

Tauwasser an Fensterscheiben

M. Krus, M. Ruf

1. Hintergrund

Fenster beeinflussen durch ihre Form, Gliederung und Größe, durch ihre Lage und Anordnung den Baukörper und den Innenraum maßgeblich. Als Elemente der Außenhaut eines Gebäudes liegen ihre primären Aufgaben in der natürlichen Beleuchtung und Belüftung eines Raumes. Hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften stellen sie Schwachstellen in der Bauwerkshülle dar. Allerdings fanden in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte bei der energetischen Verbesserung von Verglasungen statt. Im älteren Gebäudebestand sind Zweischeiben-Isolierverglasungen in Verbund- und Kastenfenstern noch üblicher Standard, während in Neubauten ab Mitte der 1990er Jahre ausschließlich so genannte Wärmeschutzverglasungen mit Wärmeschutzbeschichtungen und Edelgasfüllungen zum Einsatz kommen. Die frühere Wärmeschutzverordnung und die heute gültige Energieeinsparverordnung (EnEV) haben diese Entwicklung beschleunigt. Das Bestreben, sämtliche thermische Schwachstellen des Gebäudes konsequent zu eliminieren, führte zudem zu bedeutenden Fortschritten bei der Verringerung des Wärmeflusses über Fensterrahmen und Glasabstandshalter[1].

Diese modernen Fenster sind im geschlossenen Zustand so dicht, dass die im Gebäude entstehende Feuchtigkeit über die verbleibenden Undichtigkeiten nur unzureichend abgeführt werden kann und somit die Raumluftfeuchte und die Feuchtebelastung der Außenwand zunehmen. Im Vergleich zum Altbau führen die geänderten Verhältnisse zur vermehrten Bildung von Tauwasser und einem erhöhten Risiko von Schimmelpilzwachstum an wärmetechnischen Schwachstellen der Gebäudehülle, insbesondere der Fenster. Sofern keine mechanische Belüftung vorhanden ist, muss ein Großteil der Feuchte durch das Öffnen der Fenster, z.B. in Form von täglich mehrmaligem Stoßlüften, abgeführt werden.

Auch moderne Fenster besitzen im Vergleich zur Wandkonstruktion einen deutlich geringeren Wärmedurchlasswiderstand, sie stellen somit häufig eine örtlich begrenzte Wärmebrücke dar, an der es zu Tauwasseranfall kommt. Auch bei normaler Nutzung ist ein gelegentliches Beschlagen der Fenster zu dulden, sofern es dadurch zu keinem Schaden am oder im Gebäude kommt. Es stellt sich allerdings die Frage, welche Häufigkeit an Taupunkttemperaturunterschreitungen als normal gelten kann und ab wann die Situation zu beanstanden ist. In der Fachliteratur sind dazu noch keine systematischen Untersuchungen zu finden, weshalb dazu die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen durchgeführt wurden.

2. Vorgehensweise

Die Tauwassersituation an Fenstern hängt neben deren thermischen Eigenschaften von internen Feuchtelasten, dem Infiltrationsluftwechsel und den Lüftungsgewohn-

heiten der Nutzer ab, die das Innenklima maßgeblich beeinflussen. Die Beurteilung des hygrothermischen Raumklimas ist durch aufwendige und kostenintensive Untersuchungen möglich. Um eine einfachere und kostengünstigere Lösung für die Bewertung des sich einstellenden Raumklimas zu finden, wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik ein hygrothermisches Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt. Mit Hilfe des Rechenmodells WUFI®-Plus [2, 3], das eine Verknüpfung von energetischer Gebäude- und hygrothermischer Bauteilberechnung beinhaltet, ist eine situationsbedingte Quantifizierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse sowohl im Gebäude als auch in seinen Umschließungsflächen möglich. In Abhängigkeit vom Außenklima sowie den Heizungs- und Lüftungsgegebenheiten sind die hygrothermischen Bedingungen im Raum und an den Innenoberflächen genauso bestimmbar wie die Wärmeverluste durch Transmission, Verdunstung und Lüftung.

Der Vorteil einer derartigen rechnerischen Untersuchung besteht zum Einen darin, dass damit schnell und einfach die maßgeblichen Parameter, wie Baukonstruktion und –geometrie, Fenster, Tageszyklus der Feuchteabgabe und Lüftung, variiert werden können. Zum Anderen wird damit ein mittleres Nutzerverhalten abgebildet. Allerdings kann WUFI®-Plus zwar den Einfluss des Fensters auf das Innenklima realitätsnah berechnen, nicht aber den Tauwasserausfall am Fenster. Dieses Problem kann aber dadurch gelöst werden, dass der Tauwasserausfall am Fenster mit dem ebenfalls am IBP entwickelten und vielfach validierten eindimensionalen hygrothermischen Simulationsverfahren WUFI® [4-8] unter Zugrundelegung des mit WUFI®-Plus berechneten Innenklimas ermittelt wird.

3. Thermische Eigenschaften von Fenstern

Die Fenster haben sich in den letzten Jahrzehnten in Bezug auf ihre Konstruktion und Wärmedämmeigenschaft stark weiterentwickelt. In Tabelle 1 sind ausgehend von der Einfachverglasung bis zur 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung typische Werte für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster aufgelistet. Im Vergleich zur Einscheibenverglasung konnte der U-Wert des Fensters um mehr als den Faktor 10 verbessert werden.

Tabelle 1 Wärmedurchgangskoeffizienten und Oberflächentemperaturen verschiedener Fensterkonstruktionen bei -10°C außen u. 20°C innen.

Glasqualität	Wärmedurchgangskoeffizient (U _w -Wert) [W/(m²K)]	Innenoberflächentemperatur der Scheibe [°C]
Einscheibenglas	5,6	-1,0
2-Scheiben-Isolierglas	2,9-3,1	8,4
3-Scheiben-Isolierglas	2,1	12,1
2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung	1,1-1,6	13,8-15,5
3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung	0,4-0,8	16,8-17,3

Beim Fenster handelt es sich um ein inhomogenes Bauteil mit örtlich sehr unterschiedlichen Wärmedurchgangskoeffizienten. Das Tauwasser an der Innenober-

fläche tritt bei den heute ausschließlich eingebauten Wärmeschutzverglasungen überwiegend im unteren und seitlichen Randbereich auf. Wegen der guten Wärmeleitfähigkeit der bis heute vorzugsweise aus Aluminium hergestellten Abstandshalter (siehe in Bild 1 dargestellter Fensterquerschnitt) kommt es zwangsläufig zu einer wesentlich stärkeren und schnelleren Abkühlung dieser, bis ca. 50 mm breiten, Randzone der Verglasung. Bei Verwendung von Edelstahl oder Kunststoffabstandshaltern kann der U_w -Wert um 0,1 bis 0,3 W/m^2K verringert werden.

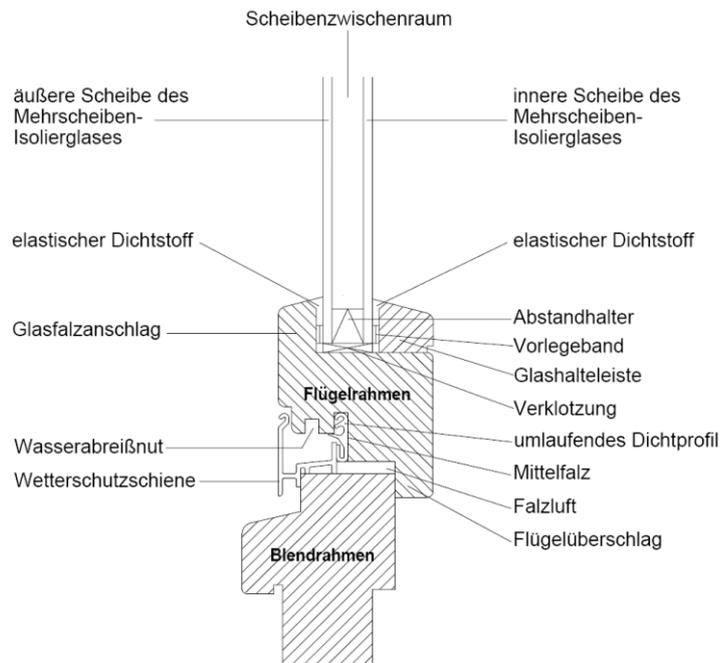


Bild 1 Querschnitt einer typischen Fensterkonstruktion.

Für die rechnerische Untersuchung des Tauwasseranfalls ist somit der sich am Randverbund ergebende U -Wert maßgeblich. In der Literatur werden für standardmäßig eingebaute Fenster mit Wärmeschutzverglasungen Oberflächentemperaturen am Scheibenrand angegeben [1, 9-12], aus denen der U -Wert berechnet werden kann. Bild 2 zeigt beispielhaft den Isothermenverlauf an verschiedenen Stellen eines Holzfensters mit Aluminiumabstandshalter (links) und verbessertem Abstandshalter (rechts), nach [11].

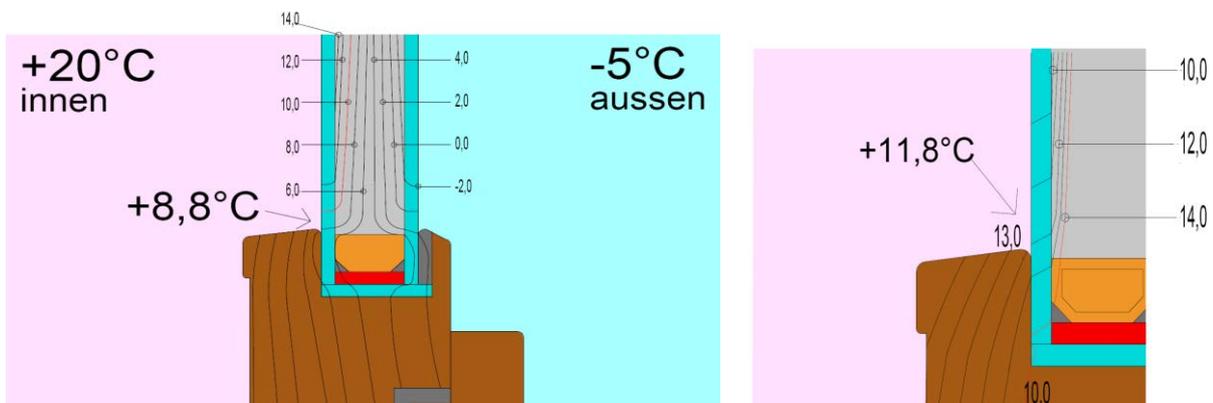


Bild 2 Isothermenverlauf an einem Holzfenster mit Zweischeibenwärmeschutzverglasung und Alu-Abstandshalter (links) und verbessertem Abstandshalter (rechts); Randbedingungen: außen $-5^{\circ}C$; innen $+20^{\circ}C$; $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2K/W$

In [13] hat Ruf für zahlreiche Fenster die Innenrandoberflächentemperaturen mit den zugehörigen Randbedingungen zusammengetragen und daraus die U-Werte des Randverbundes berechnet. Aus den Daten von verschiedenen Fensterkonstruktionen mit Wärmeschutzverglasung und Aluminium-Abstandshalter ergibt sich für den Randverbund ein mittlerer U-Wert von $3,55 \text{ W/m}^2\text{K}$, bei Verwendung eines verbesserten Abstandshalters verringert sich dieser Wert auf $2,72 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für Altbaufenster mit einem typischen mittleren U_w -Wert von $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ sind diesbezüglich kaum Daten zu finden. Da hier die Temperaturen in Scheibenmitte laut Tabelle 1 bereits auf ähnlich niedrigem Niveau wie bei moderneren Fenstern im Randbereich liegen, dürften sich hier die Werte am Randverbund an den unteren Werten des modernen Fensters orientieren. Damit ergibt sich hierfür ein U-Wert des Randbereiches von $4,75 \text{ W/m}^2\text{K}$. Da die aus verschiedenen Quellen recherchierten Oberflächentemperaturwerte wegen der Unterschiede bezüglich Fensterrahmen, Glaseinstandes und der zugrunde gelegten Wärmeübergangswiderstände stark differieren, wird für die folgenden Berechnungen der jeweils auf eine ganze Zahl aufgerundete Wert angesetzt.

4. Durchführung der Rechnerische Untersuchungen

Welche Häufigkeit an Taupunkttemperaturunterschreitungen am Fenster als „normal“ gelten kann und ab wann die Situation zu beanstanden ist, soll für eine „Standardwohnung“ bei „normaler“ Wohnraumnutzung beurteilt werden. Daher wird für die Untersuchungen von einer typischen Dreizimmer-Wohnung, die von einer Familie mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt wird, ausgegangen, wie sie in Mehrfamilienhäusern häufig anzutreffen ist. Ein Ausschnitt dieser Wohnung, mit den für die Berechnungen relevanten Wohn- und Schlafzimmern ist in Bild 3 dargestellt. Küche und Bad werden hier nicht betrachtet, da die Btauungssituation hier extrem von der Nutzung abhängt und hier auch zeitweiliges starkes Btauen akzeptiert wird. Für die rechnerische Ermittlung der Btauungssituation am Fenster werden unterschiedliche Materialien und Wandaufbauten herangezogen, um einerseits die Feuchtepufferwirkung der Wände zu erfassen und andererseits realitätsnah typische Konstruktionen zu berücksichtigen. Dabei geht es weniger darum, Extremsituationen auszuloten, sondern für die durchschnittliche Nutzungssituation herauszufinden, wie viel Tauwasser bei verantwortlichem Umgang mit dem Wohnraum zwangsläufig entsteht.

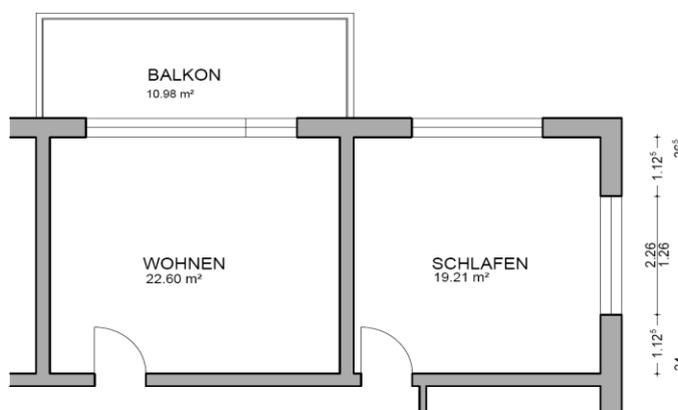


Bild 3 Grundrissausschnitt der für die Berechnungen zugrunde gelegten Wohnung.

Bei den Berechnungen wird das Raumklima und die daraus resultierende Betauungssituation mit unterschiedlichen Wandaufbauten und Fensterqualitäten für die Orte Hof, Würzburg und Freiburg, als besonders kalter, mittlerer und warmer Standort Deutschlands untersucht. Für den Altbau wird dabei ein einschaliges Ziegelmauerwerk mit einer Wandbekleidung aus Gipsputz (Variante 1) und unbehandelten Holzpaneelen (Variante 2) zugrunde gelegt. Außerdem eine einschalige, verputzte Porenbetonwand (Variante 3). Alle drei Varianten besitzen Zweischeiben-Isolierglasfenster mit Luftfüllung und einen mittleren U-Wert von 3,0 W/m²K. Beim Neubau wird ebenfalls eine einschalige Porenbetonwand einbezogen, die allerdings modernere Fenster mit einem mittleren U-Wert von 1,3 W/m²K besitzt (Variante 4). Berechnet werden außerdem ein Neubau mit Wärmedämmverbundsystem (Variante 5), eine einschalige Wand aus Leichthochlochziegeln mit Putz (Variante 6) und alternativ einer unbehandelten Holzpaneelverkleidung (Variante 7). Die Varianten 5 bis 7 besitzen ebenfalls modernere Fenster mit einem mittleren U-Wert von 1,3 W/m²K. Die Decken- bzw. Fußbodenaufbauten wurden für alle Varianten gleich gewählt. In Tabelle 2 sind alle berechneten Konstruktionsvarianten aufgelistet.

Tabelle 2 Für die Berechnungen zugrunde gelegte Konstruktionsvarianten.

Variante	Wandaufbau	Innenbekleidung	Fenster
1	Ziegelmauerwerk	Gipsputz	Alt, U-Wert 3 W/m ² K
2	Ziegelmauerwerk	Holzpaneele	Alt, U-Wert 3 W/m ² K
3	Porenbeton	Gipsputz	Alt, U-Wert 3 W/m ² K
4	Porenbeton	Gipsputz	Neu, U-Wert 1,3 W/m ² K
5		Gipsputz	Neu, U-Wert 1,3 W/m ² K
6	Leichthochlochziegel	Gipsputz	Neu, U-Wert 1,3 W/m ² K
7	Leichthochlochziegel	Holzpaneele	Neu, U-Wert 1,3 W/m ² K

Das Schlafzimmer und das Wohnzimmer werden in dieser Untersuchung getrennt betrachtet, der Feuchteausaustausch zwischen den Räumen kann dabei nicht berücksichtigt werden. Um die Nutzung der Räume realitätsnah nachzubilden, werden für die beiden Zimmer unterschiedliche Zeitverläufe der Feuchteabgabe zu Grunde gelegt. Dabei wird nicht nur die Feuchteproduktion durch die Bewohner berücksichtigt, sondern auch weiteren Feuchtelasten (Pflanzen, Körperreinigung, Kochen) Rechnung getragen. Der Tagesverlauf der Feuchtelasten ist in Tabelle 3 für diese Räume aufgelistet. Für die Wohnraumlüftung werden Infiltrationsluftwechsel von 0,5/h für den Altbau und 0,1/h für den Neubau angesetzt. Zusätzlich wird eine dreimal tägliche Stoßlüftung von jeweils 15 Minuten Dauer angenommen, die bedarfbezogen um 7 Uhr nach dem Duschen, um 13 Uhr nach dem Mittagessen und um 22 Uhr vor dem Schlafen gehen stattfindet.

Tabelle 3 Tagesverlauf der angesetzten Feuchteabgaben.

Uhrzeit	7 ⁰⁰ -8 ⁰⁰	8 ⁰⁰ -13 ⁰⁰	13 ⁰⁰ -14 ⁰⁰	14 ⁰⁰ -18 ⁰⁰	18 ⁰⁰ -19 ⁰⁰	19 ⁰⁰ -23 ⁰⁰	23 ⁰⁰ -7 ⁰⁰	Summe [g]
Schlafzimmer	GL	GL	GL	GL	GL	GL	2Ps,+GL	928
Feuchte [g/h]	10	10	10	10	10	10	96	
Wohnzimmer	4Pt,2GL	2GL	3Pt,2GL	1Pt,2GL	4Pt,2GL	2Pt,2GL	2GL	1791
Feuchte [g/h]	248	20	191	77	248	134	20	

Ps/Pt = schlafende/tätige Person; GL = Grundlast (Pflanzen, Haustier..)

5. Ergebnisse

Schlafzimmer

In Tabelle 4 sind sowohl die monatliche Verteilung als auch die Jahressummen der Stunden aufgelistet, an denen Tauwasser an den Fensterscheiben des Schlafzimmers, bei einer minimalen Raumtemperatur von 20 °C, auftritt. Es zeigt sich bei den Altbauvarianten 1 bis 3, dass die Häufigkeit von Taupunkttemperaturunterschreitungen in der herbstlichen Übergangszeit am größten ist. In den Monaten September und Oktober fallen hier über dreiviertel der Tauwasserstunden des gesamten Jahres an. Die Taupunkttemperaturunterschreitungen finden dabei weder gleichmäßig über den Monat verteilt, noch in größeren zusammenhängenden Abschnitten statt, sondern zeigen sich als punktuelle Ausfälle von begrenzter Dauer (siehe in [13]). In den Monaten März bis August fällt, mit Ausnahme einzelner weniger Stunden, kein Tauwasser aus. In den Wintermonaten sind die Mengen gering. Interessant ist auch ein Vergleich der Anzahl der Tage, an denen überhaupt Tauwasser an der Fensterscheibe ausfällt, wie er in Tabelle 5 gezeigt wird. Auch hier ist der September der Monat, in dem die größte Häufigkeit an Tauwassertagen festgestellt werden kann, während in Freiburg ohnehin nur an zwei bis drei Tagen im Jahr Kondensat auftritt. Bei sonst gleichen Verhältnissen hinsichtlich der inneren Rahmenbedingungen, wie Feuchtelasten und Wandmaterialien, ergeben sich bezüglich des Standorts zum Teil erhebliche Unterschiede. Im kühlen Hof beträgt die Dauer des Tauwasserausfalls das fünf bis achtfache gegenüber dem warmen Freiburg und gegenüber dem deutschen Durchschnittsklima in Würzburg immerhin noch das eineinhalb bis dreifache.

Die Verteilung bei den Neubauvarianten 4 bis 7 ist heterogener. Dort zeigt sich die Spitze des Tauwasserausfalls in den Wintermonaten, doch auch im Herbst ist zeitweise mit einem Beschlagen der Fenster zu rechnen. Auch hier kommt in den Monaten März bis August praktisch kein Tauwasser an den Fensterscheiben vor. Der monatliche Höchstwert aller untersuchten Varianten wird für die Variante 5, also bei einer Außenwand mit Wärmedämm-Verbundsystem und modernen Fenstern, im Januar in Hof erreicht (siehe Tabelle 4). Es zeigt sich, dass bei den Neubau-Varianten im Winterhalbjahr in jedem Monat Tage mit Tauwasser am Fenster, und zwar in allen drei untersuchten Orten, zu beobachten sind. Mit neun bis dreizehn Tauwassertagen hält der Januar hier die Spitzenstellung. Die absolute Anzahl der Tauwassertage ist für Hof und Würzburg, für die Varianten vier bis

sieben nahezu gleich, obwohl in Hof deutlich mehr Tauwasserstunden verzeichnet werden. In Freiburg fallen die Hälfte bis ein Drittel weniger Tauwassertage an.

Tabelle 4 Auflistung der monatlichen Tauwasserstunden am Scheibenrand im Schlafzimmer der berechneten Varianten.

**Standardwohnung, min $\theta_i = 20^\circ\text{C}$
Tauwasserstunden am Scheibenrand bei vorgegebener Lüftung ***

Nr. Wand	Ort	Aufbau	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Summe
S1	Hof	MW (Ziegel)	4	0	0	0	0	0	0	1	21	9	0	7	42
S1	Wue	+ Putz	0	3	0	0	0	0	0	0	23	2	0	0	28
S1	Frei	U= 1,14 W/m ² K	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0	8
S2	Hof	MW (Ziegel)	3	0	0	0	0	0	0	1	22	9	0	1	36
S2	Wue	+ Holzpaneel	0	3	0	0	0	0	0	0	17	2	0	0	22
S2	Frei	U= 1,14(o.Paneel)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0	8
S3	Hof	PB (Porenbeton)	3	0	0	0	0	0	0	0	18	8	0	7	36
S3	Wue	+ Putz	0	3	0	0	0	0	0	0	8	2	0	0	13
S3	Frei	U= 0,35 W/m ² K	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	5
S4	Hof	PB (Porenbeton)	27	12	0	0	0	0	0	0	26	24	14	17	120
S4	Wue	+ Putz	29	17	0	0	0	0	0	0	9	16	13	9	93
S4	Frei	U= 0,35 W/m ² K	5	0	0	0	0	0	0	0	3	6	24	9	47
S5	Hof	MW (Ziegel)	65	26	0	0	0	0	0	1	27	28	18	19	184
S5	Wue	+ WDVS+ Putz	58	24	0	0	0	0	0	0	24	27	18	14	165
S5	Frei	U= 0,29 W/m ² K	37	2	0	0	0	0	0	0	7	8	31	11	96
S6	Hof	HLz (porosiert)	46	16	0	0	2	0	0	1	28	26	18	18	155
S6	Wue	+ Putz	49	21	0	0	0	0	0	0	28	31	18	13	160
S6	Frei	U= 0,30 W/m ² K	24	1	0	0	0	0	0	0	9	9	31	10	84
S7	Hof	HLz (porosiert)	57	32	0	0	4	0	0	1	26	27	16	17	180
S7	Wue	+ Holzpaneel	55	27	0	1	0	0	0	0	12	23	18	12	148
S7	Frei	U= 0,30(o.Paneel)	32	2	0	0	0	0	0	0	4	7	28	9	82

* n_{1,2,3} = 0,5/h + 3x Stoßlüften a' 15min/Tag; U_{w1,2,3} = 3,0 W/m² K; U_{Glasrand 1,2,3} = ca. 5,00 W/m² K
* n_{4,5,6,7} = 0,1/h + 3x Stoßlüften a' 15min/Tag; U_{w4,5,6,7} = 1,3 - 1,6 W/m² K; U_{Glasrand 4,5,6,7} = ca. 4,00 W/m² K

Tabelle 5 Auflistung der monatlichen Tage mit Tauwasser am Scheibenrand im Schlafzimmer der berechneten Varianten.

**Standardwohnung, min $\theta_i = 20^\circ\text{C}$
Tauwassertage am Scheibenrand bei vorgegebener Lüftung ***

Nr. Wand	Ort	Aufbau	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Summe
S1	Hof	MW (Ziegel)	1	0	0	0	0	0	0	1	6	2	0	2	12
S1	Wue	+ Putz	0	1	0	0	0	0	0	0	8	1	0	0	10
S1	Frei	U= 1,14 W/m ² K	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
S2	Hof	MW (Ziegel)	1	0	0	0	0	0	0	1	7	2	0	1	12
S2	Wue	+ Holzpaneel	0	1	0	0	0	0	0	0	7	1	0	0	9
S2	Frei	U= 1,14(o.Paneel)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	3
S3	Hof	PB (Porenbeton)	1	0	0	0	0	0	0	0	6	2	0	2	11
S3	Wue	+ Putz	0	1	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	5
S3	Frei	U= 0,35 W/m ² K	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
S4	Hof	PB (Porenbeton)	8	3	0	0	0	0	0	0	6	6	5	3	31
S4	Wue	+ Putz	10	2	0	0	0	0	0	0	4	5	3	3	27
S4	Frei	U= 0,35 W/m ² K	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	7	2	14
S5	Hof	MW (Ziegel)	12	6	0	0	0	0	0	1	6	6	5	3	39
S5	Wue	+ WDVS+ Putz	12	4	0	0	0	0	0	0	8	7	5	5	41
S5	Frei	U= 0,29 W/m ² K	11	1	0	0	0	0	0	0	3	2	8	3	28
S6	Hof	HLz (porosiert)	11	4	0	0	1	0	0	1	7	5	5	4	38
S6	Wue	+ Putz	12	3	0	0	0	0	0	0	10	7	4	5	41
S6	Frei	U= 0,30 W/m ² K	9	1	0	0	0	0	0	0	3	3	6	2	24
S7	Hof	HLz (porosiert)	10	8	0	0	1	0	0	1	6	7	5	3	41
S7	Wue	+ Holzpaneel	13	5	0	1	0	0	0	0	6	6	5	5	41
S7	Frei	U= 0,30(o.Paneel)	9	1	0	0	0	0	0	0	1	2	6	2	21

* n_{1,2,3} = 0,5/h + 3x Stoßlüften a' 15min/Tag; U_{w1,2,3} = 3,0 W/m² K; U_{Glasrand 1,2,3} = ca. 5,00 W/m² K
* n_{4,5,6,7} = 0,1/h + 3x Stoßlüften a' 15min/Tag; U_{w4,5,6,7} = 1,3 - 1,6 W/m² K; U_{Glasrand 4,5,6,7} = ca. 4,00 W/m² K

Die Berechnungen zeigen, dass die bessere Feuchtepufferwirkung der Wandbekleidung mit unbehandelten Holzpaneelen im Allgemeinen zu einer Verringerung der Tauwasserstunden gegenüber den verputzten Wänden führt. Interessanterweise gilt dies nicht für die Variante 7 in Hof, bei der mehr Tauwasserstunden verzeichnet

werden als bei Variante 6 mit verputzter Wand. Zur Klärung sollten dazu weitere Untersuchungen erfolgen.

Der Variantenvergleich in Bild 4 macht deutlich, dass die Häufigkeit des Tauwasserausfalls bei den Altbau-Varianten deutlich geringer ist als bei den Neubauvarianten.

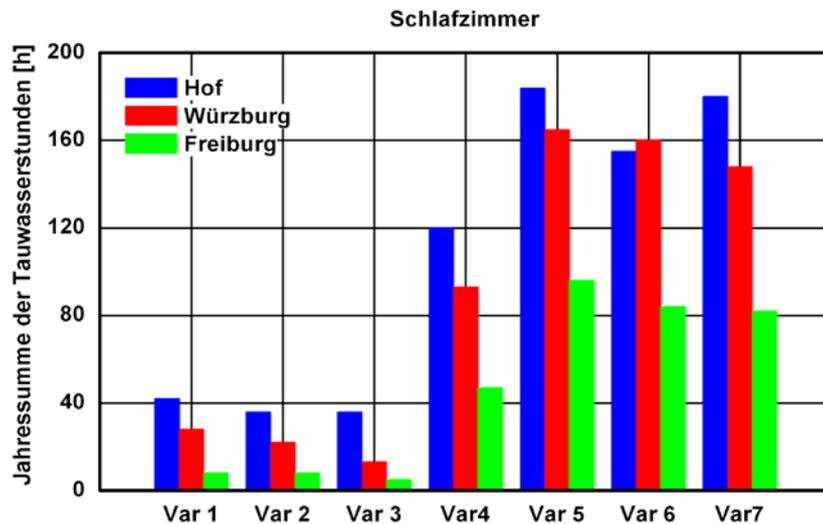


Bild 4 Jährliche Tauwasserstunden am Schlafzimmerfenster der Varianten 1 bis 7 für die drei Standorte.

Zusätzlich wurde auch der Einfluss der Raumlufttemperatur untersucht. Bild 5 zeigt beispielhaft den Einfluss einer Absenkung der Raumlufttemperatur auf 18 °C und einer Erhöhung auf 22 °C für die Variante 1 und 5. Demgemäß führt das Absenken der Innenraumtemperaturen um 2 °C zu einer Verdopplung der Tauwasserstunden am Fenster. Wird hingegen die Innenraumtemperatur um 2 °C auf 22 °C angehoben, führt dies in etwa zu einer Halbierung der Tauwasserbildung. Das gilt für alle gewählten Klimastandorte.

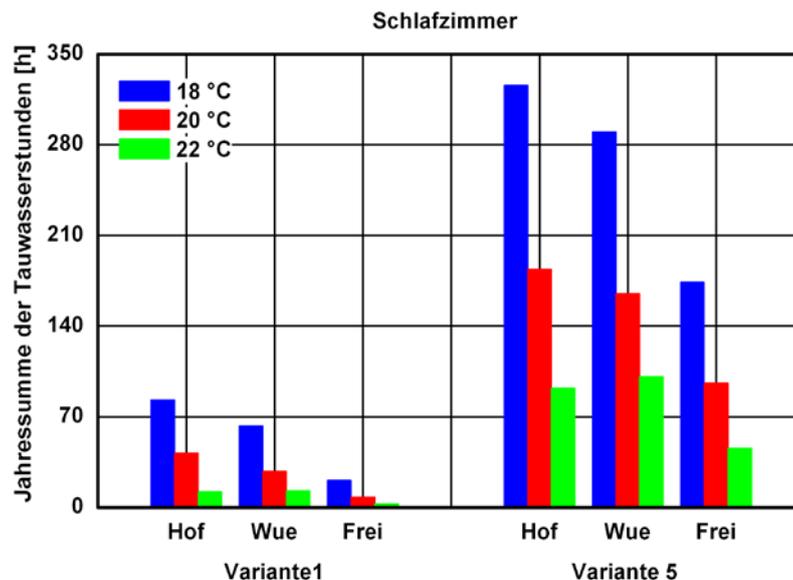


Bild 5 Jährliche Tauwasserstunden am Schlafzimmerfenster der Varianten 1 und 5 in Abhängigkeit von der Raumtemperatur.

Wohnzimmer

Die monatliche Verteilung und die Jahressummen der Tauwasserstunden am Wohnzimmerfenster sind in Tabelle 6 gelistet, Bild 6 zeigt die Jahressummen.

Grundsätzlich zeigt sich bei den Altbau-Varianten ein ähnliches Bild wie beim Schlafzimmer, mit dem Schwerpunkt der Taupunkttemperaturunterschreitungen in der herbstlichen Übergangszeit. Interessanterweise fallen in Hof im Wohnzimmer mehr Tauwasserstunden als im Schlafzimmer an, in Würzburg und Freiburg dagegen gleichviel oder weniger. Die Unterschiede bezüglich der Dauer des Tauwasserausfalls zwischen den drei Klima-Standorten sind noch gravierender als im Falle des Schlafzimmers. In Hof beträgt die Gesamtzeit, in der Tauwasser ausfällt, das fünf bis zwölffache gegenüber Freiburg und das drei bis achtfache im Vergleich zu Würzburg.

Tabelle 6 Auflistung der monatlichen Tauwasserstunden am Scheibenrand im Wohnzimmer der berechneten Varianten.

Standardwohnung, min $\theta_i = 20^\circ\text{C}$
 Tauwasserstunden am Scheibenrand bei vorgegebener Lüftung *

Nr. Wand	Ort	Aufbau	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Summe
W1	Hof	MW (Ziegel)	6	0	0	0	0	0	0	2	32	14	0	11	65
W1	Wue	+ Putz	0	2	0	0	0	0	0	0	19	2	0	0	23
W1	Frei	U= 1,14 W/m ² K	0	0	0	0	0	0	0	0	6	3	3	0	12
W2	Hof	MW (Ziegel)	5	0	0	0	0	0	0	2	34	14	0	2	57
W2	Wue	+ Holzpaneel	0	1	0	0	0	0	0	0	8	1	0	0	10
W2	Frei	U= 1,14(o.Paneel)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	2	0	8
W3	Hof	PB (Porenbeton)	4	0	0	0	0	0	0	0	24	11	0	10	49
W3	Wue	+ Putz	0	1	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	6
W3	Frei	U= 0,35 W/m ² K	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	4
W4	Hof	PB (Porenbeton)	37	16	0	0	0	0	0	0	35	33	19	23	163
W4	Wue	+ Putz	14	8	0	0	0	0	0	0	4	8	6	4	44
W4	Frei	U= 0,35 W/m ² K	4	0	0	0	0	0	0	0	2	5	19	7	37
W5	Hof	MW (Ziegel)	99	40	0	0	0	0	0	2	41	43	27	29	281
W5	Wue	+ WdVS+ Putz	48	20	0	0	0	0	0	0	20	22	15	12	137
W5	Frei	U= 0,29 W/m ² K	56	3	0	0	0	0	0	0	11	12	46	16	144
W6	Hof	HLz (porosiert)	57	20	0	0	3	0	0	1	35	32	22	22	192
W6	Wue	+ Putz	45	19	0	0	0	0	0	0	26	28	16	12	146
W6	Frei	U= 0,30 W/m ² K	29	1	0	0	0	0	0	0	11	11	38	12	102
W7	Hof	HLz (porosiert)	71	40	0	0	5	0	0	1	32	33	20	21	223
W7	Wue	+ Holzpaneel	50	25	0	1	0	0	0	0	11	21	16	11	135
W7	Frei	U= 0,30(o.Paneel)	39	2	0	0	0	0	0	0	5	9	34	11	100

* $n_{1,2,3} = 0,5/h + 3x \text{ Stoßlüften a' } 15\text{min/Tag}$; $U_{w1,2,3} = 3,0 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; $U_{\text{Glasrand } 1,2,3} = \text{ca. } 5,00 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

* $n_{4,5,6,7} = 0,1/h + 3x \text{ Stoßlüften a' } 15\text{min/Tag}$; $U_{w4,5,6,7} = 1,3 - 1,6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$; $U_{\text{Glasrand } 4,5,6,7} = \text{ca. } 4,00 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

Bei den Neubau-Varianten werden die meisten Tauwasserstunden, wie beim Schlafzimmer, im Januar gezählt. Doch auch im Februar und in den Herbstmonaten kommt es häufiger zum Beschlagen der Fensterscheiben, wobei auch hier eine klare Abstufung zwischen den unterschiedlichen Orten zur erkennen ist. Gegenüber dem Schlafzimmer fallen in Hof und Freiburg beim Neubau mehr Tauwasserstunden an, in Würzburg weniger.

Die Bedeutung der Raumtemperatur (siehe Bild 7) ist vergleichbar mit den Ergebnissen des Schlafzimmersfensters. Auch in Bezug auf den Einfluss Feuchtepufferung gelten die bereits für das Schlafzimmer gemachten Aussagen.

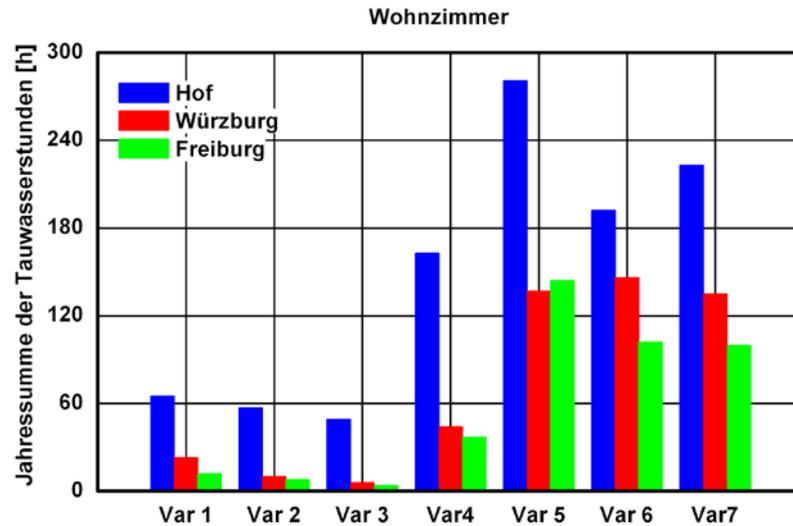


Bild 6 Jährliche Tauwasserstunden am Wohnzimmerfenster der Varianten 1 bis 7 für die drei Standorte.

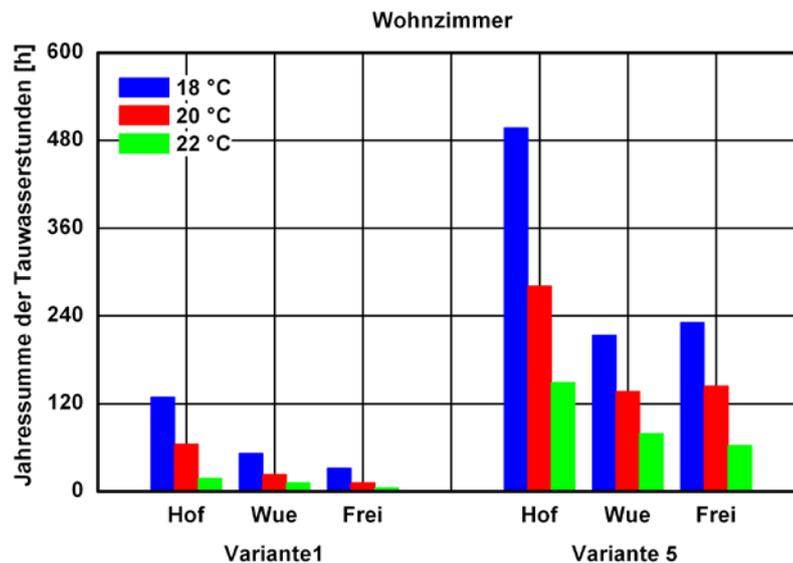


Bild 7 Jährliche Tauwasserstunden am Wohnzimmerfenster der Varianten 1 und 5 in Abhängigkeit von der Raumtemperatur.

6. Zusammenfassung

Zur Bestimmung, welche Häufigkeit an Taupunkttemperaturunterschreitungen an Fenstern als normal gelten kann und ab wann die Situation zu beanstanden ist, werden hygrothermische Berechnungen mit dem Raumklimamodell WUFI-Plus® und dem eindimensionalen Simulationsprogramm WUFI® 4.2 für eine Standardwohnung, bei normaler Wohnraumnutzung, mit einem entsprechenden Tagesprofil der Feuchtelast, durchgeführt. Insgesamt werden für ein Schlafzimmer und ein Wohnzimmer je sieben Varianten, drei für einen Altbau und vier für einen Neubau, untersucht. Um eine generelle Aussage für die deutsche Verhältnisse treffen zu können, wurden die drei Standorte Hof, Würzburg und Freiburg gewählt, die

jeweils ein kühles, ein durchschnittliches und ein warmes Klima Deutschlands repräsentieren.

Für die Berechnungen wird der Wärmedurchgangskoeffizient der kältesten Stelle des Fensters, der Glasrandverbund, zugrunde gelegt. Wie eine Literaturrecherche zeigt, ergibt sich für ein modernes Fenster mit einem U_w -Wert von $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem Aluminiumabstandshalter hier ein mittlerer U-Wert von etwa $3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, bei Verwendung eines verbesserten Abstandshalters von ca. $2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Beim Altbaufenster mit einem U_w -Wert von $1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegt dieser Wert bei ca. $4,75 \text{ W/m}^2\text{K}$. Für die Berechnungen werden diese Werte jeweils ganzzahlig aufgerundet.

Grundsätzlich zeigen die Berechnungen, dass die Taupunkttemperaturunterschreitungen im Altbau deutlicher seltener sind als im Neubau. Auf Grund der Undichtigkeiten der Altbaufenster und des damit verbundenen erhöhten Infiltrationsluftwechsels ist dort überhaupt nur in der Übergangszeit zum Herbst mit nennenswertem Tauwasseranfall zu rechnen. Die für die Altbau-Varianten berechneten Tauwasserstunden liegen bei der ungünstigsten Wandkonstruktion je nach Standort bei 8 bis 65 Stunden an 3 bis 12 Tagen, wobei der Haupttauwasseranfall jeweils im September stattfindet. Tendenziell ist die Betauung am Wohnzimmerfenster etwas höher als beim Schlafzimmer. Diese Häufigkeit an Betauung der Fenster dürfte somit als normal und zumutbar anzusehen sein.

Im Neubau fällt wegen des geringeren Infiltrationsluftwechsels auf Grund der modernen dichten Fenster bei sonst gleichen Randbedingungen speziell im Herbst und im Winter deutlich mehr Tauwasser an. Für die Neubau-Varianten ergeben sich bei der ungünstigsten Wandkonstruktion mit ca. 100 bis über 280 Stunden an 28 bis 40 Tagen wesentlich höher Betauungszeiten. Diese Werte erscheinen im Vergleich zum Altbau als zu hoch, um als normal gelten zu können, so dass eine kontinuierliche Feuchteabfuhr durch Zusatzmaßnahmen geboten ist. Zur Problematik des richtigen Wohnverhaltens und der angepassten Wohnungslüftung heißt es in [14] „Die Wohnungslüftung ist unter den heutigen Bau- und Umweltbedingungen ein Problem, dessen Lösung zwar möglich ist, aber personellen oder gerätemäßigen Einsatz erfordert. Zwei Möglichkeiten bieten sich grundsätzlich an: Fensterlüftung wie bisher, aber unter verbesserten Bedingungen, und freie oder ventilatorgestützte Lüftung nach DIN 1946-6.“ In [14] werden unter den oben erwähnten „verbesserten Bedingungen“ so genannte „Dosierlüfter“ verstanden, die fein regulierbar sind und in das Fenster integriert werden können. Damit wird eine zeitlich begrenzte Ergänzung zur Fensterlüftung ermöglicht und zwar ohne die unkontrollierbaren Wärmeverluste wie bei undichten Fenstern. Welch positiven Effekt eine angepasste Lüftung bei einem Neubau mit gutem Wärmestandard hat, zeigt sich, wenn man Variante 5 mit einem Grundluftwechsel von $0,3/\text{h}$, der durch eine Dosierlüftung sichergestellt werden könnte, berechnet. Im gesamten Jahr fällt dann kein Tauwasser an! Eine Verbesserung der Tauwassersituation an den Fensterscheiben kann auch durch den Einsatz eines Abstandshalters erreicht werden, der statt des hochwärmeleitfähigen Aluminiums aus Kunststoffen oder Edelstahl besteht. In einer Vergleichsrechnung für das Schlafzimmerfenster der Variante 5 ergeben sich bei Einsatz der verbesserten Abstandshalter am Scheibenrand (U -Wert = $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$) lediglich vereinzelte Taupunkttemperaturunterschreitungen.

Die Berechnungen demonstrieren auch eindrucksvoll den Einfluss der Raumtemperatur. Das Absenken der Innenraumtemperaturen um $2 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu einer Verdopplung der Tauwasserstunden am Fenster. Wird hingegen die Innenraumtemperatur um $2 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $22 \text{ }^\circ\text{C}$ angehoben, führt dies in etwa zu einer Halbierung der Tauwasserbildung. Das gilt für alle gewählten Klimastandorte.

7. Literatur

- [1] "Warm Edge" Abstandshalter für Isolierglas. CH-8280 Kreuzlingen : Swisspacer Saint-Gobain Glass Solutions, 2007.
- [2] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA-Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81-94. Hrsg.: WTA-Publications, München.
- [3] Lengsfeld, K.; Holm, A.: Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI-Plus. Bauphysik 29 (2007), Heft 3, Seite 178-186. Ernst & Sohn Verlag Berlin.
- [4] Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K.: Feuchttransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart (1996).
- [5] Künzel, H.M.: Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, edificatio Verlag (1999).
- [6] Künzel, H.M., Krus, M.: Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1 (1995), H. 1, S. 5-19.
- [7] Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M.: Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1 (1995), H. 4, S. 267-279
- [8] Künzel, H.M. und Kießl, K.: Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau (1998).
- [9] Wagner, A.: Energieeffiziente Fenster und Verglasungen. Karlsruhe: BINE Informationsdienst, 2008. ISBN 978-3-934595-61-3.
- [10] TGI-Spacer: Wärmetechnische Daten gemäß Bundesverband Glas. Kassel: Technoform Glass Insulation GmbH, 2008.
- [11] Borsch-Laaks, R.: Kondensat am Fenster. Holzbau - die neue quadriga. 2007, 4.
- [12] Schmid, J.: Tauwasserproblematik im Beschlagsfalz. Rosenheim : isp Rosenheim, 2009.
- [13] Ruf, M.: Tauwasser an Fensterscheiben. Masterarbeit, Master Online Bauphysik, Universität Stuttgart, 2009.
- [14] Künzel, H. (Hrsg.): Wohnungslüftung und Raumklima, S.339 - 352. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag, 2009. ISBN 978-3-8167-7659-8.