

EURO-GLASER UNTER BEACHTUNG SOLARER STRAHLUNGS- /ABSORPTIONSBEDINGUNGEN SOWIE DRUCKINDUZIERTER FEUCHTEEINTRÄGE IM VERGLEICH ZU DYNAMISCHEN SIMULATIONEN

Bernd Nusser¹, Thomas Bednar² und Martin Teibinger¹

¹Holzforchung Austria, Fachbereich Bauphysik, Wien, Österreich

²Technische Universität Wien, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz,
Österreich

Keywords: konvektiver Feuchteintrag, Beschattung, feuchtheadaptive Materialien, Glaser, EN ISO 13788

KURZFASSUNG

Im folgenden Beitrag wird die Notwendigkeit, den konvektiven Feuchteintrag sowie die solaren Strahlungs- und Absorptionsbedingungen bei der stationären Bauteilbewertung nach Euro-Glaser (EN ISO 13788) [1] zu berücksichtigen, aufgezeigt. Hierfür wird eine Volumenstromgleichung zur Berechnung der Luftexfiltration in Abhängigkeit der Luftdichtheitsklasse des Bauteils vorgestellt. Anschließend werden die Wärme- und Feuchtestromgleichungen des Euro-Glaser-Verfahrens um den Leckageluftstrom und den solaren Absorptionskoeffizienten der Außenoberfläche inkl. Beschattungsfaktor erweitert. Die hierdurch gewonnenen Berechnungsergebnisse eines Flachdaches werden denen aus instationären 2-D Simulationen gegenüber gestellt.

ABSTRACT

In this report, the need to consider the convective moisture transport and the solar radiation and absorption conditions for the steady state evaluation of building components according to Euro-Glaser (EN 13788) [1] are shown. Therefor a flow rate equation for calculating the air exfiltration in building components is presented.

Afterwards the heat and moisture flow equations of the Euro-Glaser-Method are extended with leakage air flow and the solar absorption coefficient and shadowing factor of the outer surface.

The results of this calculations for flat roofs are compared with the results of transient 2-D simulations.

EINLEITUNG

Im derzeit gültigen Normverfahren zur Berechnung des wärme- und feuchtechnischen Verhaltens von Bauteilen und Bauelementen EN ISO 13788 (Euro-Glaser) [1] werden weder vorhandene konvektive Feuchteinträge noch das solare Absorptionsverhalten oder eine Beschattung des Bauteils berücksichtigt. Des Weiteren sind im Euro-Glaser-Verfahren erhöhte Einbaufeuchten der Materialien ebenso wenig wie feuchtheadaptive Diffusionswiderstände von Bauteilschichten implementierbar.

Diese Faktoren beeinflussen das hygrothermische Verhalten von Bauteilen jedoch nachhaltig. Vor allem Bauteile mit hohen äußeren Diffusionswiderständen wie z.B. manche Flachdachkonstruktionen reagieren auf die genannten Einflüsse empfindlich [2, 3, 4, 5]. Bereits 1999 wurde auf die fehlende Berücksichtigung einiger dieser Faktoren und ihrer Notwendigkeit im Glaser-Verfahren hingewiesen [6].

Nachfolgend wird ein diesbezüglich modifiziertes Euro-Glaser-Verfahren (Glaser-VIE) präsentiert und den Ergebnissen eines mit Freilandversuchen an der Holzforchung Austria [7] bewerteten numerischem Simulationsprogramms (HAM3D-VIE) [8] gegenübergestellt.

LUFTEXFILTRATION

Eine der typischen Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Gebäuden und konvektionsbedingte Feuchteschäden liegt neben ungenügend dichten Bauteilanschlüssen häufig bei Installationen welche die innenseitige Luftdichtheitsschicht durchdringen [9, 10, 11, 12].

Zur Abschätzung des potentiellen konvektiven Feuchteintrags in die Konstruktion aufgrund von Leckagen an der innenseitigen Luftdichtheitsschicht, wurden die Baupläne von 50 Einfamilienhäusern (EFH) mit insgesamt 646 Räumen bezüglich ihrer Elektroinstallationen und anderweitigen Durchdringungen hin ausgewertet. Die Gebäude wurden größtenteils im Jahr 2008 errichtet, was Abbildung 1 entnommen werden kann. Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich durchwegs um Holzrahmenbaukonstruktionen von fünf großen österreichischen Fertighausunternehmen.

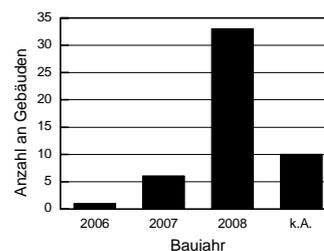


Abbildung 1: Altersprofil der 50 ausgewerteten Einfamilienhäuser.

Aufgrund der u.a. höhenabhängigen Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich gemäß Gleichung (1) entsprechend einem Ansatz aus [13] wirken sich Leckagen in höheren Positionen, d.h. im Bereich des Daches, am kritischsten aus.

$$\Delta P = -0,0215 \cdot (T_{air,ex} - T_{air,in}) \cdot h \quad (1)$$

ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa
 $T_{air,ex}$ Lufttemperatur im Außenbereich in K
 $T_{air,in}$ Lufttemperatur im Innenraum in K
 h Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Innenraum in m

Zunächst werden deshalb die Decken und Dächern von 531 Räumen auf die Anzahl von Lichtkabelausslässen hin untersucht. Heizungs- und Lüftungsinstallationen, Telekommunikationsleitungen oder auch Steckdosen stellen nur einen geringen Anteil an Durchdringungen in den ausgewerteten Decken und Dächern dar und werden nicht beachtet. Die Anzahl der Lichtkabelausslässe wird in $1/m^2$ Raumgrundfläche angegeben.

Wie Abbildung 2 entnommen werden kann, liegt der Mittelwert an Lichtkabelausslässen in Decken/Dächern pro m^2 Raumgrundfläche bei 0,16, das zugehörige 95%-Quantil liegt bei 0,48 $1/m^2$.

Neben den Lichtkabelausslässen in den Decken und Dächern wurden auch potentielle Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht in den Außenwänden erfasst.

Konkret waren dies:

- A. Klima-/Heizung-/Sanitärinstallationen
- B. Stromkabelausslässe
- C. Lichtschalter u.ä.
- D. Steckdosen
- E. Telekommunikationsanschlüssen
- F. Sonstige Elektroinstallationen (z.B. Verteilerdosen, etc.)

Abbildung 2 zeigt auch die Häufigkeiten der einzelnen Leckagen pro m^2 Wandfläche. Es wurden hierfür insgesamt 445 Räume mit durchdringungsbehafteten Außenwänden ausgewertet und eine mittlere Raumhöhe von 2,60 m vorausgesetzt. Räume ohne Durchdringung in der Außenwand flossen nicht in die Auswertung mit ein.

Wie zu erkennen ist, sind bei einer Leckagedichte von 0,48 $1/m^2$ die 95%-Quantile alle erfassten potentiellen Leckagen inbegriffen.

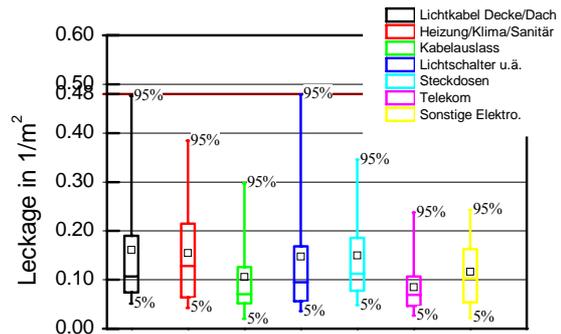


Abbildung 2: Potentielle Leckagen pro m^2 Grund-/Wandfläche in den Decken/Dächern und Außenwänden von 50 Einfamilienhäusern.

In [10] wurde der Luftvolumenstrom durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel entsprechend Abbildung 3 bei 10 Pa als geringste Druckdifferenz ermittelt. Unter der Annahme, dass die in den EFH erfassten Leckagen verallgemeinert durch ein solch nicht abgeklebtes Elektrokabel repräsentiert werden, beschreibt Gleichung (2) den Leakagevolumenstrom bei einer Kabelausslassdichte von 0,48 $1/m^2$. Hierfür wird der für Spalt- und Rissleckagen typische Strömungsexponent von 2/3 verwendet [11, 13, 14].

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \quad (2)$$

Q Leakagevolumenstrom in $m^3/(m^2 \cdot s)$

Janssen [3] beziffert die zu erreichende Luftdichtheit von Dächern mit Foliendampfbremsen nach europäischem Baustandard der 1990er Jahre mit

$$Q_{Jan} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P \quad (3)$$



Abbildung 3: Nicht abgeklebte Durchdringung eines Elektrokabels durch die Dampfbremse [10].

In den letzten Jahren hat sich viel im Bezug auf die Luftdichtheit von Holzbauten getan. So waren Gebäude in Holzbauweise in Deutschland aus den Jahren 2001/02 im Vergleich zu Bauten aus den Jahren 1995/96 um nahezu 50 % luftdichter [15]. Seit den dortigen Untersuchungen dürfte sich die Luftdichtheit im Holzbau nochmals verbessert haben. Janssens Bezugswert bei 4 Pa muss um 75 % reduziert werden, um dem Volumenstrom durch Gleichung (2) zu entsprechen. Dies erscheint aufgrund des deutlich gestärkten Luftdichtheitsbewusstseins und der technischen

Neuerungen im Holzbau in den letzten 15 Jahren als plausibel.

Der durch Gleichung (2) beschriebene Volumenstrom wird nachfolgend als Referenzvolumenstrom F_{100} (Flow 100 %) bezeichnet. Zur Einteilung des Bauteils in verschiedene Luftdichtheitsklassen werden 4 Abstufungen vorgenommen.

- **F100** Gebäudedichtheit nicht nachgewiesen, Luftdichtheitsausführungen gemäß Stand der Technik.
- **F50** Gebäudedichtheit mit Blower-Door nachgewiesen ($n_{50} \leq 3,0$ l/h), Leckageortung wird durchgeführt, Durchdringungen lediglich eingehaust oder mit Manschetten.
- **F25** Gebäudedichtheit mit Blower-Door nachgewiesen ($n_{50} \leq 1,5$ l/h), Leckageortung wird durchgeführt. Durchdringungen lediglich eingehaust oder mit Manschetten.
- **F12** Werkseitig vorgefertigte, beidseitig beplankte Bauteile mit Dampfbremse. Durchdringungen lediglich eingehaust oder mit Manschetten. Bauzeitenabdichtung bereits im Werk aufgebracht.

In [16] werden Bauteile zur Bestimmung des zugehörigen Leckagevolumenstromes in Klassen (A, B, C) nach Reihung des q_{50} -Werts des Gebäudes eingeteilt. Abbildung 4 zeigt den Vergleich der Leckagevolumenströme der unterschiedlichen Luftdichtheitsklassen beider Ansätze. Wie zu erkennen ist, liegen die Volumenströme durch F100, F50 und F25 bei geringeren Drücken welche sich durch den thermischen Auftrieb ergeben (vgl. Abbildung 7) zumeist oberhalb jener der Klasse A, B und C. Der Volumenstrom durch F12 liegt ab 2 Pa hingegen unterhalb der Volumenströme gemäß [16].

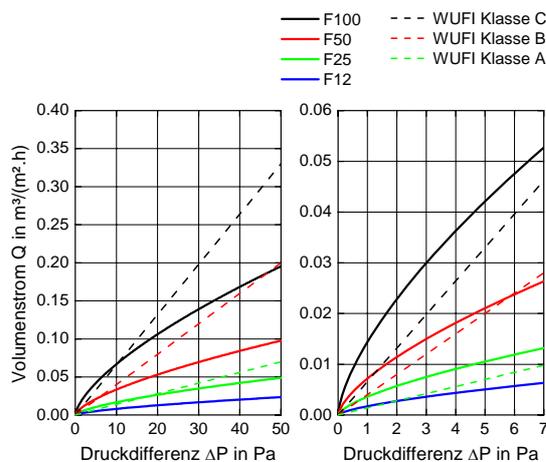


Abbildung 4: Vergleich der hier hergeleiteten Leckagevolumenströme und jener aus [16].

MODIFIZIERTER EURO-GLASER

Abbildung 5 zeigt die modellhafte Abbildung eines Flachdachaufbaus gemäß dem modifizierten Euro-Glaser (Glaser-VIE). Die Quelle des Luftmassenstroms befindet sich am innersten Layer und die Senke am äußersten Layer der Dämmung. Die implizierte Anfangsfeuchte wird dem mittleren Layer des Dämmstoffes zugeordnet.

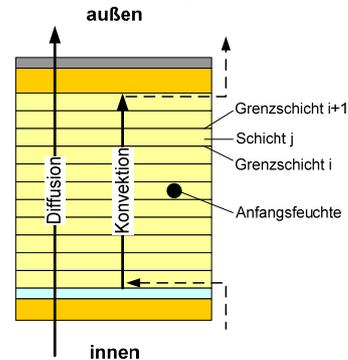


Abbildung 5: Darstellung eines Flachdachaufbaus gemäß Glaser-VIE-Modell.

Zur Berechnung des Luftvolumenstroms für die Luftdichtheitsklasse F100 beträgt der Luftdichtheitsfaktor $F = 1$, für F50 $F = 0,5$ für F25 $F = 0,25$ und für F12 entsprechend $F = 0,12$.

Der resultierende Luftmassenstrom in das Gefach des Bauteils errechnet sich nach Gleichung (4).

$$\dot{m} = \rho_{air} \cdot F \cdot Q \quad (4)$$

\dot{m} Luftmassenstrom in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

ρ_{air} Dichte der Luft = $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$

F Luftdichtheitsfaktor

Die Wärme- und Feuchteströme werden unter Berücksichtigung des konvektiven Wärme- und Stofftransports durch Gleichung (5) und (6) ermittelt.

$$q_i = c \cdot \dot{m} \cdot \left(T_i + \frac{T_i - T_{i+1}}{e^{P_H} - 1} \right) \quad (5)$$

$$\text{mit } P_H = \frac{c \cdot \dot{m}}{\lambda_j / d_j}$$

q_i Wärmestromdichte über die Schichtgrenze i in W/m^2

c Spezifische Wärmekapazität der Luft = $1006 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$T_{i,i+1}$ Temperatur an der Schichtgrenze i bzw. $i+1$ in K

λ_j Wärmeleitfähigkeit der Schicht j in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

d_j Dicke der Schicht j in m

$$j_i = \frac{0,622}{p_0} \cdot \dot{m} \left(p_i + \frac{p_i - p_{i+1}}{e^{P_M} - 1} \right) \quad (6)$$

$$\text{mit } P_M = \frac{\dot{m} \cdot 0,622 / p_0}{\delta_0 / (\mu_j \cdot d_j)}$$

j_i Massenstromdichte über die Schichtgrenze i in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

- p_0 Luftdruck in Pa
 $p_{i,i+1}$ Wasserdampfpartialdruck an Schichtgrenze i bzw. $i+1$ in Pa
 δ_0 Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der Luft = $2E-10$ kg/(m.s.Pa)
 μ_j Wasserdampfdiffusion-Widerstandszahl der Schicht j

Anstatt direkt die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur zur Berechnung des Temperaturfeldes zu verwenden, wird gemäß Gleichung (7) der solare Absorptionskoeffizient der außenseitigen Bauteiloberfläche herangezogen und eine Approximation des konvektiven und radiativen Wärmeaustausches mit der Umgebung durchgeführt. Die Gegenstrahlungstemperatur –für Flachdächer die Himmelstemperatur– kann hierfür um 10 K geringer angesetzt werden als die Außenlufttemperatur.

$$q_{surf,ex} = \alpha_c \cdot (T_{surf,ex} - T_{air,ex}) + \alpha_r \cdot (T_{surf,ex} - T_{sky}) \quad (7)$$

- $-a \cdot (1 - f_s) \cdot I_s$
 $q_{surf,ex}$ Wärmestromdichte über die Außenoberfläche in W/m^2
 $\alpha_{c,r}$ konvektiver bzw. radiativer Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$
 $T_{surf,ex}$ Temperatur der Außenoberfläche in K
 T_{sky} Himmelstemperatur in K
 a solarer Absorptionskoeffizient der Außenoberfläche
 f_s Verschattung der Außenoberfläche (0-0,8)
 I_s mittlere monatliche Solarstrahlung in W/m^2

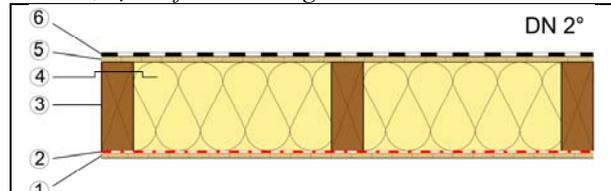
Der feuchteabhängige Diffusionswiderstand der eingesetzten Materialien wird über die Luftfeuchte den anliegenden Schichtgrenzen aus dem letzten Interrationsschritt ermittelt.

INSTATIONÄR VS. STATIONÄR

Zum Vergleich zwischen stationärem Glaser-VIE und instationären Berechnungsergebnissen. wird ein Flachdachaufbau gemäß Tabelle 1 simuliert.

Als Außenklima wird für das relativ kalte Klagenfurter Test-Referenz-Jahr (TRY) und als Innenklima ein Sinus mit $22^\circ C/40\%$ r.Lf. im Winter (15.01) und $26^\circ C/60\%$ r.Lf. im Sommer (15.07) angesetzt. Für die instationären Simulationen werden Stundenwerte und für die stationäre Berechnung jeweils Monatsmittelwerte herangezogen. Die Raumhöhe wird mit 8 m angenommen. Die Berechnungen starten jeweils im Oktober.

Tabelle 1: Berechneter Flachdachaufbau. Schichtenfolge: 6 EPDM, 5 OSB, 4 Mineralwolle, 3 Fichtensparren, 2 Feuchteadaptive Dampfbremse, 1 OSB, k_l = Luftdurchlässigkeit.



	d in mm	λ in W/mK	ρ in kg/m ³	c in J/kgK	μ	k_L in m ⁻²
6	1.5	-	1400	1000	58000	0
5	18	0.130	600	1700	10-165	0
4	280	0.038	14.5	1030	1	1×10^{-8}
3	280	0.130	450	1700	130	0
2	0.2	-	-	2500	150-75000	0
1	15	0.130	600	1700	10-165	0

Der Aufbau wird stationär mit Glaser-VIE und instationär mit HAM3D-VIE jeweils für eine Luftdichtheitsklasse F50 ($F = 0,5$) berechnet. Die instationären Simulationen erfolgen 2-dimensional. Das 2-D Modell und die Zellen mit der Volumstromquelle und -senke sind in Abbildung 6 dargestellt. In den 2-D Simulationen wird für den Fichtensparren die Ausgleichsfeuchte bei 70 % r.Lf. und für die restlichen Materialien jene bei 50 % r.Lf. als Startbedingung angesetzt.

Bei den stationären Berechnungen mit Glaser-VIE wird eine erhöhte Anfangsfeuchte von 0,5 kg vorgegeben.

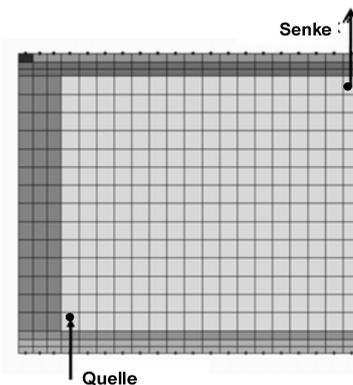


Abbildung 6: 2-D Modell des simulierten Flachdachaufbaus mit Positionsanzeige der Zellen mit Volumenstromquelle und Volumenstromsenke.

Abbildung 7 zeigt die Druckdifferenzen zwischen Innenraum und Außenbereich, welche sich bei einer Berechnung mit den Stundenwerten des Klagenfurter TRY und mit den Monatsmittelwerten aus dem TRY ergeben. Wie zu erkennen ist, herrscht bei der stundenweisen Berechnung eine starke Dynamik um die Druckdifferenzen aus den Monatsmittelwerten.

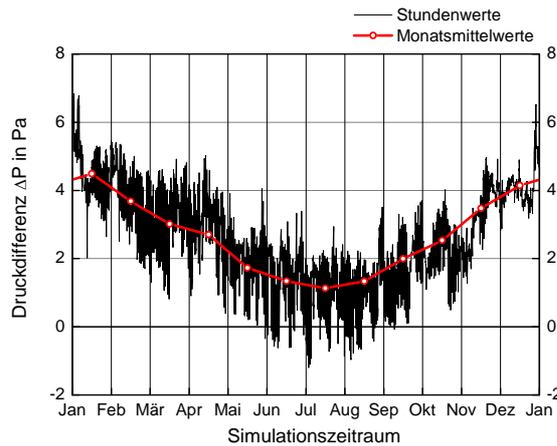


Abbildung 7: Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich bei einer sinusförmigen Innenraumtemperatur von 22 °C im Winter und 26 °C im Sommer und Klagenfurter Test-Referenz-Jahr (TRY) als Außenbedingung. Berechnung mit Stundenwerten und vereinfacht mit Monatsmittelwerten des TRY. Höhe des zusammenhängenden Luftraums 8 m.

Abbildung 8 zeigt für die instationären 2-D Simulationen die Feuchtezunahme des gesamten simulierten Aufbaus, jedoch ohne innenseitige Beplankung. Für die stationären Berechnungen zeigt Abbildung 8 die Gesamtfeuchteänderung. Alle Feuchteänderungen in Abbildung 8 beziehen sich auf die jeweiligen Startfeuchten.

Beide Berechnungsmethoden liefern die gleichen Tendenzen im Bezug auf die Feuchtezu- und Feuchteabnahme. Durch die stationäre Berechnung wird die Feuchteänderung in beide Richtungen jedoch unterschätzt.

Aufgrund des Ausschlusskriteriums „Feuchtezunahme“ und der Unterschätzung der Feuchteabnahme wird die hier diskutierte Konstruktion durch das stationäre Verfahren kritischer beurteilt als durch das instationäre 2-D Verfahren. Glaser-VIE liegt hier somit auf der sicheren Seite.

Weiterführend muss jedoch der Umschlag zwischen Feuchteab- und Feuchtezunahme beider Berechnungsmethoden bei unterschiedlichen Randbedingungen gegenübergestellt werden.

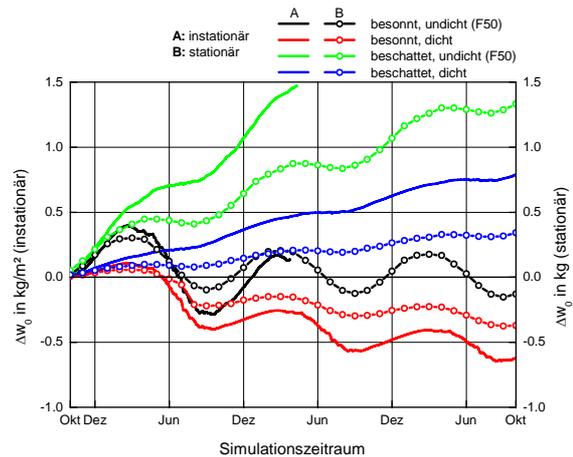


Abbildung 8: Feuchteänderung Δw_0 des Bauteils ohne innenseitige Beplankung (instationär) und Gesamtfeuchteänderung (stationär) im Bezug auf die Ausgangsfeuchte.

EINFLUSSFAKTOREN

Solare Strahlungs- /Absorptionsbedingungen

Abbildung 9 zeigt den Einfluss des gewählten solaren Absorptionskoeffizienten a auf den Gesamtwassergehalt des diskutierten, luftdichten Flachdachaufbaus.

Ohne Berücksichtigung der solaren Absorption und des radiativen Wärmeaustausches d.h. $a=0$ und $\alpha_r=0$ in Gleichung (7), steigt der Gesamtwassergehalt der Konstruktion deutlich an. Erst durch Einbeziehen des solaren Absorptionsgrades von 0,7 (hier mit $\alpha_r=5$) weist die Konstruktion längerfristig keine Auffeuchtung mehr auf und die erhöhte Einbaufeuchte kann austrocknen.

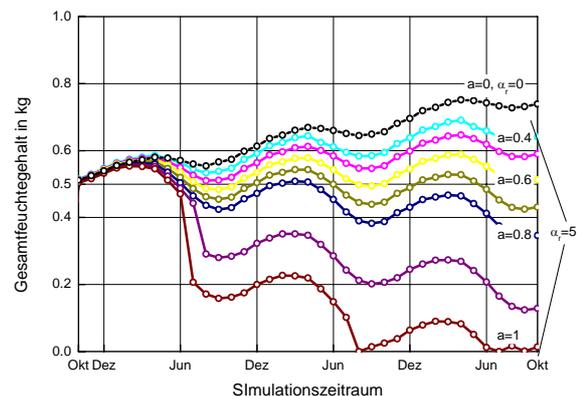


Abbildung 9: Gesamtfeuchtegehalt des untersuchten Flachdachaufbaus in Abhängigkeit des solaren Absorptionskoeffizienten a bei luftdichter und beschattungsfreier Ausführung.

Konvektiver Feuchteeintrag

Abbildung 10 zeigt den Einfluss des konvektiven Feuchteintrags auf den Gesamtwassergehalt des Flachdachaufbaus. Als solarer Absorptionskoeffizient wurde 0,8 angesetzt, eine Beschattung ist nicht vorhanden. Wie zu erkennen ist, trocknet die

eingeschlossene Einbaufeuchte ab einem gewissen konvektiven Eintrag nicht mehr aus. Bei höheren Einträgen als durch F12 ist die Rücktrocknung nur noch sehr schwach ausgeprägt.

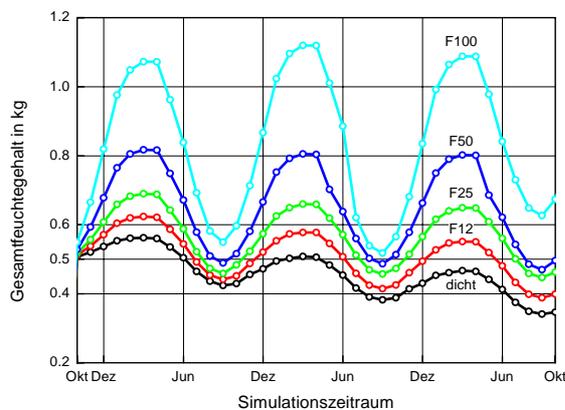


Abbildung 10: Gesamtfeuchtegehalt des untersuchten Flachdachaufbaus ($\alpha = 0,8, f=0$) in Abhängigkeit des konvektiven Feuchteeintrags.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Zuge der Untersuchungen wurden 50 Einfamilienhäuser hinsichtlich der Anzahl ihrer Elektro- und Heizung/Klima/Sanitärinstallationen hin ausgewertet. Mit Hilfe der Verallgemeinerung des Luftvolumenstroms durch diese Leckagen auf den Luftvolumenstrom durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel wird eine Volumenstromgleichung hergeleitet und vier Luftdichtheitsklassen definiert. Die hierbei entstehenden Leckageströme liegen im Bereich der Volumenströme eines bereits bestehenden Ansatzes.

Um diese Volumenströme sowie die solaren Absorptionsbedingungen oder eine Verschattung zu berücksichtigen, wurden die Wärme- und Feuchtestromgleichungen des stationären Euro-Glaser-Verfahrens geeignet erweitert.

Den hierdurch gewonnenen Berechnungsergebnissen wurden Simulationsergebnisse aus einer instationären 2-D Simulation gegenübergestellt. Untersuchungsgegenstand ist ein hölzernes, vollgedämmtes Flachdach mit außen stark diffusionsbremsender Folienabdichtung. Hierbei zeigt sich, dass das stationäre Verfahren die Feuchteänderung des Bauteils im gegebenen Fall unterschätzt, was im Hinblick auf die Feuchteabnahme zu einer konservativen Einschätzung führt. Die Tendenzen der Feuchtezu- und -abnahmen stimmen generell überein.

Um eine konservative Bauteileinschätzung durch das stationäre Glaser-VIE-Verfahren sicher zu stellen, sind weiterführend geeignete Bewertungskriterien auszuarbeiten.

Wie die Variantenstudie zeigt, wirken sich der solare Absorptionsgrad und somit auch eine Beschattung sehr stark auf das hygrische Verhalten des Bauteils aus. Ebenfalls zeigt sich anhand der Variantenstudie

der maßgebende Einfluss der Luftdichtheit des Bauteils auf das hygrische Verhalten dessen. Beide Einflussfaktoren sind bei der Bewertung von Bauteilen zu berücksichtigen.

Inwieweit das hier vorgestellte modifizierte Euro-Glaser-Verfahren - Glaser-VIE - eine auch für andere Bauteile und Baustoffe, allgemeine Gültigkeit besitzt, muss noch untersucht werden.

LITERATUR

- [1] ÖNORM EN ISO 13788, 2002-01-01: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren.*
- [2] Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung.* In: *Bauphysik*, Jg. 32, H. 3, S. 132-143.
- [3] Janssens, A. (1998): *Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems, calculation and assessment methods.* Dissertation. Catholic University Leuven, Belgium.
- [4] Bludau, C.; Zirkelbach, D.; Künzel, H. M. (2008): *Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygrothermal Consequences.* In: *Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries.* 16-18 June 2008. Copenhagen, Denmark S. 213-220.
- [5] Künzel, H. M.; Großkinsky, T. (1998): *Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an!* In: *WKSB*, Jg. 43, H. 42, S. 22-27.
- [6] Künzel, H. M. (1999): *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis.* Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Holzkirchen). IBP-Mitteilung Nr.: 355.
- [7] Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen. Teil 1. Ergebnisse experimenteller Untersuchungen.* Herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien. Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412.
- [8] Bednar, T. (2000): *Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren.* Dissertation. TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz.

- [9] Fuhrmann, W. (2003): *Luft- und Winddichtheit von Holzhausbauten. Einfluss der Konstruktionsarten und Ausbaustufen. 2. Aufl.* Herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien. Forschungsbericht 357.
- [10] Hall, M.; Hauser, G. (2003): *In situ Quantifizierung von Leckagen bei Gebäuden in Holzbauart.* Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik. Kassel. Forschungsbericht, AIF-Nr. 12611 N.
- [11] Mattsson, B. (2007): *Studies on building air leakage. A transient pressurisation method, measurements and modelling.* Dissertation. Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- [12] Kalamees, T.; Korpi, M.; Eskola, L.; Kurnitski, J.; Vinha, J. (2008): *The distribution of the air leakage places and thermal bridges in Finnish detached houses and apartment buildings.* In: Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. 16-18 June 2008. Copenhagen, Denmark, S. 1095–1102.
- [13] Hens, H. S. (2007): *Building Physics - Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises:* Ernst, Wilhelm & Sohn.
- [14] Richter, E.; Fischer, H.-M.; Jenisch, R.; Freymuth, H.; Stohrer, M.; Häupl, P.; Homann, M. (2008): *Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima:* Vieweg + Teubner.
- [15] Hall, M. (2004): *Quantifizierung von Luftdichtheits-Leckagen.* In: bauen mit holz, H. 8, S. 30–36.
- [16] Zirkelbach, D.; Künzel, H. M.; Schafczek, B.; Borsch-Laaks, R. (2009): *Dampfkongvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen.* In: Proceedings 4th Intern. Symposium on Building and Ductwork Airtightness (BUILDAIR). October 1-2, 2009, Berlin, Germany.