Auswertung wieder für die drei verschiedenen Leckagekoeffizienten der Dachlukenfuge vorgenommen.

Die sich im Dachraum einstellenden Temperaturen bewegen sich im Winter zwischen 5°C und 15°C , im Sommer folgen sie dem Außenklima. Aufgrund des vernachlässigten Strahlungseintrages sind die berechneten Raumtemperaturen im Sommer vermutlich niedriger als in der Realität. Die winterlichen Temperaturen erscheinen demgegenüber realistisch und decken sich mit den Messdaten, insbesondere den vom Bauherrn während der gesamten Heizperiode gemessenen Daten.

Die berechneten relativen Luftfeuchteverläufe zeigen im Winter eine deutliche Differenzierung, während sie sich im Sommer einander annähern. Bei höherer Durchlässigkeit der Dachlukenfuge liegen die Werte der Raumluftfeuchte im Winter bei über 70 %. Eine dichtere Ausführung führt zu Werten zwischen 60 und 65 % relativer Luftfeuchte. Werte unterhalb von 60 % rel. Luftfeuchte werden im Winter praktisch nicht erreicht. Bei steigenden Außentemperaturen können sich (nur) dann im Dachraum niedrigere Werte einstellen, wenn die Außenluft selbst eine geringe rel. Luftfeuchte aufweist.

Anhand der Ergebnisse wird deutlich, dass die im Dachraum gemessenen Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse für die vorlie-

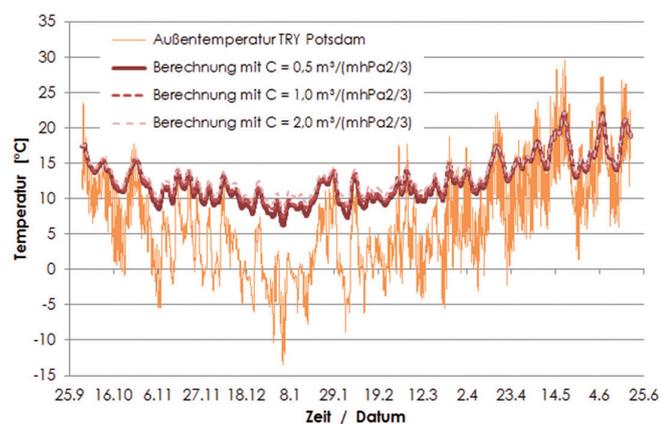


Abb. 10: Vergleich berechneter Temperaturverläufe im Dachraum bei Ansatz des Außenklimas TRY Potsdam und unterschiedlich berücksichtigten Leckagekoeffizienten C für die Dachluke.

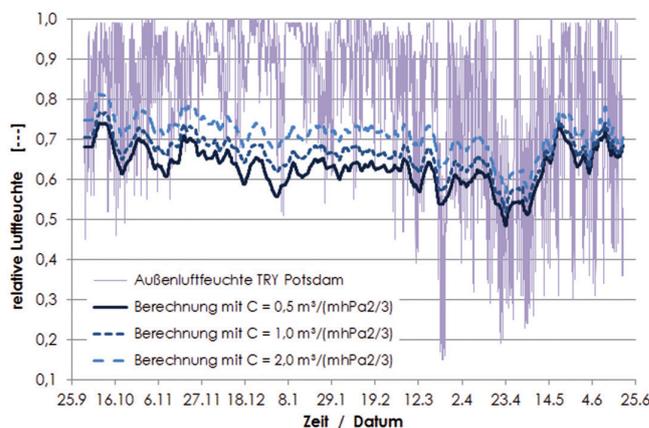


Abb. 11: Vergleich berechneter Luftfeuchteverläufe im Dachraum bei Ansatz des Außenklimas TRY Potsdam und unterschiedlich berücksichtigten Leckagekoeffizienten C für die Dachluke.

genden Bedingungen als völlig normal anzusehen sind. Es ist davon auszugehen, dass der Lüfter zumindest in der Grundstufe permanent läuft bzw. laufen muss, um die Feuchte in ausreichendem Maß zu begrenzen. Die große hygroskopische Speicherfähigkeit des Raumes wirkt sich bezüglich der Schimmelgefahr positiv aus, weil sich Schwankungen vor allem in der Übergangszeit nur sehr langsam in Form steigender Raumluftfeuchte bemerkbar machen. Dafür geht die Luftfeuchte trotz des hohen Luftwechsels auch während der kalten Jahreszeit nur geringfügig zurück.

5 Zusammenfassung

Bei dem Beispiel wurde ein unbeheizter Dachraum erstellt, der aus Gründen der gewünschten Frostfreiheit wärmegeklämt und luftdicht ausgeführt wurde. Kurze Zeit nach Fertigstellung wurden Schimmelschäden festgestellt, deren Ursache im Austrocknen von Baufeuchte und in einem zu geringen Luftwechsel liegen. Mit Hilfe der dargestellten Untersuchungen sollten einerseits die bauphysikalischen Zusammenhänge erläutert und andererseits quantifiziert werden, welche Einflüsse das Raumklima im Dachraum maßgeblich bestimmen und wie sich dieses künftig darstellen wird.

Anhand der dargelegten bauphysikalischen Überlegungen wurde deutlich – und die anschließenden Berechnungen bestätigten dies – dass es ungünstig ist, einen unbeheizten Raum, insbesondere einen unbeheizten Dachraum, wärmegeklämt und luftdicht auszuführen. Derartige Räume sind einerseits anfällig für Feuchteinträge über Leckagen und durch Dampfdiffusion. Andererseits werden sie üblicher Weise nur selten gelüftet, wodurch die Feuchte nur in geringem Maß abgeführt werden kann.

Die Analyse der Feuchtequellen zeigte die Größenordnung der verschiedenen Einflussgrößen auf. Während die Dampfdiffusion durch die Geschossdecke trotz der großen Fläche nur einen verhältnismäßig kleinen Beitrag liefert, kann der Feuchteintrag über Leckagen vor allem bei größeren Temperaturunterschieden zwischen beheizt und unbeheizt sehr groß werden. Die Austrocknung von Einbaufeuchte kann in der Anfangszeit (erstes Jahr) ebenfalls größere Feuchtemengen in den Raum einbringen, spielt später jedoch keine Rolle mehr.

Die am Objekt erfassten Messdaten des Raum- und Außenklimas zeigten keine untypischen oder kritischen Verhältnisse auf.

Für die rechnerische Modellierung des hygrothermischen Raumklimas wurden alle Daten zusammengefasst. Der Vergleich zwischen berechnetem und gemessenem Raumklima zeigte, dass die Modellierung mit den gewählten Ansätzen geeignet ist, die tatsächlichen Verhältnisse ausreichend genau nachzubilden. Der anhand der Rechnungen ermittelte Leckagekoeffizient der Dachlücke entspricht einer normaldichten Ausführung und ist als guter Wert anzusehen. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Baukonstruktion keine weiteren Feuchtelasten in den Dachraum abgibt.

Schließlich wurde auf Grundlage der bestätigten Parameter das sich einstellende Raumklima für einen längeren Zeitraum abgebildet. Dazu wurden die Klimadaten von Potsdam (TRY) verwendet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse im Dachraum auch langfristig auf dem aktuell beobachteten Niveau bleiben werden und dass dafür ein kontinuierlicher Luftwechsel erforderlich ist.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die hygrothermischen Verhältnisse im Dachraum unter den gegebenen Bedingungen normal sind. Die Ergebnisse lassen nicht auf zusätzliche, verborgene Feuchtequellen rückschließen. Sie weisen zudem der Konstruktion ein hohes Maß an hygrothermischer Dichtheit aus, das so für derartige Bauteile nicht unbedingt zu erwarten wäre. Aufgrund der bauphysikalischen Konstellation ist dennoch der (Dauer-)Einsatz des mechanischen Lüfters unerlässlich, um den Dachraum dauerhaft schimmelfrei zu halten.

Danksagung

Für die sehr angenehme Zusammenarbeit möchte ich mich bei Herrn Dieter Stricker von der ElbeHaus GmbH sehr herzlich bedanken.

Referenzen

- [1] DIN 1946-6:2009-05 Raumlufttechnik – Teil 6: Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung
- [2] DIN 4701-2:1983-3 Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden – Teil 2: Tabellen, Bilder, Algorithmen (alle DIN Normen Berlin: Beuth Verlag)
- [3] Lutz, P. et al.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall, Wärme, Feuchte, Licht, Brand, Klima. Stuttgart: Teubner, 5. Auflage 2002
- [4] Nikolai, A.; Fechner, H.; Grunewald, J.: Delphin – Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Luft-, Feuchte- und Salztransport in kapillarporösen Medien. Software entwickelt am Institut für Bauklimatik an der Technischen Universität Dresden. 2012. www.bauklimatik-dresden.de
- [5] WTA Merkblatt 6-1: Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, Mai 2002
- [6] WTA Merkblatt 6-2: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, Dezember 2014
- [7] WTA Merkblatt 6-3: Rechnerische Prognose des Schimmelwachstumsrisikos. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München, April 2006

Der Autor

Dr.-Ing. Gregor A. Scheffler



1997 bis 2003 Studium des Bauingenieurwesens an der TU Dresden; 2003 bis 2008 Promotion zur hygrothermischen Materialmodellierung am Institut für Bauklimatik der TU Dresden; 2008 bis 2009 Hans-Christian-Ørsted Postdoc Stipendiat an der Technischen Universität Dänemarks (DTU); 2009 bis 2011 Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH, Fachbereich Anwendungsforschung und Bauphysik; 2011 bis 2012 Fachbereichsleiter Anwendungsforschung und Bauphysik bei der Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH; seit 2013 Ingenieurbüro Dr. Scheffler und Partner GmbH in Dresden.

Ingenieurbüro Dr. Scheffler und Partner GmbH
Fiedlerstraße 4
01307 Dresden
Tel. 0351 2546923
Fax 0351 2546918
gregor.scheffler@ib-scheffler.de
www.ib-scheffler.de