

# **Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilzwachstum und rechnerische Beurteilung der erforderlichen Lüftung am Beispiel einer Altbausanierung**

Martin Krus, Andreas Holm, Klaus Sedlbauer, Hartwig Künzel

## **Zusammenfassung**

Zur Reduzierung von unnötig hohen Wärmeverlusten durch einen unkontrollierten Luftaustausch in Gebäuden durch Leckagen sowie zur Vermeidung von Bauschäden durch ausfallendes Tauwasser in der Baukonstruktion werden Gebäude zunehmend luftdicht gebaut. Bei unsachgemäßer manueller Fensterlüftung kann es hierbei besonders bei hohen internen Feuchtelasten zu einem Befall mit Schimmelpilzen kommen.

Eine bedarfsgerechte Lüftung reduziert durch einen angepassten Luftaustausch die Gefahr einer Schimmelpilzbildung, ohne dass unnötig hohe Lüftungswärmeverluste verursacht werden. Dabei ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzung verbunden mit unterschiedlichen Feuchtelasten für jedes Zimmer andere Lüftungserfordernisse. Nach einer kurzen Erläuterung der bauphysikalischen Ursachen für Schimmelpilzbildung wird in diesem Beitrag versucht, über Rechnersimulationen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Feuchtelasten die Vorteile und auch die Gefahren einer thermischen Altbausanierung zu veranschaulichen.

## **Einleitung**

Zahlreiche Schäden an Wohn- und Geschäftsgebäuden sind direkt oder indirekt auf die Einwirkung von Feuchte zurückzuführen. Bei der Sanierung von Altbauten sollte neben eventuell zu beseitigenden Schäden auch einer Verbesserung der energetischen Verhältnisse angestrebt werden. Dies kann zur Verminderung von vorher vorhandenen Feuchteproblemen - wie z.B. Schimmelpilzbildung durch zu niedrige Temperaturen an der Innenoberfläche - führen, unter Umständen jedoch auch neue Feuchteprobleme verursachen. Im Folgenden soll deshalb nach einer allgemeinen Aufzählung und Beschreibung der bauphysikalischen Ursachen für Schimmelpilze in Wohnräumen durch rechnerische Untersuchungen auf den Einfluss einer thermischen Sanierung auf das Schimmelpilzrisiko eingegangen werden.

## Bauphysikalische Ursachen für Schimmelpilze in Wohnräumen

Bei Bauprozessen beschäftigen sich Gerichte häufig mit den Ursachen für Schimmelpilzbefall in Gebäuden. Dabei steht meist die Frage im Vordergrund, ob die Bausubstanz, also letztlich der Eigentümer bzw. Bauherr oder unangepasstes Nutzerverhalten verantwortlich ist. Prinzipiell kann Schimmelpilzbildung nur dann auftreten, wenn die Wachstumsvoraussetzungen erfüllt sind. Feuchte spielt dabei die wesentliche Rolle. Es kann davon ausgegangen werden, dass schon ab etwa 80% relativer Luftfeuchte auf der Bauteiloberfläche Schimmelpilzbildung möglich ist. Es ist bekannt (u.a. [1]), dass Feuchte- und Schimmelpilzschäden vor allem hervorgerufen werden durch

- ungenügendes Wärmedämmniveau
- Wärmebrücken,
- erhöhte Wärmeübergangswiderstände,
- unzureichende Beheizung,
- erhöhte Feuchteproduktion in Innenräumen,
- Baufeuchte in Konstruktionen,
- unzureichende Lüftung durch die Bewohner.

Die ersten zwei Ursachen können einen Baumangel darstellen, den der Bauherr bzw. Eigentümer zu vertreten hat. Die anderen fünf sind auf unangepasstes Nutzerverhalten zurückzuführen. Im Falle der Baufeuchte sollte der Bauherr dafür sorgen, dass der Nutzer durch erhöhte Lüftung innerhalb des ersten halben Jahres einen ausreichenden Feuchteabtransport durch Lüften ermöglicht. Dazu muss auf die Notwendigkeit einer erhöhten Lüftung innerhalb des ersten Jahres hingewiesen werden. Im Folgenden soll dargestellt werden, in welcher Weise die aufgezählten Einflussgrößen das Schimmelpilzwachstumsrisiko beeinflussen.

### Wärmebrücken

Das Auftreten von Schimmelpilzen auf der Raumseite von Baukonstruktionen hängt von der sich einstellenden Oberflächentemperatur sowie -feuchte ab. Diese werden wiederum beeinflusst vom Wärmedurchgangskoeffizienten und den Wärmeübergangswiderständen sowie den im Raum herrschenden hygrothermischen Verhältnissen. Das Dämmniveau, das mit Hilfe des U-Wertes charakterisiert wird, beeinflusst maßgeblich die Oberflächentemperatur an der Innenwand und damit die dort vorliegende relative Luftfeuchte. Wärmebrücken sind dabei örtlich begrenzte Stellen in den Umfassungsflächen eines Gebäudes, durch die nach außen ein größerer Wärmeabfluss als

in den angrenzenden Bereichen stattfindet. Sie können durch die geometrischen Verhältnisse bedingt sein (z.B. Ecken) oder durch die Aneinanderreihung von Baustoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit (z.B. Tragpfeiler in einer Wand). Die Folgen von Wärmebrücken sind (neben den höheren Energieverlusten) ein Absinken der Temperatur, eine Erhöhung der Feuchte an der Innenoberfläche und damit die Gefahr einer Schimmelpilzbildung.

### Erhöhte Wärmeübergangswiderstände

Möbel, Gardinen und dergleichen stellen kaum einen Widerstand für die Feuchte dar. Sie verringern aber den konvektiven und strahlungsbedingten Wärmeübergang. Dadurch erhöht sich der Wärmeübergangswiderstand. Dieser bewirkt eine niedrigere Oberflächentemperatur an der Wand hinter dem Möbel und damit eine hohe relative Feuchte. In Bild 1 sind die Oberflächen-temperaturen einer Außenwanddecke mit gutem bzw. Mindestwärmeschutz dargestellt (stationäre Betrachtung).

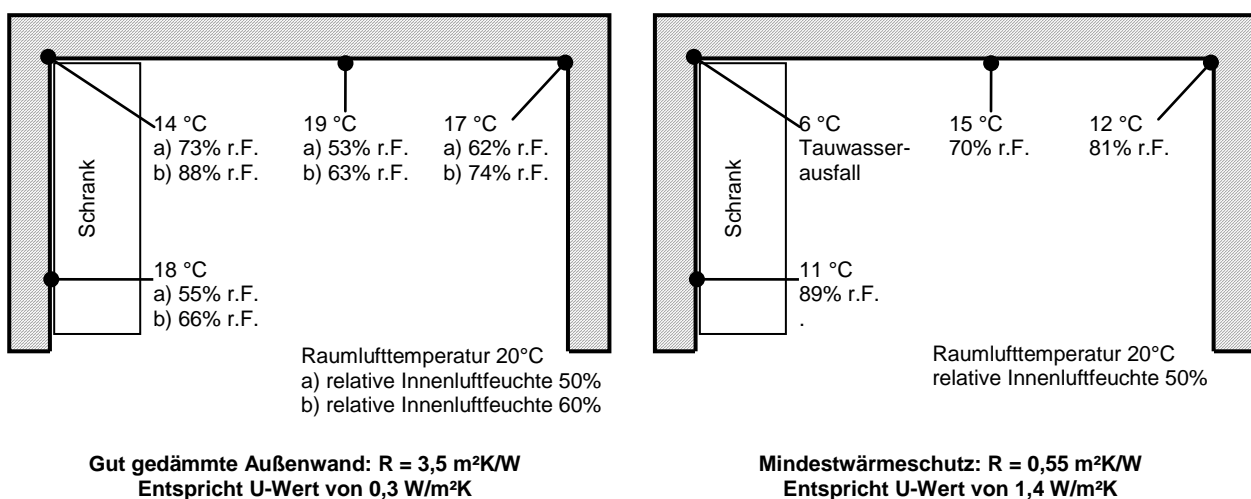


Bild 1 Schematische Darstellung der Temperatur- und Feuchteverteilung an Außenwänden eines Wohnraumes bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten in der Raumluft, bei einer Außentemperatur von  $-5^\circ\text{C}$  und einer Raumlufttemperatur von  $20^\circ\text{C}$ . Links eine gut wärmegeämmte Außenwand; rechts eine Außenwand mit Mindestwärmeschutz.

Bei einem gut gedämmten Gebäude sind bei  $20^\circ\text{C}$  und 50% relativer Raumluftfeuchte die Bedingungen für Schimmelpilzbildung selbst in der Ecke hinter einem Schrank nicht gegeben. Wird jedoch unzureichend gelüftet, so kann eine relative Raumluftfeuchte von 60% im Raum entstehen. Dies stellt eine kritische Randbedingung dar. In der Ecke hinter dem Schrank kann es zu

Schimmelpilzwachstum kommen. Bei Mindestwärmeschutz und einer relativen Raumlufffeuchte von 50% treten hinter dem Schrank und in der freien Raumecke Feuchten auf, bei denen bereits Schimmelpilzwachstum einsetzen kann. In der Ecke hinter dem Schrank fällt sogar Tauwasser aus.

### Unzureichende Beheizung und Feuchteproduktion im Raum

Bei gleichem absolutem Wassergehalt wird die relative Luftfeuchte durch eine Erhöhung der Raumlufftemperatur erniedrigt und die Innenoberflächentemperatur erhöht, was die Schimmelpilzgefahr vermindert. Ungünstig sind Wohnungen mit einzelnen unbeheizten Zimmern (meist Schlafzimmer). In diesen Räumen liegt eine niedrigere Raumluff- und damit Oberflächentemperatur vor, verbunden mit einer hohen Oberflächenluftfeuchte.

Die sich an Innenoberflächen von Außenbauteilen einstellende relative Feuchte hängt nicht nur von der Temperaturdifferenz zwischen Raumluff und Oberfläche ab, sondern auch von der Feuchteproduktion im Wohnraum. Eine hohe Feuchteproduktion im Wohnraum führt bei gleicher Lüftung zu höheren Raumlufffeuchten und damit gekoppelt auch zu höheren Innenoberflächenfeuchten. Hier besteht eine deutliche Beeinflussungsmöglichkeit durch den Nutzer, indem beispielsweise auf Wäschetrocknen im Wohnraum verzichtet wird.

### Baufeuchte

Werden Neubauten umgehend nach ihrer Errichtung bezogen, so enthalten die Baukonstruktionen noch Baufeuchte. Die aus den Konstruktionen entweichende Baufeuchte erhöht dabei die durch die Nutzung produzierte Feuchte. Bei einem geringen Luftwechsel von 0,2 bzw. 0,1 h<sup>-1</sup> übersteigt dann die relative Luftfeuchte im Raum zeitweise bzw. lang anhaltend kritische Werte von 60 bis 70%.

### Lüftung

Die Lüftung des Wohnraumes stellt das einzig wirksame Mittel dar, um Feuchte aus dem Raum abzuführen. Vor allem im Winter enthält die Außenluft trotz hoher relativer Feuchte eine geringe absolute Feuchte. Bei Winterlüftung wird die relative Feuchte im Raum erniedrigt. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. Tabelle 1 zeigt bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen und einer typischen relativen Außenluftfeuchte von 80 % die entsprechenden relativen Feuchten der Raumluff, wenn sie nach der Lüftung auf jeweils 20 °C erwärmt wird. Bei -10 °C außen werden beispielsweise nach der Lüftung 9 % relative Feuchte im Innenraum erreicht.

Charakteristisch für den Luftwechsel eines Raumes ist die so genannte Luftwechselzahl. Sie gibt an, wie oft das Luftvolumen eines Raumes in einer Stunde ausgetauscht wird. Die verschiedenen Literaturangaben beziehen sich überwiegend auf den hygienisch bedingten Luftwechsel (als Maß gilt die CO<sub>2</sub>-Konzentration). Die hierbei geforderten Angaben variieren stark und liegen zwischen 0,3 h<sup>-1</sup> und 1,3 h<sup>-1</sup>. In [2] sind zur Verhinderung von Schimmelpilzbildung in Wohnungen Luftwechselzahlen von 0,15 h<sup>-1</sup> bis 0,70 h<sup>-1</sup> angegeben.

Tabelle 1: Absenkung der relativen Innenluftfeuchte bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen durch Erwärmen von 80 % feuchter Außenluft auf 20 °C bei jeweils gleich bleibender absoluter Feuchte.

Außenlufttemperatur [°C]	Relative Feuchte außen [%]	Absolute Feuchte 1) [g/m <sup>3</sup> ]	Relative Innenluftfeuchte bei 20 °C [%]
-10	80	1,7	9
0		3,9	21
10		7,5	42
20		13,5	80

### Durchführung der Untersuchungen

Eine bedarfsgerechte Lüftung reduziert durch einen angepassten Luftaustausch die Gefahr einer Schimmelpilzbildung, ohne dass unnötig hohe Lüftungswärmeverluste verursacht werden. „Unter bedarfsgerechter Lüftung ist eine optimierte Betriebsweise zu verstehen, bei der der Luftvolumenstrom ... an den Bedarf angepasst wird.“ (gekürztes Zitat aus [3]). Dabei ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Nutzung verbunden mit unterschiedlichen Feuchtelasten für jedes Zimmer andere Lüftungserfordernisse [2]. Hierzu werden zwei neu entwickelte Rechenmodelle, das Raumklimamodell WUFI®-Plus [4] und das biohygrothermische Modell WUFI®-Bio [5, 6], kombiniert und auf diese Weise unterschiedliche Lüftungsstrategien vergleichend untersucht und bewertet.

#### Raumklimamodell WUFI®-Plus

Durch Verknüpfung der hygrothermischen Bauteilberechnung mit der energetischen Gebäudesimulation können auch die Wärme- und Feuchtwirkungen zwischen dem Gesamtgebäude und seinen Bauteilen berücksichtigt werden, wie beispielsweise die Feuchtepufferwirkung der Umschließungsflächen bei Änderungen der Feuchtelast im Raum oder die Feuchtesorption bzw. -desorption bei Temperaturänderungen an den Bauteiloberflächen (z.B. durch die strahlungsbedingte Bauteilerwärmung oder nächtliche

Abkühlung). Im Rahmen der WUFI®-Familie wurde dazu das Raumklimamodell WUFI®-Plus entwickelt [4, 7]. WUFI®-Plus besteht aus einem Raumbilanzierungsmodul an das beliebig viele - die Zahl richtet sich nach Anzahl der sowohl im Aufbau als auch in der Orientierung unterschiedlichen Raumumschließungsflächen - eindimensionale WUFI®-Bauteilsimulationen gekoppelt werden. Diese Ankopplung ist in Bild 2 beispielhaft für eine Dach- und eine Außenwandfläche dargestellt. Eventuelle Wärmebrücken haben zwar im Vergleich zu den flächenmäßig wesentlich größeren ungestörten Bereichen (Bauteilregelquerschnitt) meist keinen großen Einfluss auf das Raumklima, umkehrt hat aber das Raumklima bedeutende Auswirkungen auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse und damit auch das Schimmelpilzrisiko an der Wärmebrücke. Ähnliches gilt für Wände, die noch anderen Feuchtebeanspruchungen ausgesetzt sind, wie z.B. lokal begrenzte Baufeuchte oder aufsteigende Grundfeuchte.

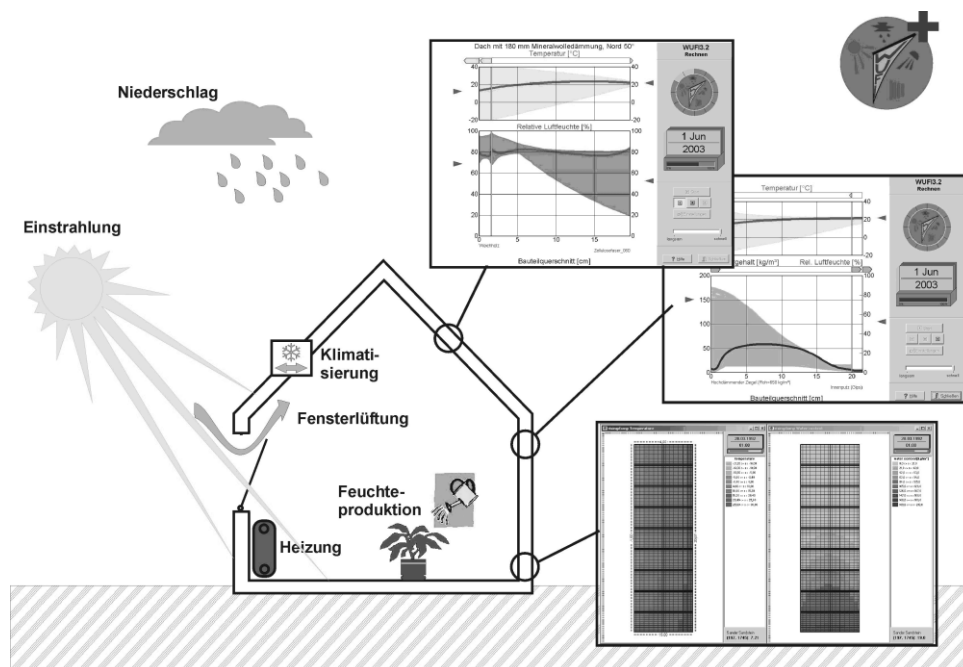


Bild 2 Beispielhafte Darstellung der Modellverknüpfungen bei der Raumklimasimulation mit WUFI®-Plus zur Berücksichtigung der hygrothermischen Wechselwirkung zwischen Raumluft und Gebäudehülle.

### Biohygrothermisches Modell WUFI®-Bio

Von besonderer Bedeutung für die Baupraxis ist die Beurteilung des Wachstumsrisikos von Schimmelpilzen auf Gebäudeoberflächen und im Inneren von Bauteilen. Da die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wesentliche Einflussfaktoren für das Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der Kenntnis der hygrothermischen Bedingungen und

deren zeitlicher Veränderung eine Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze abgeleitet werden. Sog. Isoplethensysteme beschreiben die Abhängigkeit der Sporenkeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und –feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Verunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, wurden Isoplethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen (Grenzkurve LIMBau) vorgeschlagen: 0 = optimaler Nährboden, I = biologisch gut verwertbar, II = biologisch kaum verwertbare Substrate.

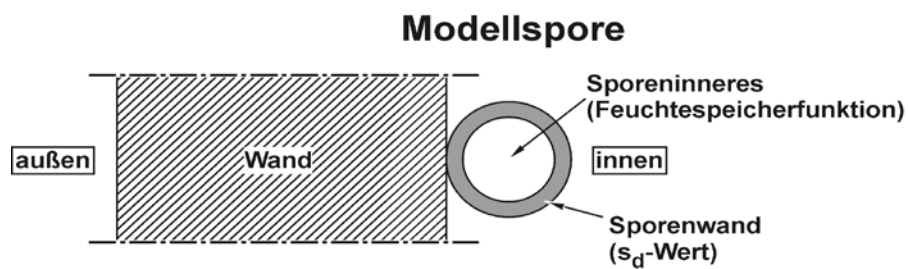


Bild 3 Schematisierte Darstellung einer Spore auf einer Wand. Das reale Verhältnis von Sporendurchmesser zur Wanddicke (30 cm) beträgt rund 1:100.000.

Für die bauphysikalisch korrekte Beschreibung der Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, wurde ein neuartiges biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen. Bild 3 zeigt schematisch die dem biohygrothermischen Verfahren WUFI®-Bio zugrunde liegende Modellspore.

Ist ein bestimmter Wassergehalt (Grenzwassergehalt) im Sporenninneren erreicht, kann die Sporenkeimung als abgeschlossen betrachtet werden und das Schimmelpilzwachstum beginnt. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt. Details zu diesem Modell, das bereits mehrfach erfolgreich zur Beurteilung von Schimmelpilzschäden angewandt wurde, sind in [6] enthalten.

### Anwendungsbeispiel

Besonders in den Raumecken kommt es aufgrund der Wirkung der geometrischen Wärmebrücke und der reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten zu niedrigeren Oberflächentemperaturen und somit höheren Oberflächenfeuchten verbunden mit erhöhter Schimmelpilzgefahr. Dem für die

Berechnung des erforderlichen Lüftungsverhaltens zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum verwendeten Raumklimamodell WUFI® -Plus ist das eindimensionale WUFI® zugrunde gelegt. Um mit diesem eindimensionalen Modell trotzdem den Einfluss von Raumecken berücksichtigen zu können, muss ein Verfahren entwickelt werden, mit dem diese Raumecke in ein eindimensionales Bauteil übergeführt werden kann, das in Bezug auf die Oberflächentemperaturen bzw. -feuchten dasselbe instationäre Verhalten aufweist. Dies erfolgte in zwei Schritten. Zunächst wurde im zweidimensionalen Berechnungsprogramm WUFI® 2D (derzeit existieren keine dreidimensionalen Wärme- und Feuchtetransportberechnungsprogramme) durch eine Variation der Wärmekapazität (über die Rohdichte) und der Wärmeleitfähigkeit das Temperaturverhalten der damit berechneten Außenkante so angepasst, dass sich der Temperaturfaktor ergibt, wie er sich mit dem Wärmebrückenkatalog für die dreidimensionale Ecke errechnet. Im Anschluss daran wurde auf analoge Weise ein eindimensionales Bauteil gebildet, das einen vergleichbaren instationären Innenoberflächentemperatur- und -feuchteverlauf aufweist, wie in der beschriebenen angepassten zweidimensionalen Innenkante [8]. Damit ist der Eckeneinfluss auf die zur Schimmelpilzvermeidung erforderliche Lüftung zumindest mit guter Übereinstimmung zur Realität berücksichtigt.

Für die rechnerische Ermittlung der Lüftungsstrategie zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung wurde als Anwendungsbeispiel eine typische 3-Zimmerwohnung ausgewählt (s. Bild 4). Berechnet wurden dabei in [9] ein nicht sanierter Altbau mit Ziegelmauerwerk und Mindestwärmeschutz (U-Wert  $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) mit alten Fenstern (Variante 1), ein komplett sanierter Altbau mit WDVS und neuen dichten Fenstern (Variante 2) sowie ein Altbau, der ohne zusätzliche Dämmmaßnahme neue dichte Fenster erhalten hat. (Variante 3). In dieser Untersuchung wird die Feuchteproduktion nicht verallgemeinert über die Wohnung gemittelt angenommen, sondern Raum für Raum getrennt betrachtet. Der Feuchteaustausch zwischen den Räumen, z.B. durch geöffnete Türen, kann dabei nicht berücksichtigt werden. Für jeden Raum werden zwei Feuchteproduktionsverläufe erarbeitet, die die Nutzungsbedingungen realitätsnah nachbilden. Der Normalfall beinhaltet die Feuchteproduktion durch Bewohner, Pflanzen, Körperreinigung und Kochvorgänge. In der worst case Betrachtung wird das Feuchteprofil zusätzlich durch trocknende Wäsche erhöht. Die Feuchteproduktion einer geschleuderten Waschladung pro Tag wurde hier nach Raumvolumen verteilt und dem normalen Feuchteprofil aufgeschlagen. Allen Räumen wurde je nach Nutzung eine entsprechende Feuchteproduktion zugrunde gelegt. In Tabelle 2 ist für diese Räume der Tagesverlauf der angesetzten Feuchtelasten aufgelistet. Mit in die Betrachtung einbezogen wurden auch unterschiedliche Lüftungsgewohnheiten der Bewohner (Taglüfter; Nachtlüfter) sowie ein dem Zimmer (unterschieden nach Altbau ohne und mit neuen dichten Fenstern) entsprechender Infiltrationsluftwechsel.



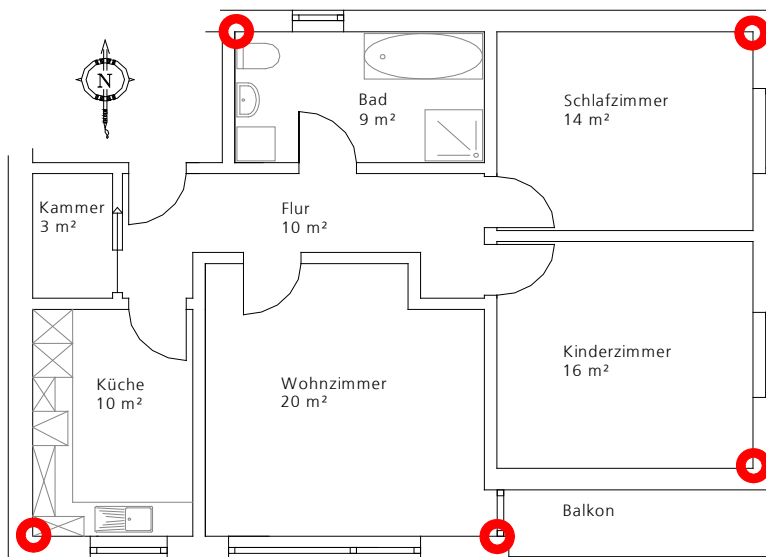


Bild 4 Grundriss der für die Berechnung ausgewählten 3-Zimmerwohnung. Markiert sind die dabei betrachteten Außenraumecken.

Tabelle 2 Tagesverlauf der angesetzten Feuchteproduktionen. Die Werte in Klammer bezeichnen die Feuchteproduktion mit Wäschetrocknung.

Uhrzeit	Schlafzimmer	Kinderzimmer	Wohnzimmer	Bad	Küche
	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h	Feuchte in g/h
0 <sup>00</sup> - 6 <sup>00</sup>	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
6 <sup>00</sup> - 7 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (265)	2D 500 (515)	K 100 (115)
7 <sup>00</sup> - 13 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
13 <sup>00</sup> - 14 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	3Pt,10T 185 (215)	HT 20 (35)	M 250 (265)
14 <sup>00</sup> - 17 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2Pt,2T 115 (140)	1Pt,10T 85 (115)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
17 <sup>00</sup> - 18 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2Pt,2T 115 (140)	1Pt,10T 85 (115)	HT 20 (35)	A 450 (465)
18 <sup>00</sup> - 19 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	4Pt,10T 235 (255)	HT 20 (35)	G 250 (265)
19 <sup>00</sup> - 20 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2T 10 (35)	2Pt,10T 135 (155)	2D 500 (515)	2 T 10 (25)
20 <sup>00</sup> - 22 <sup>00</sup>	2T 10 (30)	2Ps,2T 80 (105)	2Pt,10T 135 (155)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
22 <sup>00</sup> - 24 <sup>00</sup>	2Ps,2T 80 (100)	2Ps,2T 80 (105)	10T 35 (65)	HT 20 (35)	2 T 10 (25)
<b>Summe</b>	<b>800 (1280) g</b>	<b>1360 (1940) g</b>	<b>1890 (2610) g</b>	<b>1440 (1875) g</b>	<b>1250 (1610) g</b>
<b>Gesamtfeuchtesumme</b>					<b>6740 (9315) g</b>
<b>Gesamtvolumen</b>					<b>172,5 m<sup>3</sup></b>
<b>Volumen bezogene Feuchte</b>					<b>1,63 (2,25)g/(h*m<sup>3</sup>)</b>

HT = Handtuchtrocknen, D = Duschen 5 Minuten, Ps = schlafende Person, T = Topfpflanze, Pt = tätige Person, K = Kaffee kochen, M = Mittagessen kochen, A = Abendessen kochen, G = Geschirr spülen

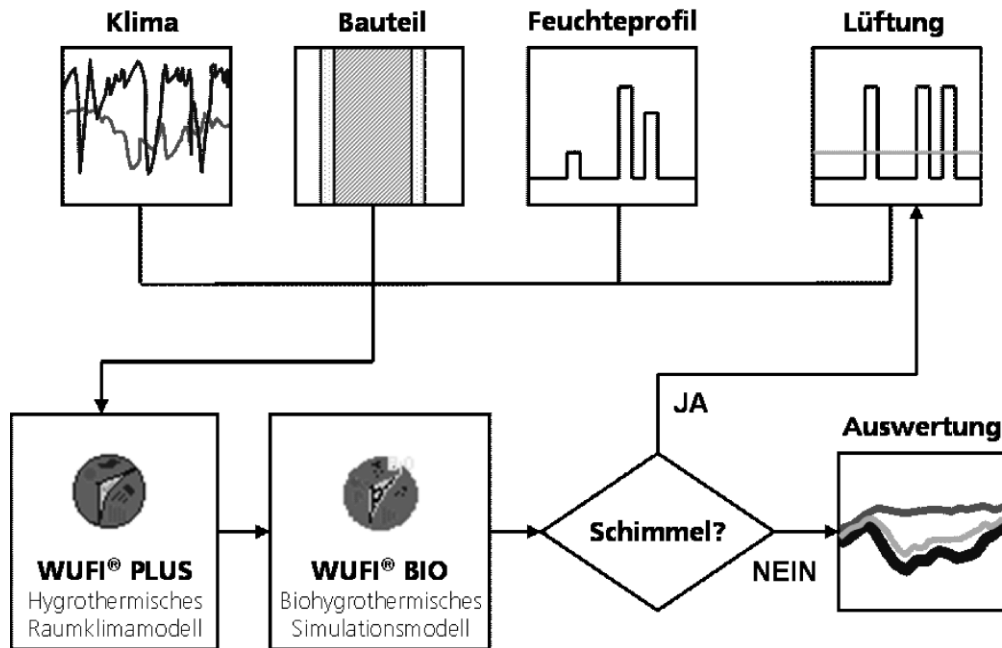


Bild 5 Ablaufschema für die einzelnen Berechnungsschritte im Zuge der Ermittlung der zur Schimmelpilzvermeidung erforderlichen Lüftung.

Die Ermittlung der erforderlichen Luftwechselrate oder Fensteröffnungszeiten für Stoßlüftung erfolgt iterativ, indem bei vorgegebenem Lüftungsprofil mit Hilfe des modifizierten Raumklimamodells die Temperatur- und Feuchteverläufe der Raumecken ermittelt werden. Anhand dieser erfolgt mit Hilfe des Biohygrothermischen Modells die Beurteilung des Schimmelpilzwachstumsrisikos mit anschließender Anpassung des Lüftungsprofils bis zum Erreichen des gerade erforderlichen Luftwechsels (Ablaufschema s. Bild 5).

## Ergebnisse und Diskussion

Als Beispiel zeigt Bild 6 den zeitlichen Verlauf der Feuchteproduktion sowie die daraus zur Schimmelpilzvermeidung resultierenden Lüftungserfordernisse im Falle der Dauerlüftung bzw. der Stoßlüftung für ein Schlafzimmer einer typischen Altbauwohnung ohne und mit Wäschetrocknung. Bei dem dargestellten konstanten Mindestluftwechsel (gestrichelte Linie) bzw. dem Mindeststoßluftwechsel (durchgezogene Linie) ergeben sich in den Außenraumecken Oberflächenfeuchten, die gemäß den Berechnungen mit dem Biohygrothermischen Modell (WUFI-Bio) gerade unterhalb den für Schimmelpilzbildung erforderlichen Wachstumsvoraussetzungen liegen. Der dabei angesetzte Infiltrationsluftwechsel ( $0,5 \text{ h}^{-1}$  beim Altbau mit alten Fenstern, sonst  $0,1 \text{ h}^{-1}$ ). Ist im konstanten Mindestluftwechsel mit enthalten Trotz des niedrigeren Dämmstandards, der das Schimmelpilzrisiko aufgrund der abgesenkten Oberflächentemperaturen grundsätzlich erhöht, ist

aufgrund des deutlich höheren Infiltrationsluftwechsels eine einmalige kurze morgendliche Stoßlüftung ausreichend. Selbst im Falle der Wäschetrocknung (rechte Abbildung) kommt man hierbei ohne weitere Stoßlüftung aus. Bei Dauerlüftung genügt ein geringer zusätzlicher Luftaustausch. Allerdings muss der bei diesen Berechnungen als Infiltrationsluftwechsel dauerhaft angesetzte Luftwechsel von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  im Falle ungünstiger Witterungsbedingungen (z.B. bei Windstille) durch entsprechende Lüftungsmaßnahmen sichergestellt werden.

In Bild 7 ist dieselbe Situation für einen komplett sanierten Altbau mit WDVS und neuen dichten Fenstern dargestellt. Der Einfluss der erhöhten Feuchtelast durch Wäschetrocknen ist deutlich zu erkennen. Mit Wäschetrocknung reicht eine morgendliche viertelstündliche Stoßlüftung mit einer Luftwechselrate von  $10 \text{ h}^{-1}$  nicht mehr aus, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden; hier müssen die Fenster dreimal täglich für einen längeren Zeitraum geöffnet werden.

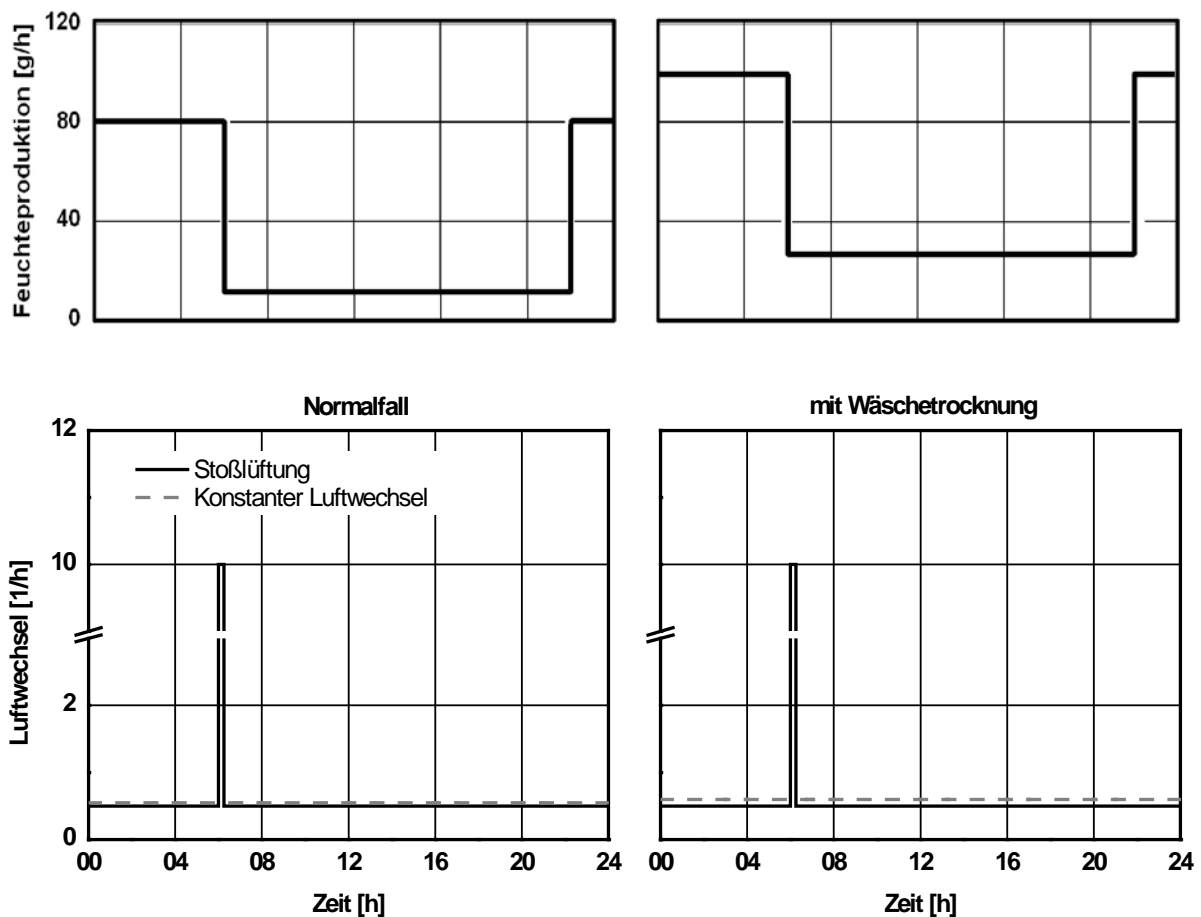


Bild 6 Oben: Zeitverlauf der angenommenen Feuchteproduktion ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum.  
Unten: Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer einer Altbauwohnung.

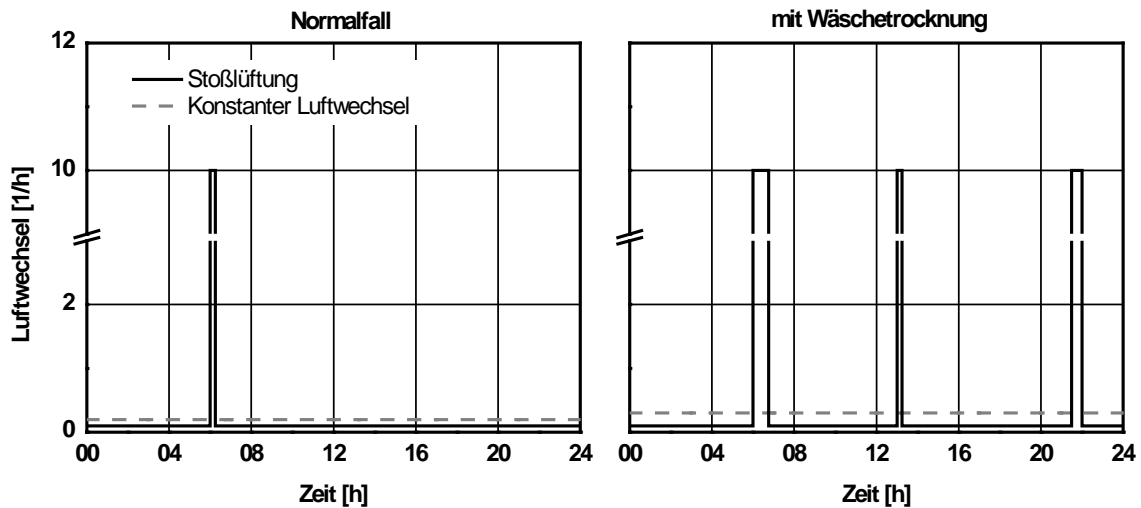


Bild 7 Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer einer gut gedämmten mit neuen Fenstern ausgestattete Wohnung ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum.

Ein ganz anderes Bild ergibt sich, wenn beim Altbau ohne zusätzliche Dämmmaßnahme dichte Fenster eingesetzt werden. Hier müssen aufgrund des deutlich reduzierten Infiltrationsluftwechsels mindestens dreimal täglich die Fenster mehr als eine Stunde lang geöffnet werden (Bild 8 links). Im Falle der Wäschetrocknung (rechts) ist eine Schimmelpilzvermeidung durch Stoßlüftung kaum mehr praktikabel. In diesem Fall dürften sich die durch den Einbau dichter Fenster erhofften Energieeinsparungen bei Vermeidung von Schimmelbewuchs nicht einstellen.

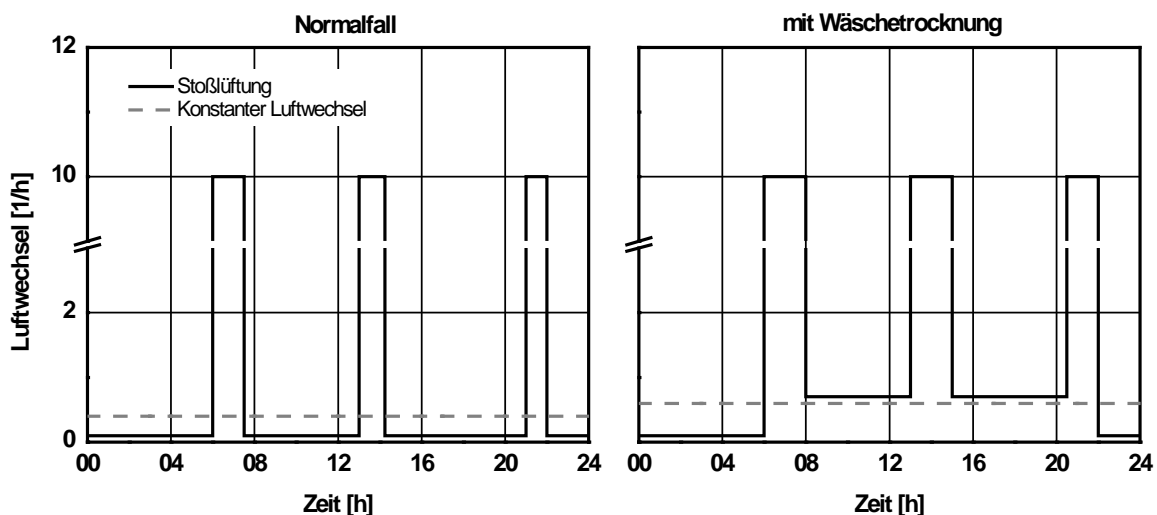


Bild 8 Ermittelte zur Schimmelpilzvermeidung notwendige Dauerlüftung bzw. Stoßlüftung im Schlafzimmer der Altbauwohnung aus Bild 6 nach Einbau dichter Fenster ohne (links) und mit (rechts) Wäschetrocknung im Wohnraum.

Bild 9 links zeigt für alle Varianten und alle Räume die berechneten erforderlichen konstanten Luftwechsel zur Schimmelpilzvermeidung. Der Mehrbedarf an Lüftung bei Wäschetrocknung ist deutlich zu erkennen. Aufgrund des erhöhten Feuchteaufkommens ist im Bad und in der Küche insbesondere bei den Altbauvarianten eine deutlich höhere Lüftung erforderlich, wobei in der Küche der Betrieb eines Dunstabzuges im Abluftbetrieb über dem Herd meist die erforderliche Feuchteabfuhr bewirkt (hier nicht berücksichtigt).

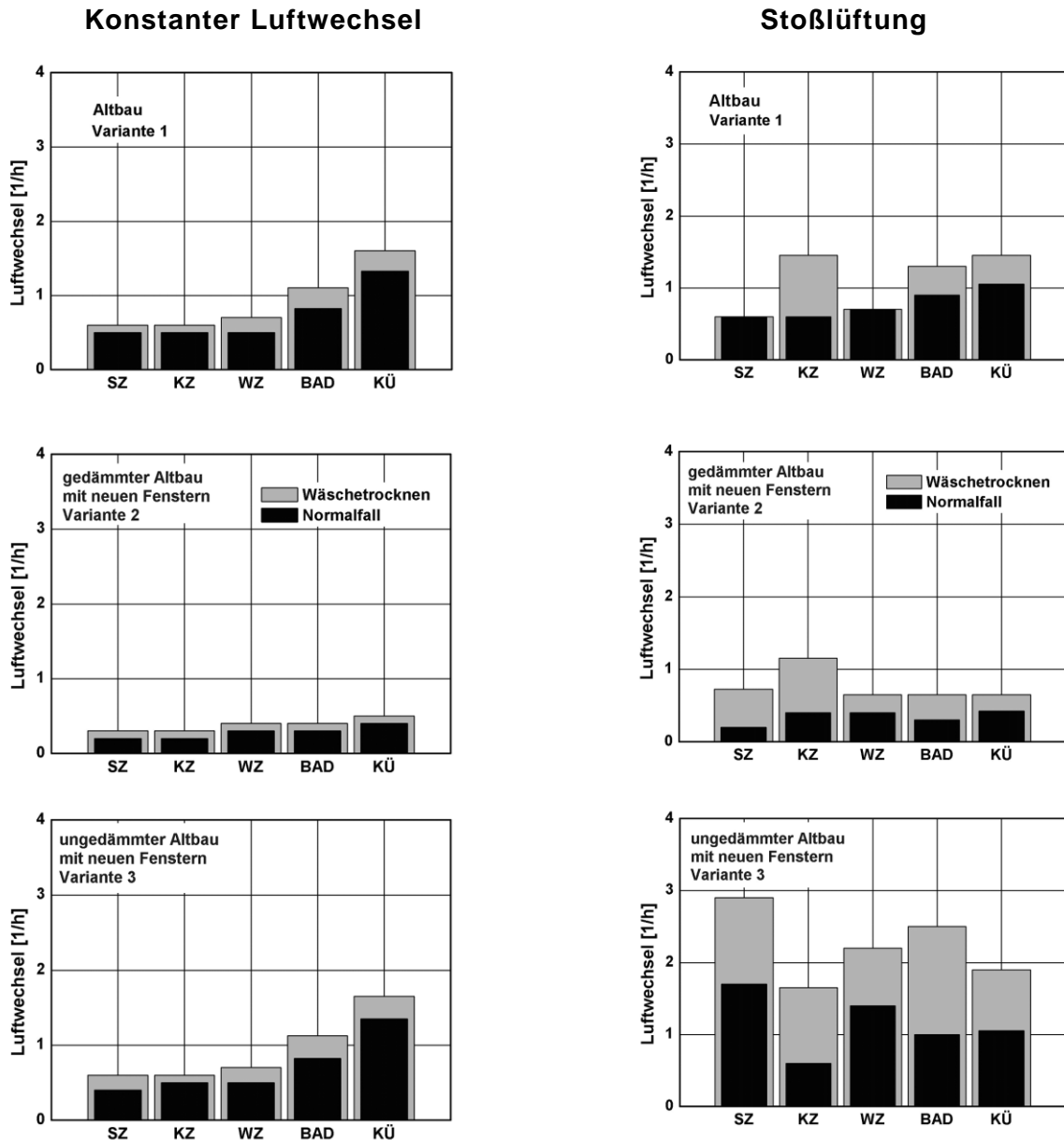


Bild 9 Für die unterschiedlichen Räume zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung erforderliche konstante Mindestluftwechsel (links) und bei Stoßlüftung erforderliche zu Vergleichszwecken über den Tag gemittelte stündliche Luftwechsel (rechts) für alle Varianten der Modellwohnung.

Wie zu erwarten, ergeben sich bei niedrigem Dämmstandard deutlich höhere Lüftungsnotwendigkeiten. Mit Ausnahme der Küche und des Bades ist aber auch hier, sofern in der Wohnung keine Wäschetrocknung erfolgt, die allgemein geforderte Luftwechselrate von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  ausreichend für eine Schimmelpilzvermeidung.

In Bild 9 rechts ist ein aus den berechneten Stoßlüftungen ermittelter mittlerer stündlicher Luftwechsel dargestellt. Der Vergleich mit Bild 9 links zeigt, dass in den meisten Fällen, die Stoßlüftung zu höheren über den Tag gemittelten Luftwechselraten führt, als die dosierte Dauerlüftung. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich bei Luftwechselraten von  $10 \text{ h}^{-1}$  die Luft nicht bis auf Raumtemperatur erwärmt und somit weniger Feuchte mitnehmen kann.

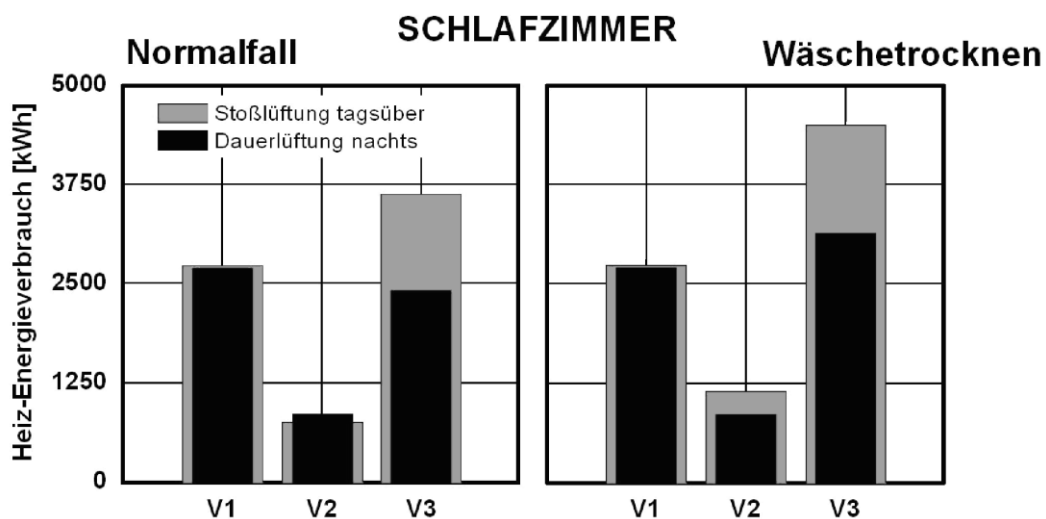


Bild 10 Vergleich der Heiz-Energieverbräuche für das Schlafzimmer während einer Heizperiode von Oktober bis März für die unterschiedlichen Varianten. Im rechten Bild ist der Energieverbrauch bei Trocknung der Wäsche in der Wohnung dargestellt.

V1: Altbau

V2: gedämmter Altbau mit neuen Fenstern

V3: ungedämmter Altbau mit neuen Fenstern

In Bild 10 ist für das Schlafzimmer der Einfluss der unterschiedlichen Lüftungsgewohnheiten (Tag-, Nachtlüfter) auf den Heizenergieverbrauch der drei untersuchten Varianten dargestellt. Man kann erkennen, dass bei gut gedämmten Wohnungen, trotz des etwas höheren Luftwechsels die Stoßlüftung zu etwas niedrigeren Energieverbräuchen führt. Im Falle der Altbauwohnung mit dichten Fenstern ist dagegen die Dauerlüftung deutlich günstiger. Dies gilt allgemein auch, wenn durch Wäschetrocknen in der Wohnung eine zusätzliche permanente Feuchtquelle vorliegt.

Es sollte erwähnt werden, dass die energetische Betrachtung der gesamten Wohnung ergibt, dass eine Wäschetrocknung in der Wohnung über den erhöhten Mehrbedarf an Lüftung einen

zusätzlichen Energieverbrauch bewirkt, der meist größer ist als der eines Kondenstrockners zur Trocknung der gleichen Menge Wäsche (siehe Bild 11). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Trockner mit primärenergetisch ungünstigerem elektrischem Strom betrieben wird. Eine Stoßlüftung ist, wie aus dem rechten Bild ersichtlich, nicht geeignet eine Wohnung mit Wäschetrocknung (ohne Trockner) energetisch sinnvoll zu lüften.

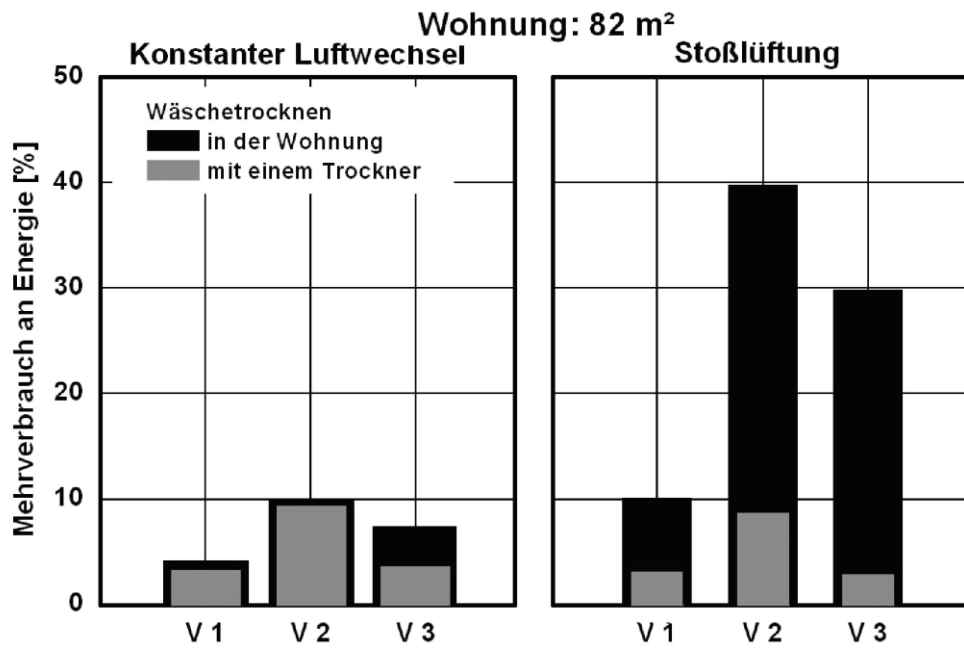


Bild 11 Mehrverbräuche an Heizungsenergie aufgrund der Wäschetrocknung in der Wohnung bei konstantem Luftwechsel (links) und bei Stoßlüftung (rechts) ohne und mit Verwendung eines Kondenstrockners.

V1: Altbau

V2: gedämmter Altbau mit neuen Fenstern

V3: ungedämmter Altbau mit neuen Fenstern

## Beurteilung und Folgerungen

Mit Hilfe des Raumklimamodells WUFI®-Plus kann der Einfluss unterschiedlicher Lüftungsvarianten auf das Raumklima berechnet werden. Wesentlich ist dabei, dass auch das instationäre Verhalten in den Raumecken berücksichtigt wird, da vor allem hier mit Schimmelpilzwachstum zu rechnen ist. Durch gekoppelte Anwendung mit dem Biohygrothermischen Modell kann unter Verwendung der berechneten Oberflächentemperaturen und -feuchten das Schimmelpilzrisiko abgeschätzt werden. Für gegebene Randbedingungen wird die notwendige Lüftung durch eine iterative Anwendung beider Verfahren ermittelt. Als Beispiele dienen in dieser Arbeit

unterschiedliche Baukonstruktionen, an denen der Einfluss verschiedener Lüftungsstrategien (Dauerlüftung oder Stoßlüftung) auf den zur Schimmelpilzvermeidung erforderlichen mittleren Luftwechsel und somit den Lüftungswärmeverlust demonstriert wird. Für die Zukunft sollten die zugrunde liegenden Berechnungsverfahren weiter verfeinert werden, um z.B. auch den Feuchte-austausch zwischen den Räumen und den Einfluss der sorptiven Einrichtungsgegenstände berücksichtigen zu können.

Die Berechnungen bestätigen, dass die für die Schimmelpilzvermeidung erforderliche Lüftung in komplexer Weise von den Klimarandbedingungen, der Baukonstruktion, den unterschiedlichen nutzungsabhängigen Feuchtelasten sowie den sorptiven Eigenschaften der Innenoberflächen und wohl auch des Mobiliars abhängt. Bei gut gedämmten Außenwänden ergeben sich in Bezug auf die Energieverluste nur geringfügige Unterschiede zwischen kontinuierlicher Lüftung und Stoßlüftung, wobei eine richtig ausgewählte Stoßlüftung wesentlich ist. Dies bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Stoßlüftung hauptsächlich während oder kurz nach der erhöhten Feuchteproduktion stattfindet. Eine Stoßlüftung, die in keinem zeitlichen Zusammenhang mit der Feuchteproduktion steht, ist dagegen energetisch ungünstiger als die Dauerlüftung, weil dann die bereits in den Wandmaterialien sorbierte Feuchte über eine langandauernde Stoßlüftung entfernt werden muss. Bei der energetischen Betrachtung muss auch berücksichtigt werden, dass den Berechnungsergebnissen eine kontinuierliche Beheizung auch während der Zeiten der Stoßlüftung zugrunde liegt. Sofern man, wie allgemein empfohlen, während der Stoßlüftung die Heizung abschaltet, wird die Stoßlüftung energetisch vorteilhafter sein. Dies gilt allerdings nicht mehr, wenn z.B. durch Wäschetrocknen eine zusätzliche konstante Feuchtelast gegeben ist.

Außerdem zeigen die Berechnungen, dass bei Altbauten mit schlechter Wärmedämmung wesentlich mehr und auch differenzierter in Abhängigkeit von der Raumart bzw. -nutzung gelüftet werden muss. Außer für das Bad und die Küche ist der allgemein geforderte Mindestluftwechsel von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  durchaus ausreichend und dann beide Belüftungsarten energetisch gleichwertig, sofern die Wäschetrocknung außerhalb der Wohnung oder mit Hilfe eines Trockners erfolgt. Andernfalls ergeben sich für die erforderliche „Stoßlüftung“ extrem lange Öffnungszeiten, die weder praxisnah noch energetisch vertretbar sind.

Insgesamt lässt sich erkennen, dass neben der Stoßlüftung stets eine kontinuierliche Lüftung vorhanden sein sollte, die permanent eingebrachte Feuchte abführt. Je schlechter der Wärme-standart, desto höher muss bei gleicher Feuchtelast die durch Dauerlüftung erzielte Luftwechselrate sein. Dies zeigt sich vor allem bei den Ergebnissen des Altbaus mit unterschiedlicher Fensterdichtheit. Während beim gedämmten Mauerwerk die Infiltrations-luftwechselrate von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  ausreichend für die kontinuierlich anfallende Feuchtelast ist und die restliche Feuchte wahlweise durch Stoßlüftung oder zusätzliche kontinuierliche Lüftung abgeführt



werden kann, ergibt sich beim ungedämmten Altbau ein ganz anderes Bild. Bei Einbau dichter Fenster mit der Folge einer Absenkung des Infiltrationsluftwechsels auf  $0,1 \text{ h}^{-1}$  kann die Restfeuchte nicht mehr sinnvoll über Stoßlüftung abgeführt werden. Dies bedeutet aber nichts anderes, als dass über zusätzliche Öffnungen wieder eine mittlere Luftwechselrate von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  erreicht werden muss bzw. die Fenster wieder „undichter“ gemacht werden müssen. Bei alledem darf aber nicht übersehen werden, dass in der Praxis keine wirklich konstante Infiltrationsluftwechselrate vorliegt, da diese auch von äußeren Einflüssen (Wind) abhängt. Gegebenenfalls sollte über eine geeignete einfache Abluftsteuerung bedarfsgerecht die Feuchteabfuhr erfolgen [10].

Eine gute Außendämmung führt nicht nur über einen verminderten Transmissionswärmeverlust zu Energieeinsparung, auch die zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung erforderliche Lüftung und die dadurch bedingten Energieverluste werden deutlich reduziert. Hinzu kommen eine geringere Schimmelpilzgefährdung durch Wärmebrücken und der nicht zu unterschätzende Vorteil einer wesentlich unproblematischeren Lüftung.

## Literatur

- [1] T 2914: Gewährleistung einer guten Raumluftqualität bei weiterer Senkung der Lüftungswärmeverluste. Fraunhofer-IRB Verlag, Stuttgart (Jan. 1999).
- [2] Richter, W.; Hartmann, Th.: Mindestluftwechsel zur Verhinderung der Schimmelpilzbildung in Wohnungen. VDI-Berichte Nr. 1603, (2001), S. 121-130.
- [4] Hartmann, Th.: Bedarfsgeregelte Wohnungslüftung. Tagungshandbuch Hermann-Rietschel-Colloquium 2002, S. 79-87.
- [4] Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H.M.; Radon, J.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen – Einfluss des Lüftungsverhaltens auf die Raumluftfeuchte. Tagungsbeitrag für das 11. Bau-klimatische Symposium der TU Dresden. 26. – 30. Sep. 2002, Dresden, S. 562 – 575
- [5] Sedlbauer, K.: Beurteilung von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen – Erläuterung der Methode und Anwendungsbeispiele. Bauphysik 24 (2002), H. 3, S. 167 – 176.
- [6] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [7] 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.

- [8] Reichelt, B.: Ermittlung maximaler Innenluftfeuchten zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung an Bauteiloberflächen und Vergleich mit Normvorgaben. Diplomarbeit, Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen, Fachhochschule Rosenheim (2004).
- [9] Kainz, E.: Lüftungskonzepte zur Erhaltung der Raumluftqualität und gleichzeitiger Vermeidung von Schimmelpilzen. Diplomarbeit, Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen, Fachhochschule Rosenheim (2004).
- [10] Krus, M.; Sedlbauer, K., Sinnesbichler, H.: Neuartige und einfache Lüftersteuerung zur Schimmelpilzvermeidung. IBP-Mitteilungen 31 (2004), Nr. 437.

**Adressen**

Dr.-Ing. Martin Krus  
Dr.-Ing. Andreas Holm  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer  
Dr.-Ing. Hartwig Künzel

Fraunhofer Institut für Bauphysik  
Fraunhoferstraße 10  
83626 Valley

krus@hoki.ibp.fraunhofer.de