

Lokale Beheizung von thermischen Schwachstellen

M. Krus, S. Wurm

1. Einleitung

Im Bestand vorkommende thermische Schwachstellen, z.B. an Gebäudeecken, können zum Teil nur mit erheblichem Aufwand saniert werden. Auch wenn langfristig betrachtet eine Dämmung der Schwachstelle nachhaltiger ist, wird häufig eine deutlich erhöhte Lüftung vorgeschlagen, um Schimmelpilzbildung oder Feuchteflecken zu vermeiden. Dies führt zusätzlich zu Wärmeverlusten über die Wärmebrücke zu erhöhten Lüftungswärmeverlusten. Diese Arbeit befasst sich mit der Frage, ob beim Vorhandensein typischer thermischer Schwachstellen der Einsatz einer lokalen elektrischen Beheizung sinnvoller sein kann als ein verstärktes und vom Nutzer schwer kalkulierbares Lüften (siehe auch frühere Untersuchungen in [1]).

2 Durchführung der Untersuchungen

Zur Klärung dieser Fragestellung werden Rechenprogramme der WUFI[®]-Familie, das Schimmelpilzprognosemodell WUFI[®]-Bio, das zweidimensionale Berechnungsprogramm WUFI[®]-2D und das Raummodell WUFI[®]-Plus [2-4] verwendet, die die hygrothermische und energetische Simulation der beschriebenen Situationen erlauben [5-9]. Verglichen werden der Energie- sowie der Primärenergiebedarf, da das Ergebnis aus ökologischer Sicht auch von dem zur Beheizung eingesetzten Energieträger abhängig ist. Als Grundlage dient dazu eine Recherche zu typischen im Bestand vorkommenden Wärmebrückenproblemen sowie auf dem Markt befindlichen Heizkabeln und Heizfolien [10].

Verglichen werden der Einfluss von verstärkter Lüftung und der Einsatz einer örtlichen elektrischen Beheizung mittels Heizkabel zur Vermeidung von Schimmelpilzen an Wärmebrücken und der dazu erforderliche Energieaufwand. Die Berechnungen erfolgen für eine Modellwohnung, die sich in einem typischen Bestandsgebäude befindet. Für drei ausgewählten Klimastandorte - Hof, Würzburg und Freiburg als Vertreter für einen kalten, gemäßigten und warmen Standort in Deutschland - werden für diese Modellwohnung bei beispielhafter Belegung mit 2 Erwachsenen und 2 Kindern mit WUFI[®]-Plus die klimatischen Bedingungen im Innenraum über einen Jahresverlauf ermittelt. Anschließend werden mit WUFI[®]-2D die aus-

gewählten Wärmebrücken modelliert und standortbezogen mit den jeweiligen klimatischen Bedingungen im Innenraum die Feuchte- und Temperaturwerte auf der Oberfläche der Wärmebrücke ermittelt. Mit diesen Datensätzen wird dann mit Hilfe von WUFI®-Bio berechnet, ob mit Schimmelpilzbildung zu rechnen ist. Als Substratklasse wird die Klasse I gewählt. Damit werden biologisch verwertbare Substrate, wie z.B. Tapeten, Gipskarton, Bauprodukte aus gut abbaubaren Rohstoffen und Material wie dauerelastische Fugen beschrieben [2].

Variiert wird dabei für jeden Standort die Luftwechselrate, um zu ermitteln, ab welcher Luftwechselrate es an der jeweiligen Wärmebrücke nicht mehr zu Schimmelpilzwachstum kommt. Versuchsberechnungen zeigten, dass es bei einer Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ zu Schimmelpilzbildung an den Wärmebrücken kommt, aber nicht an den ungestörten Wandoberflächen [10]. Ausgehend von dieser Mindest-Luftwechselrate und einer Mindest-Innenraumtemperatur von 20°C wird berechnet, welche zusätzliche Energiemenge zur verstärkten Lüftung benötigt wird, um Schimmelpilzwachstum im Bereich der Wärmebrücke zu verhindern. Dabei wird die Luftwechselzahl in $0,1 \text{ h}^{-1}$ -Schritten solange erhöht, bis auch an den Wärmebrücken kein Schimmelpilzwachstum mehr zu erwarten ist. Anschließend wird in WUFI®-2D an der Wärmebrücke bei einer Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ ein Heizkabel mit variierender Leistung modelliert, um für diesen Fall den Einfluss auf das berechnete Schimmelpilzwachstum während der Nutzungsdauer zu ermitteln. Dabei wird als Einfachlösung das Heizkabel in der Nutzungsphase dauerhaft und ohne Leistungsregelung betrieben.

2.1 Aufbau der Bestandswohnung

Es wird eine Wohnung mittig in einem mehrstöckigen Mehrfamilienhaus angesetzt, sodass aufgrund gleicher Nutzung nach oben und unten keine Wärme- und Feuchtetransportvorgänge stattfinden (siehe Bild 1). Die Außenmaße betragen 9 m mal 12 m bei einer Raumhöhe von 2,8 m. Das Gebäude besitzt Außenwände mit einer Gesamtdicke von ca. 40 cm aus Ziegelmauerwerk mit außenseitig Zementputz und innenseitig Gipsputz. Der Wärmedurchgangskoeffizient dieser Wand liegt bei etwa $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Fußboden bzw. Decke sind aus Beton mit oben aufliegendem schwimmendem Estrich. Die hygrothermischen Materialkennwerte sind der WUFI®-Materialdatenbank entnommen. Die Wohnung besitzt typische Altbaufenster mit Doppelverglasung und einem U-Wert von $2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Es steht eine Heizung mit einer Leistung von 25 kW zur Verfügung.

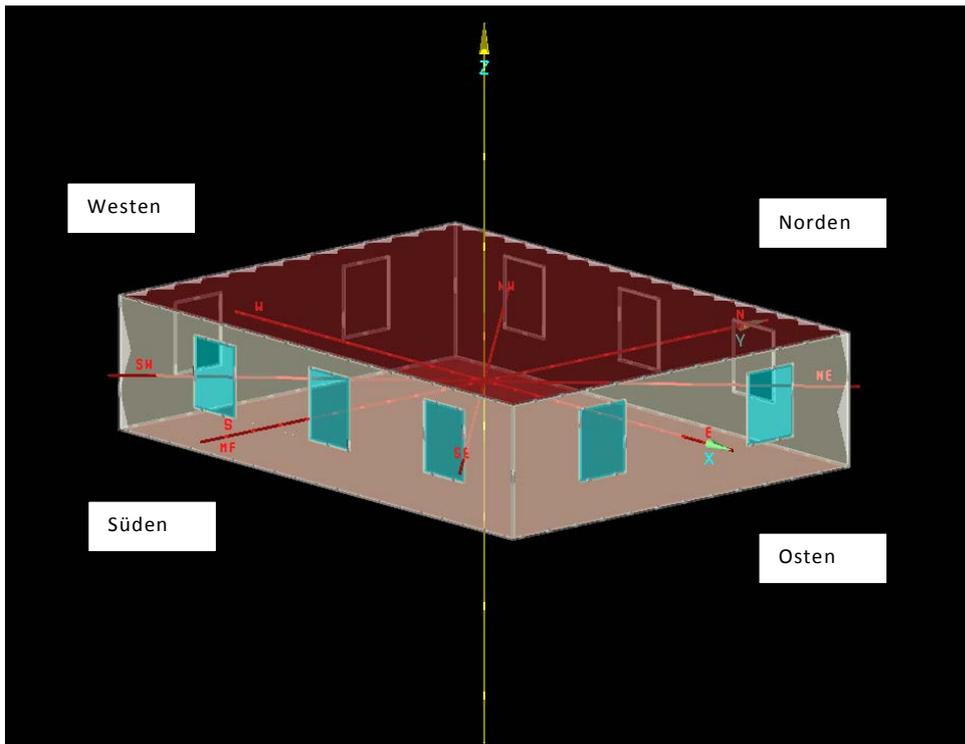


Bild 1: Ansicht der Beispielwohnung mit Angabe zur Ausrichtung.

2.2 Feuchte- und Wärmelasten

Die Feuchtelasten resultieren hauptsächlich durch die anwesenden Personen, deren Atmung und Transpiration sowie Nutzungsverhalten, siehe Tabelle 1. Berücksichtigt werden dabei Duschen/Baden, Kochen, Spülen, Wäschetrocknen und die Verdunstung durch Pflanzen. Für die Berechnungen wird beispielhaft angenommen, dass der Altbau mit zwei Erwachsenen und zwei Kindern bewohnt ist und insgesamt 6 Topfpflanzen (entspricht 10 g/h) aufgestellt sind. Die Wäsche wird in der Wohnung getrocknet (entspricht 100 g/h), zusätzlich wird das Trocknen der Handtücher in Bad und Küche berücksichtigt (entspricht 40 g/h). Es wird hier bewusst von einer überdurchschnittlich hohen Feuchteabgabe durch Nutzung ausgegangen. Die Wärmeabgabe wird bei allen Berechnungen nicht berücksichtigt, da sie zwar absolut betrachtet zu einer Veränderung der notwendigen Heizenergie führt, das Ergebnis des Vergleichs zwischen Lüftung und Einsatz Heizkabel jedoch nicht beeinflusst.

Uhrzeit	Tätigkeit	Feuchtemenge einschließlich Wäschetrocknung und Pflanzen [g]
22:00 bis 06:00 Uhr	4 Personen schlafend	2.320
06:00 bis 07:00 Uhr	Duschen, vier Personen anwesend	1.150
07:00 bis 08:00 Uhr	Kaffee/Tee kochen, vier Personen anwesend	475
08:00 bis 09:00 Uhr	vier Personen anwesend	350
09:00 bis 16:00 Uhr	Wohnung nicht belegt	1.050
16:00 bis 18:00 Uhr	zwei Personen anwesend (Kinder)	500
18:00 bis 19:00 Uhr	Kochen, vier Personen anwesend	825
19:00 bis 20:00 Uhr	Duschen zwei Personen, Geschirrspülen, vier Personen anwesend	1.035
20:00 bis 21:00 Uhr	Schlafen zwei Personen (Kinder), zwei Personen anwesend	320
21:00 bis 22:00 Uhr	Duschen zwei Personen, zwei Personen (Kinder) schlafend, zwei Personen anwesend	730
Gesamtmenge		8.755

Tabelle 1: Täglicher Feuchteeintrag Beispielwohnung.

2.3 Aufbau der betrachteten Wärmebrücken

Als typische Wärmebrücken werden eine jeweils in nordöstlicher Richtung liegende Außenwandkante, eine verschattete Balkonplatte, durchgehend aus 16 cm Beton, und ein Geschossdeckenaufleger zugrunde gelegt. Zur Berücksichtigung des erschwerten Wärmeübergangs direkt an der Kante wird der Wärmeübergangswiderstand an der Innenoberfläche in Richtung Kante entsprechend Bild 1 stufenweise erhöht. Der äußere Wärmeübergangswiderstand R_{se} beträgt 0,04 (m²K)/W.

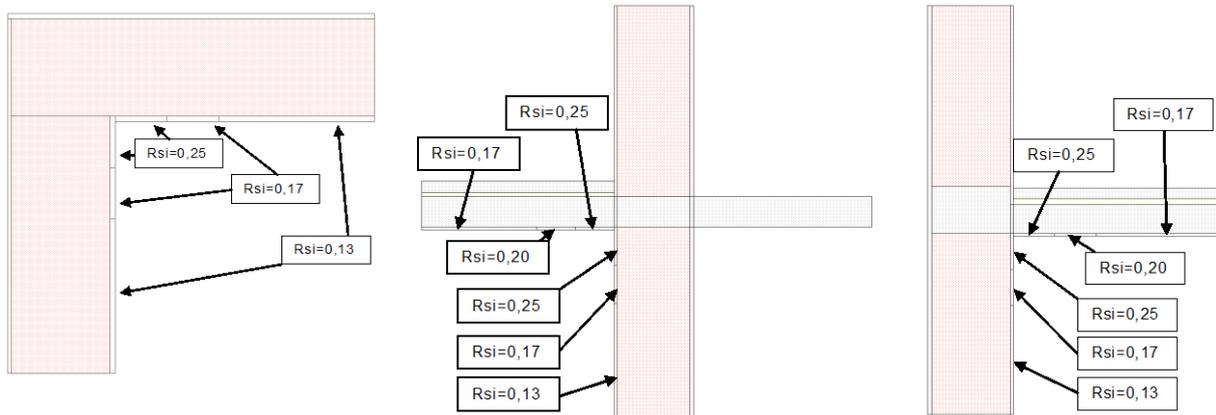


Bild 2: Aufbau Außenwandkante(links), Balkonplatte (mittig) und Geschossdeckenaufleger (rechts). Mit eingezeichnet sind die örtlich zugrunde gelegten Wärmeübergangswiderstände in m^2K/W .

2.4 Betrieb mit Heizkabel

Für die Berechnungen wird als Einsatzzeitraum für das ausgewählte Heizkabel Anfang September bis Ende März angenommen. Damit ist die durchschnittliche Heizperiode an den drei Standorten abgebildet. Eine genauere Unterscheidung der standortbezogenen Heizperioden wurde als realitätsfern erachtet, da angenommen wird, dass die Mieter eher auf ganze Monate bezogene Einschaltintervalle realisieren werden. Aufgrund der Ergebnisse für die jeweiligen Standorte werden gegebenenfalls iterativ kürzere Einsatzzeiten berechnet. Die Zeit von Anfang April bis Ende August bleibt jedoch grundsätzlich einsatzfrei, da davon ausgegangen wird, dass in diesen Monaten durch verstärkte Lüftung eine Lüftungsrate möglich ist, die die Bildung von Schimmelpilzen an den ausgesuchten Wärmebrücken verhindert.

Das ausgewählte Heizkabel hat eine Heizleistung von 15 W/m . Je nach Ergebnis werden auch Heizkabel mit niedrigeren oder höheren Heizleistungen bei den Simulationen eingesetzt. Da es sich bei den drei betrachteten Wärmebrücken um linienförmige Wärmebrücken handelt, ist hier eine Heizfolie nicht geeignet. Das Heizkabel wird direkt an der tiefsten Temperatur der Wärmebrücke (ermittelt mit WUFI[®]-2D) angebracht und über die Heizperiode kontinuierlich betrieben.

3. Ergebnisse und Bewertung

3.1 Schimmelpilzvermeidung über Lüftung

Die Ergebnisse für die natürliche Lüftung der drei Standorte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Man erkennt, dass sowohl in Hof als auch in Würzburg erst ab einer mittleren Luftwechselrate von $0,7 \text{ h}^{-1}$ an der Außenwandkante Schimmelpilzbildung vermieden wird. Dies ist natürlich auch in der relativ hohen angenommenen Feuchtelast begründet. In Freiburg ist aufgrund des wärmeren Klimas bereits ab

einer mittleren Luftwechselrate von $0,6 \text{ h}^{-1}$ keine Schimmelpilzgefahr mehr gegeben. In der Tabelle sind die Wärmeverluste durch Lüftung mit aufgeführt, um den zusätzlichen Energiebedarf durch zusätzliche Lüftung zur Vermeidung des Schimmelpilzwachstums an den Wärmebrücken zu ermitteln.

Tabelle 2: Lüftungswärmeverluste zur Schimmelpilzvermeidung.

Luftwechsel [h^{-1}]	Außenwandkante	Balkonplatte	Geschossdecke	Wärmeverluste durch Lüftung [kWh]
Hof				
0.3	Schimmel	Schimmel	Schimmel	2.637
0.4	Schimmel	Schimmel	Schimmel	3.518
0.5	Schimmel	Schimmel	kein Schimmel	4.399
0.6	Schimmel	kein Schimmel		5.280
0.7	kein Schimmel			6.162
Würzburg				
0.3	Schimmel	Schimmel	Schimmel	2.216
0.4	Schimmel	Schimmel	Schimmel	2.954
0.5	Schimmel	Schimmel	Schimmel	3.692
0.6	Schimmel	kein Schimmel	kein Schimmel	4.430
0.7	kein Schimmel			5.168
Freiburg				
0.3	Schimmel	Schimmel	Schimmel	1.969
0.4	Schimmel	Schimmel	Schimmel	2.623
0.5	Schimmel	Schimmel	kein Schimmel	3.278
0.6	kein Schimmel	kein Schimmel		3.931

3.2 Einsatz Heizkabel zur Schimmelpilzvermeidung

Die in [10] durchgeführten Berechnungen zeigen, dass zur Schimmelpilzvermeidung in der Außenecke ein Heizkabel mit einer Heizleistung von 15 W/m am besten geeignet ist. Mit 10 W/m kann Schimmelpilzbildung nicht sicher vermieden werden und mit 20 W/m ergibt sich ein unnötiger Mehrbedarf. Für die Wärmebrücke bei der Balkonplatte ist ebenso wie bei der Geschossdecke ein Heizkabel mit einer Leistung von 10 W/m ausreichend. In allen Fällen ist der Einsatz über die ganze Periode von Anfang September bis Ende März am sinnvollsten.

Die Gesamt-Heizleistung für das benötigte Heizkabel zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum an den unterschiedlichen Wärmebrücken ist in Tabelle 3 aufgelistet. Es wird davon ausgegangen, dass neben der Balkonplatte die beiden nach Nordost und Nordwest orientierten Außenkanten und das nach Norden orientierte Geschossdeckenaufleger beheizt werden muss. Aufgrund des gleichen Einsatzzeitraums ergibt sich an allen drei Standorten der gleiche Energiebedarf.

Tabelle 3: Ermittlung der erforderlichen Heizleistung beim Einsatz der Heizkabel zur Schimmelpilzvermeidung.

Wärmebrücke	Heizleistung [W/m]	Länge [m]	Anzahl [Stück]	Einsatzzeitraum [h/a]	Gesamt- heizleistung [kWh/a]
Außenwandkante	15	2,8	2	5.124	430
Balkonplatte	10	5,0	1	5.124	256
Geschossdecken- auflager	10	12,0	1	5.124	615

3.3 Vergleich erhöhte Lüftung – Einsatz Heizkabel

In Tabelle 4 ist der zusätzliche Energieaufwand zur Schimmelpilzvermeidung aufgelistet, wobei bei der Lüftung der Unterschied zu einer Lüftungsrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ zugrunde gelegt wurde.

Tabelle 4: Vergleich des Energiebedarfs für zusätzliche Lüftung und Heizkabeleinsatz gegenüber einer Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$.

Wärme- brücke	Lüftungsmehrbedarf gegenüber Luftwechsel $0,3 \text{ h}^{-1}$						Heizkabel
	Standort Hof [kWh]	Luft- wechsel [h^{-1}]	Standort Würzburg [kWh]	Luft- wechsel [h^{-1}]	Standort Freiburg [kWh]	Luft- wechsel [h^{-1}]	Alle drei Standorte [kWh]
Außen- wandkante	3.525	0,7	2.952	0,7	1.962	0,6	430
Balkon- platte	2.643	0,6	2.214	0,6	1.962	0,6	256
Geschoss- decken- auflager	1.762	0,5	2.214	0,6	1.309	0,5	615

Es zeigt sich, dass an allen drei Standorten und bei den drei betrachteten Wärmebrücken der Einsatz des Heizkabels wesentlich weniger Energie bedarf als die erhöhte Lüftung zur Vermeidung von Schimmelpilzschäden. Die dabei zugrunde gelegte Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ dürfte zwar in zahlreichen Fällen realistisch sein, stellt aber eher die untere Grenze der üblichen Lüftung im Bestandsbau dar. Aus diesem Grund ist in der folgenden Tabelle 5 das Ergebnis für eine eher typische Luftwechselrate von $0,5$ dargestellt. Dabei wurde nicht berücksichtigt, dass in diesem Fall auch für den Einsatz des Heizkabels entweder eine niedrigere Leistung oder eine kürzere Betriebsperiode möglich wäre. Auch bei einer Grundluftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$ ist der Energiebedarf für die zusätzliche Lüftung zur Schimmelpilzvermeidung höher als für den Einsatz des Heizkabels.

Tabelle 5: Vergleich des Energiebedarfs für zusätzliche Lüftung und Heizkabelein-satz gegenüber einer Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$.

Wärmebrücke	Lüftungsmehrbedarf gegenüber Luftwechsel $0,5 \text{ h}^{-1}$						Heizkabel
	Standort Hof [kWh]	Luftwechsel [h^{-1}]	Standort Würzburg [kWh]	Luftwechsel [h^{-1}]	Standort Freiburg [kWh]	Luftwechsel [h^{-1}]	Alle drei Standorte [kWh]
Außenwandkante	1.763	0,7	1.476	0,7	653	0,6	430
Balkonplatte	882	0,6	738	0,6	653	0,6	256
Geschossdeckenauflager	0	0,5	738	0,6	0	0,5	615*

* nur in Würzburg, da an den beiden anderen Standorten bereits durch den Luftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ Schimmelpilzbildung vermieden wird.

Im Gegensatz zur Raumheizung wird das Heizkabel mit elektrischer Energie betrieben. Zur Beurteilung des ökologischen Einflusses wird in der folgenden Tabelle der Primärenergiebedarf aufgelistet. Dabei wird bei dem für das Heizkabel eingesetzten Strom eine Primärenergiefaktor von 2,6 angesetzt. Da im Bestandsbau die Wohnungen hauptsächlich mit einer Öl- oder Gasheizung betrieben werden, wird für den zusätzlichen Lüftungsmehrbedarf ein Primärenergie-Faktor von 1,1 berücksichtigt.

Tabelle 6: Vergleich des Primärenergiebedarfs für zusätzliche Lüftung und Heizkabelinsatz gegenüber einer Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$.

Wärmebrücke	Lüftungsmehrbedarf gegenüber Luftwechsel $0,3 \text{ h}^{-1}$						Heizkabel
	Standort Hof [kWh]	Luftwechsel [h^{-1}]	Standort Würzburg [kWh]	Luftwechsel [h^{-1}]	Standort Freiburg [kWh]	Luftwechsel [h^{-1}]	Alle drei Standorte [kWh]
Außenwandkante	3.878	0,7	3.247	0,7	2.158	0,6	1.120
Balkonplatte	2.907	0,6	2.435	0,6	2.158	0,6	666
Geschossdeckenauflager	1.938	0,5	2.435	0,6	1.440	0,5	1.599

Auch in Bezug auf den Primärenergiebedarf ergibt sich beim Einsatz des Heizkabels ein günstigeres Ergebnis, außer im Falle des Geschossdeckenauflegers in Freiburg, bei dem sich ein geringfügig höherer Primärenergiebedarf ergibt. Dieses Ergebnis relativiert sich allerdings, wenn für die Beheizung Energieträger mit geringerem Primärenergiefaktor eingesetzt werden (Fernwärme oder regenerative Energien).

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum an Wärmebrücken eine lokale Beheizung gegebenenfalls sinnvoller ist als eine erhöhte Lüftung der betroffenen Räume mit entsprechenden höheren Lüftungswärmeverlusten. Dabei werden drei verschiedene Wärmebrücken, Außenwandkante, Balkonplatte und Geschossdeckenaufleger, an den Standorten Hof (kalter Standort), Würzburg (gemäßigter Standort) und Freiburg (warmer Standort) betrachtet. Es wird eine übliche Wohnung mittig in einem mehrstöckigen Mehrfamilienhaus zugrunde gelegt. Ausgehend von einer „Grund“-Lüftungsrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$, bei der an allen drei Wärmebrücken Schimmelpilzwachstum auftritt, wird untersucht, ab welcher Lüftungsrate es an den jeweiligen Standorten und den betrachteten Wärmebrücken nicht mehr zu Schimmelpilzwachstum kommt und welcher Lüftungswärmeverlust damit verbunden ist. Anschließend wird bei derselben „Grund“-Lüftungsrate als Alternative zur zusätzlichen Lüftung der Einsatz eines Heizkabels an den Wärmebrücken simuliert, wobei die Heizkabel-Leistung und der

Einsatzzeitraum variiert werden. Verglichen werden sowohl der Energie- als auch der Primärenergieverbrauch.

Dabei zeigt sich, dass der Energieverbrauch für den Einsatz des Heizkabels an allen untersuchten Wärmebrücken und Standorten geringer ist, als derjenige für die zusätzliche Fensterlüftung. Wird jedoch durch Berücksichtigung des Primärenergiefaktors der unterschiedlichen Wärmeträger der Primärenergieverbrauch verglichen, ist der Einsatz des Heizkabels nicht in jedem Fall besser. Dies insbesondere dann nicht, wenn zum Betreiben des Heizkabels konventioneller Strom aus fossiler und atomarer Stromerzeugung eingesetzt wird.

Die dabei zugrunde gelegte Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ dürfte zwar in zahlreichen Fällen realistisch sein, stellt aber eher die untere Grenze der üblichen Lüftung im Bestandsbau dar. Aber auch für eine eher für den Altbau typische Luftwechselrate von $0,5 \text{ h}^{-1}$, die häufig allein durch den Infiltrationsluftwechsel erreicht wird, kann zur Schimmelpilzvermeidung der Einsatz eines Heizkabels energetisch günstiger sein als ein erhöhter Luftwechsel. Hinzu kommt die Erfahrung, dass die Nutzer ihre Lüftungsgewohnheiten nur selten ändern, sodass eine Aufforderung zu erhöhter Lüftung häufig nur eine geringe Wirkung zeigt. In vielen Fällen müsste dann der erhöhte Luftwechsel durch eine Lüftungsanlage sicher gestellt werden.

Aus bauphysikalischer und energetischer Sicht wäre es sinnvoller, die Wärmebrücken durch eine geeignete Dämmmaßnahme zu entschärfen. Da dies aber nicht immer gegenüber dem Eigentümer durchzusetzen ist und je nach örtlichen Gegebenheiten eine derartige Dämmmaßnahme auch in einigen Fällen nur mit hohem Aufwand realisierbar sein kann, ist die zusätzliche Beheizung der thermischen Schwachstelle zumindest übergangsweise aus energetischer und eventuell auch finanzieller Sicht eine geeignete Maßnahme, die einer zusätzlichen Belüftung vorzuziehen sein kann. Allerdings muss hierbei auch die zusätzliche Brandgefahr Berücksichtigung finden. Auf keinen Fall sollte deshalb eine derartige elektrische Beheizung eingesetzt werden, um Schimmelpilzwachstum hinter an gering gedämmten Außenwänden platzierten Möbeln zu vermeiden. Hier ist eine Ummöblierung sicher die bessere Lösung.

7. Literatur

- [1] Hauser, G.: Auskragende Balkonplatten bei wärmeschutztechnischen Sanierungen. *Bauphysik* 13 (1991), H. 9, S. 144-150.
- [2] Sedlbauer, Klaus. Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Universität Stuttgart: Dissertation, 2001.
- [3] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [4] 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.
- [5] Künzel, H.M., Krus, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* 1, H. 1, S. 5-19.
- [6] Krus, M., Künzel, H.M. (1996): Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden. *Internationales Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings*. Wien, 4.-10. August 1996, S. 493-498.
- [7] Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. *WTA-Schriftenreihe*, Heft 18, Aedificatio Verlag.
- [8] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H.M.; Radon, J.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen – Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumlufffeuchte. Tagungsbeitrag für das 11. Bau-klimatische Symposium der TU Dresden. 26. – 30. Sep. 2002, Dresden, S. 562 – 575.
- [9] WTA-Merkblatt 6-3-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.
- [10] Wurm, S.: Lokale Beheizung von thermischen Schwachstellen. Masterarbeit. Masterarbeit, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart, 2010.