

Untersuchungen zum Energieeinsparpotenzial von feuchtespeichernden Innenputzen

Michael Kleber

Karlsruher Institut für Technologie, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, 76131 Karlsruhe, Deutschland

E-mail: michael.kleber@kit.edu

Telefon: +49(0)721/608-46441

Zusammenfassung

Gegenstand der Untersuchungen ist der Nutzerkomfort bei feuchtwarmen Innenraumbedingungen und die Fragestellung, inwieweit ein Innenputz mit verbesserten Feuchtespeichereigenschaften diesen beeinflussen kann. Für die Festlegung von Komfortkriterien werden eigene Probandenversuche durchgeführt und ausgewertet. Es wird gezeigt, dass in Hinblick auf sommerliche Obergrenzen der Luftfeuchte der Komfortbereich aus der Normung sinnvoll erweitert werden kann. Anhand von Gebäudesimulationen wird untersucht, welche Energieeinsparung verbesserte Putze in Hinblick auf die Entfeuchtung erreichen können. Bisherige Ergebnisse zeigen, dass theoretisch Einsparungen möglich sind, sich diese jedoch in einem kleinen Rahmen bewegen. Die Verwendung eines mit größerem Aufwand hergestellten – und damit auch teureren – Putzes scheint daher aus Gründen der Energieeinsparung allein nicht begründbar zu sein.

Stichworte: Klimawandel, Gebäude, Thermischer Komfort, Innenraum, feuchteregulierend, Innenputz

Einleitung

Im Rahmen des Projektes „raum/klima/putz“ [1], das von der Baden-Württemberg Stiftung finanziert wird, forschen drei Institutionen des KIT an der Fragestellung, inwieweit sich der Klimawandel in Baden-Württemberg auf das sommerliche Innenraumklima und somit den Komfort des Menschen auswirkt und in welcher Weise ein Innenputz durch seine Feuchtespeichereigenschaften einen positiven Einfluss darauf haben kann. Beteiligt sind das Institut für Meteorologie- und Klimaforschung (IMK, Süddeutsches Klimabüro) sowie das Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB, Materialprüfanstalt).

Am Fachgebiet Bauphysik & Technischer Ausbau (fbta) werden Gebäudesimulationen durchgeführt, die als Eingangsparameter simulierte Wetterdaten verwenden und die Feuchtespeicherung im Bauteil sehr detailliert abbilden. Um die resultierenden Zustände im Gebäudeinneren sinnvoll bewerten zu können, werden aus der Normung abgeleitete Komfortkriterien auf Basis eigens durchgeführter Probandenversuche modifiziert und schließlich angewendet. Nicht nur die

Verbesserung des Komforts, sondern auch eine mögliche Energieeinsparung durch den Einsatz feuchtereregulierender Putze wird untersucht.

Probandenversuche

Methodik

Um das Be- und Empfinden von Menschen bei feuchtwarmen Innenraumbedingungen zu untersuchen, werden im Raumklima-Teststand des fbta umfangreiche Probandenversuche durchgeführt [2]. Das LOBSTER (Laboratory for Occupant Behaviour, Satisfaction, Thermal Comfort and Environmental Research) besitzt zwei nahezu identische Büroräume, deren thermische Bedingungen sehr exakt kontrolliert werden können. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Luftbefeuchtungsfunktion über Verdunstungsbefeuchter nachgerüstet. In den Versuchen werden die Teilnehmer zunächst in einem, dann im anderen Büro für jeweils 60 Minuten einem von neun Zuständen ausgesetzt. Vorgeschaltet ist eine halbe Stunde im Vorraum zur Akklimatisierung, zur Anbringung von Sensorik am Körper und zur Beantwortung eines ersten Fragebogens.

Die neun Zustände sind so gewählt, dass sie eine Matrix aus 26, 28 und 30 °C operativer Temperatur und 50, 65 und 80 % relativer Luftfeuchte darstellen und somit einen Bereich von 10 bis 21 g/kg Mischungsverhältnis umspannen. Die operative Temperatur ist ein Mittelwert aus Lufttemperatur und Strahlungstemperatur der umliegenden Flächen. Das Mischungsverhältnis ist ein Maß für die absolute Luftfeuchte und gibt an, wieviel g Wasserdampf in 1 kg trockener Luft gespeichert sind. Da im nationalen Anhang zur Norm DIN EN 15251 [3] für klimatisierte und mechanisch belüftete Räume eine Obergrenze von 11,5 g/kg für den sommerlichen Komfort angegeben ist, wird insbesondere der Frage nachgegangen, ob eine solche Grenze nachvollzogen werden kann. Während der Stunde Aufenthalt in einem Büro werden kontinuierlich Raumparameter wie Lufttemperatur, operative Temperatur, Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit und CO₂-Gehalt aufgezeichnet. Am Ende der Stunde füllen die Teilnehmer einen umfangreicheren Fragebogen aus.

In der statistischen Auswertung werden anhand von linearer Regression und unter Einbeziehung mehrerer unabhängiger Variablen Modelle gebildet, welche die Bewertungen der Teilnehmer im Mittel möglichst exakt voraussagen können. Insbesondere wird ein Modell abgeleitet, das die Akzeptanz von feuchtwarmen Raumzuständen darstellt.

Ergebnisse

Nach Vorversuchen im Herbst 2015 wurden im Sommer 2016 Versuche mit insgesamt 136 Teilnehmern durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die prozentuale Verteilung der Antworten auf die Frage „Wie empfinden Sie die aktuelle Raumtemperatur?“ gruppiert nach den neun Zuständen. Die Raumtemperatur wird als Ausdruck der thermischen Behaglichkeit betrachtet, da eine erhöhte Luftfeuchte zu einer reduzierten Wärmeabgabe und somit zu einer größeren Unzufriedenheit mit der Temperatur führt. Deutlich erkennbar nimmt die Akzeptanz sowohl mit steigender Temperatur als auch mit zunehmender Luftfeuchte ab. Fasst man die zwei Antworten im akzeptablen

Bereich zusammen und erstellt daraus für den Prozentsatz Zufriedener anhand der operativen Temperatur und des Mischungsverhältnisses ein lineares Regressionsmodell, erhält man ein Bestimmtheitsmaß von 0,87. Setzt man den zu erzielenden Prozentsatz Zufriedener auf 90 % fest, ergibt sich daraus eine Kennlinie, die in Abhängigkeit der operativen Temperatur (T_{op}) das zulässige Mischungsverhältnis (MV) angibt und umgekehrt (Abbildung 2, durchgezogene grüne Linie). Die Formel für diese Komfortgrenze ist in Gleichung 1 dargestellt.

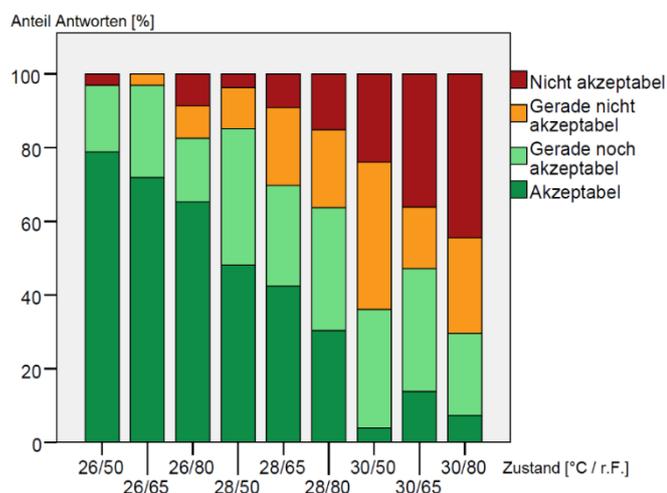


Abb. 1: Anteil der Antworten aller Teilnehmer auf die Frage: „Wie empfinden Sie die aktuelle Raumtemperatur?“, gruppiert nach neun Zuständen, jeweils nur Antworten nach 60 Minuten Aufenthalt ausgewertet.

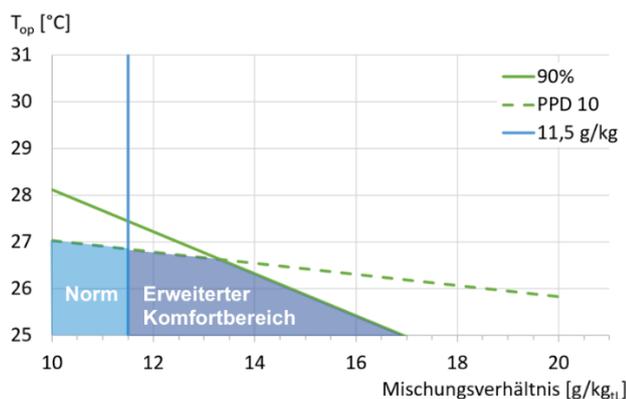


Abb. 2: Komfortbereich gemäß PPD 10 % nach Fanger (0,5 clo; 0,1 m/s Luftgeschwindigkeit, 1,1 met) und Begrenzung auf 11,5 g/kg (hellblaue Fläche) sowie erweiterter Komfortbereich aus PPD 10 % kombiniert mit Ergebnis aus den Probandenversuchen.

$$T_{op} = -0,45 \cdot MV + 32,6 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

Gemäß der Norm wurde analog die Kennlinie für einen PPD-Wert (percentage of persons dissatisfied) nach Fanger [4] von 10 % berechnet (Abbildung 2, gestrichelte grüne Linie). Allerdings wird in der Norm die Feuchte auf 11,5 g/kg begrenzt, sodass sich der hellblaue Komfortbereich

ergibt. Gemäß PPD 10 % wären bei entsprechend niedrigeren Temperaturen Luftfeuchte-Werte weit jenseits der 11,5 g/kg gestattet. Setzt man hier das strengere Kriterium an, welches aus den Versuchen ermittelt wurde (durchgezogene grüne Linie), so erhält man den erweiterten Komfortbereich (dunkelblaue Fläche), der im weiteren Verlauf zur Bewertung der simulierten sommerlichen Zustände im Innenraum herangezogen wird.

Gebäudesimulation

Methodik

Mittels numerischer Simulationen kann das bauphysikalische Verhalten von Räumen bzw. Gebäuden mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden. Eines der etablierten Programme ist EnergyPlus, das mit Mitteln des Amerikanischen Departments für Energie (DOE) entwickelt wurde und im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Zusätzlich zu einem vereinfachten Feuchtemodell ist in EnergyPlus das HAMT-Modell (heat and moisture transfer finite) integriert, das eine detaillierte Betrachtung der Feuchteaufnahme und -abgabe sowie des Feuchtedurchgangs durch die einzelnen Bauteilschichten ermöglicht. In diesem Modell muss jede einzelne Schicht mit verschiedenen Parametern beschrieben werden, die in Tabelle 1 benannt und mit konkreten Werten für vier betrachtete Simulationsvarianten dargestellt sind. Die Sorptionsisotherme ist eine für das Feuchteverhalten entscheidende Größe und daher separat in Abbildung 3 abgebildet. Ähnliche Kennlinien müssen für den Flüssigkeitstransport hinterlegt werden. Da dieser jedoch eine untergeordnete Rolle spielt, wird hier auf eine detaillierte Abbildung verzichtet.

Tab. 1: Die in EnergyPlus für die Verwendung des HAMT-Modells benötigten Materialeigenschaften und die angewendeten Werte für die vier Simulationsvarianten.

Materialeigenschaft	Versiegelte Oberfläche	Gipsputz	Klimaputz	Hypothetischer Klimaputz
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	0,170	0,200	0,247	0,247
Spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	1500	850	850	850
Rohdichte [kg/m ³]	1000	850	1291	1291
Porosität [m ³ /m ³]	0,20	0,65	0,51	0,51
Flüssigkeitstransport (Saugen/Weiterverteilung)	Kennlinien	Kennlinien	Kennlinien	Kennlinien
Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl [-]	58	8	18	18
Sorptionsisotherme	s. Abb. 3	s. Abb. 3	s. Abb. 3	s. Abb. 3

Für verschiedenste Parameterstudien wird ein Raum modelliert, der 4,00 m breit, 6,00 m tief und 2,70 m hoch ist (Innenmaße), dessen schmale Seite ein Fenster von 1,50 m Breite und 1,00 m Höhe hat und der nach Westen ausgerichtet ist. Nur diese Westfassade ist eine Außenwand, alle übrigen Wände sowie Boden und Decke sind adiabatisch (auf beiden Seiten herrschen gleiche Bedingungen, die selbst keine Übergänge von Wärme oder Feuchte induzieren). Fünf Innenseiten des Raumes (4 Wände und die Decke) werden jeweils mit unterschiedlichen Materialien belegt, die darunterliegende Konstruktion ist immer dieselbe. So wird der Einfluss sowohl auf den Komfort

als auch den Energieverbrauch zum Entfeuchten untersucht. Der erzielte Komfort wird anhand von Überschreitungsstunden des in Abschnitt 2 beschriebenen Komfortbereichs bewertet.

Für die Ermittlung einer Energieeinsparung durch die Verwendung verschiedener Innenputze wurde der Ansatz gewählt, den eigentlich natürlich belüfteten und gekühlten Raum mit einer Klimaanlage zu modellieren und während der Monate Mai bis September den nötigen latenten Kühlbedarf (Entfeuchtung) zu vergleichen.

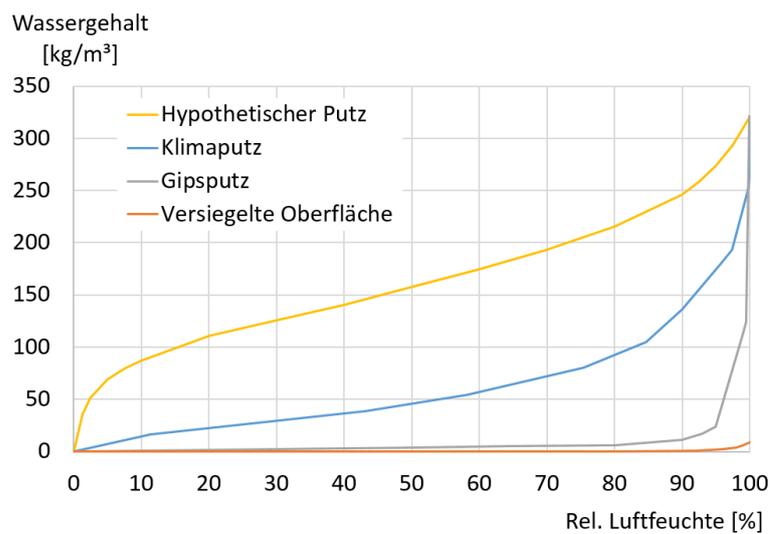


Abb. 3: Sorptionsisotherme der unterschiedlichen Materialien, die in den Simulationsvarianten für die Innenoberfläche von vier Wänden und der Decke verwendet werden.

Ergebnisse

Als Ausgangspunkt wird ein herkömmlicher Gipsputz verwendet, der mit einer wenig Feuchte durchlassenden Beschichtung (0,5 mm) versehen ist. Dieser Gipsputz wird außerdem ohne Beschichtung betrachtet. Als dritte Variante wird ein Klimaputz verwendet, wie er in einer Materialdatenbank (WUFI®) beschrieben ist. Schließlich wird von diesem Klimaputz die Sorptionsisotherme so angepasst, dass im unteren Luftfeuchtebereich extrem viel Feuchte aufgenommen werden kann, während die maximale Wasseraufnahme gleichbleibt. Dies ist ein hypothetischer Ansatz und kann momentan nicht mit einem realen Putz abgebildet werden. Die Putzschichten sind jeweils 15 mm stark. Mit den Klimadaten des Jahres 2010 (Standort Karlsruhe) ergeben sich gemäß den oben dargestellten Norm-Kriterien (bzw. des angepassten Komfortbereichs) für den versiegelten Gipsputz 1113 (284) Überschreitungsstunden, für den Gipsputz 959 (275), für den Klimaputz 871 (201) und für den angepassten Klimaputz 774 (160). Deutlich zu erkennen ist die Auswirkung der unterschiedlich strengen Kriterien einerseits und der Einfluss der veränderten Putzeigenschaften andererseits. Im besten Falle wird eine Reduktion der Überschreitungsstunden um 43 Prozent erzielt. In Abbildung 4 wird für die vier Varianten der Energiebedarf für die Entfeuchtung verglichen. Dabei wird unterschieden zwischen einer maximal zulässigen relativen Luftfeuchte im Raum von 65 % und 55 %. Auch hier ist erkennbar, dass der

Putz mit verbesserter Feuchtaufnahme einen positiven Einfluss hat. Bei der geringeren Anforderung reduziert der hypothetische Klimaputz den Energiebedarf um 24 % verglichen mit der versiegelten Oberfläche. Bei der verschärften Anforderung ist der absolute Energiebedarf wie erwartet höher, die prozentuale Einsparung beträgt jedoch nur 8 %. Die maximale absolute Einsparung, die in diesen Simulationen erzielt werden konnte, lag bei 22 kWh für den betrachteten Raum. Selbst wenn man diesen Wert für eine ganze Wohnung vervierfacht, liegt die Einsparung nur im Bereich weniger Euro. Die Verwendung eines mit größerem Aufwand hergestellten – und damit auch teureren – Putzes scheint daher aus Gründen der Kostenreduktion durch die Energieeinsparung allein nicht gerechtfertigt. Vielmehr müsste man zusätzlich auch den Komfortgewinn monetär bewerten.

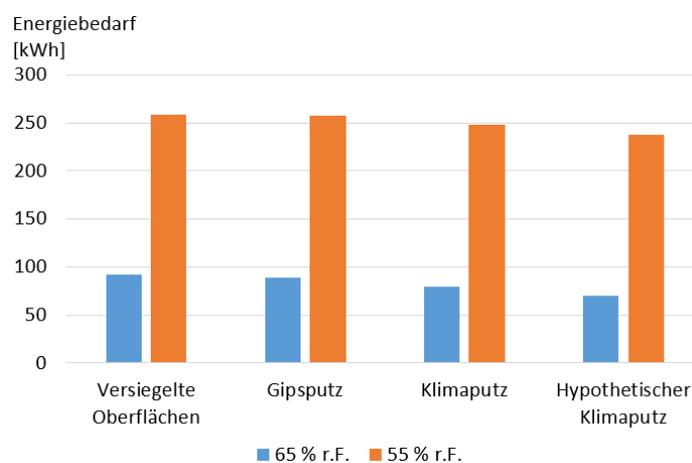


Abb. 4: Simulierter Energiebedarf für die Entfeuchtung (latente Kühlung) mit Sollwert 65 % bzw. 55 % relative Luftfeuchte während der Monate Mai bis September.

Fazit und Ausblick

Die vorgestellten Probandenversuche haben zu einer differenzierten Systematik bei der Bewertung sommerlicher feuchtwarmer Innenraumzustände geführt. Diese weist einen größeren Akzeptanzbereich hinsichtlich erhöhter Luftfeuchte als die Norm auf – in Abhängigkeit von der Temperatur. Weitere Versuche im Sommer 2017 werden genutzt, um die Stichprobe zu vergrößern und weitere Auswertungen durchzuführen. Anhand von Simulationen konnte aufgezeigt werden, dass modifizierte Innenputze einen deutlichen Einfluss auf die Anzahl der Stunden oberhalb einer bestimmten Komfortgrenze haben können. Es wurde ebenso gezeigt, dass Putze mit optimiertem Feuchtespeicherverhalten ein theoretisches Potenzial zur Energieeinsparung bei der Entfeuchtung haben. Erste Analysen haben gezeigt, dass dieses Potenzial jedoch sehr gering ist. Ziel für die weiteren Simulationen ist es, die Sollwerte für die Entfeuchtung als Mischungsverhältnis anzugeben, um analog zu den Komfortkriterien zu verfahren. Aus programmieretechnischen Gründen war dies bisher nicht möglich. Außerdem soll für weitere Simulationen im Austausch mit dem IMB oder einem Putzhersteller geprüft werden, welche Putzeigenschaften (insbesondere der Verlauf der Sorptionsisotherme) realistisch umsetzbar sein können.

Literaturverzeichnis

- [1] Umminger, M.; Kleber, M.; Schipper, H.; Haist, M.; Vogel, M.; Brecht, B.; Wagner, A.; Müller, H.S.; Leistungskriterien für wohnumfortgerechte Wandbaustoffe unter Einfluss des Klimawandels in Baden-Württemberg; Mauerwerk-Kalender 2016; S. 547-551.
- [2] Kleber, M.: Schwülegrenze in Innenräumen aus der Perspektive des Nutzerkomforts. HLH Bd. 67 (2016), Nr. 11, November.
- [3] DIN EN 15251, Eingangparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- [4] P. O. Fanger: Thermal Comfort. Danish Technical Press, 1970.