

Forschungsprojekt

Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung

Abschlussbericht

**gefördert unter dem Az: 25936 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Darmstadt, Oktober 2008

Autoren:
Jürgen Schnieders
Dr. Rainer Pfluger
Dr. Wolfgang Feist

Dieser Bericht steht
unter www.passiv.de
zum Download zur Verfügung

Forschungsprojekt

Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung

Abschlussbericht

**gefördert unter dem Az: 25936 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Darmstadt, Oktober 2008

Autoren:
Jürgen Schnieders
Dr. Rainer Pfluger
Dr. Wolfgang Feist

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	25936	Referat	24/2	Fördersumme	18.908,00 €
----	--------------	---------	-------------	-------------	--------------------

Antragstitel **Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung**

Stichworte Wärmerückgewinnung, Feuchterückgewinnung, Heizwärmebedarf, Energiebilanz, Gebäude, Passivhaus

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
11 Monate	26.11.07	31.10.08	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Passivhaus Institut Dr. Wolfgang Feist Rheinstr. 44/46 64283 Darmstadt	Tel	06151/82699-0
		Fax	06151/82699-11
		Projektleitung Jürgen Schnieders	
		Bearbeiter Jürgen Schnieders, Dr.-Ing. Rainer Pfluger	

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Wärmerückgewinnungssysteme können mit Feuchterückgewinnung kombiniert werden. Diese Systeme sind seit vielen Jahren im Nichtwohnungsbauten mit Erfolg im Einsatz. In letzter Zeit werden diese Geräte zunehmend auch im Bereich der Wohnungslüftung eingesetzt. Sie tragen dazu bei, dass die relative Raumlufffeuchte auf höherem Niveau gehalten wird, darüber hinaus wird den Geräten aber auch ein energetischer Nutzen über die Enthalprierückgewinnung zugeschrieben. In welcher Höhe dieser Nutzen angerechnet werden kann, darüber besteht sowohl im nationalen wie internationalen Rahmen bislang noch Uneinigkeit. Diese Frage zu klären ist Ziel des Vorhabens.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Messdaten typischer Geräte dieser Art sollen für Berechnungsmodelle herangezogen werden. Mit Hilfe der gekoppelten thermischen und hygrischen Simulation werden die Enthalpiebilanzen anhand von Beispielgebäuden ausgewertet. Es hat sich gezeigt, dass verlässliche quantitative Aussagen in diesem Bereich nur über die Simulation, nicht aber aus Feldmessungen gewonnen werden können. Messergebnisse können dagegen zur qualitativen Überprüfung herangezogen werden. Im Rahmen der Simulation wird die Abhängigkeit der Raumlufffeuchte von den Feuchtequellen, der Außenluftwechselrate und der Feuchterückgewinnung sowie der Feuchtepufferung in Baustoffen und Einrichtungsgegenständen berücksichtigt. Aus den Ergebnissen sollen energetische Bewertungsgrößen abgeleitet werden, die als effektive Jahresmittelwerte für bestimmte Einsatzgebiete im Rahmen der Bilanzrechnung und energetischen Bewertung eingesetzt werden können.

Ergebnisse und Diskussion

Die energetischen Einflüsse der Feuchterückgewinnung sind vielschichtig:

- Es verdunstet während der Heizperiode weniger Wasser aus Bauteilen, Möbeln etc.
- Bei höherer Luftfeuchte kann nach ISO 7730 eine geringere Raumtemperatur angesetzt werden, um den gleichen Komfort zu erreichen.
- Die internen Wärmegevinne werden durch die Luftfeuchte beeinflusst: Die Wärmeabgabe von Personen verschiebt sich von der latenten zur sensiblen Wärmeübergabe, die Verdunstung aus z.B. Zimmerpflanzen wird reduziert.
- Im Wärmeübertrager entsteht weniger Kondensat, dadurch sinkt der Wärmebereitstellungsgrad.
- Durch die Reduzierung des Kondensats könnten die Perioden, in denen zum Frostschutz die Außenluft vorgewärmt werden muss, kürzer werden.
- Die geringere Feuchteabfuhr kann es teilweise notwendig machen, durch höheren Luftwechsel eine überhöhte Raumlufffeuchte zu vermeiden. Das führt zu höherem Heizwärmebedarf und erhöhtem Stromverbrauch für das Lüftungsgerät.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass diese Mechanismen sich teilweise gegenseitig beeinflussen und der quantitative Einfluss in bedeutendem Maße auch durch die Randbedingungen bestimmt wird. Insbesondere muss bei hohen Feuchtequellen im Gebäude bereits für geringe Feuchteverhältnisse der Lüftungsvolumenstrom so weit erhöht werden, dass es zu einem bedeutenden Mehrbedarf an Heizwärme kommt, während bei niedrigen Feuchtequellen auch eine wirkungsvolle Feuchterückgewinnung noch zu Energieeinsparungen führt.

Für typische Wohnraumbedingungen konnte gezeigt werden, dass durch Feuchterückgewinnung insgesamt eine Reduzierung des Heizwärmebedarfs erreicht werden kann. Der Effekt lässt sich umrechnen auf eine effektive Erhöhung des Wärmebereitstellungsgrades der Wärmerückgewinnung. Sie entspricht typischerweise einem Zuschlag auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad in Höhe von 0,08 η_x . Bei einem Feuchteverhältnis von 60% wächst der effektive Wärmebereitstellungsgrad also um ca. 4,8 Prozentpunkte. Dieser Zuschlag kann jedoch nur dort angesetzt werden, wo die zu erwartenden Feuchtequellen im Gebäude eine Feuchterückgewinnung angeraten erscheinen lassen; die eventuell notwendige Erhöhung des Luftvolumenstroms zur Feuchteabfuhr sind separat zu berücksichtigen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse sind im Endbericht zusammengefasst, der nach Freigabe durch die DBU zum Download auf www.passiv.de bereitgestellt wird. Die Ergebnisse werden ferner im Rahmen der 13. Passivhaustagung im April 2009 in Frankfurt vorgestellt. Darüberhinaus fließen sie in die Zertifizierung von Lüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung durch das Passivhaus Institut ein.

Fazit

Die Untersuchung der energetischen Effekte von Feuchterückgewinnung mittels thermisch-hygrischer Gebäudesimulation hat sich erwartungsgemäß als geeignetes Verfahren erwiesen. Als bedeutendes Ergebnis ist neben der Ermittlung einer leicht praktisch handhabbaren Näherung für die energetischen Einflüsse vor allem anzusehen, dass die Vorteile, aber auch die Grenzen des sinnvollen Einsatzes der Technologie beleuchtet werden konnten. In Gebäuden, in denen eine Erhöhung der Luftfeuchtigkeit aus hygienischen Gründen nicht sinnvoll ist, hat eine Feuchterückgewinnung einen Heizwärme-Mehrverbrauch zur Folge. Ferner wurde gezeigt, dass Wirkungsgrade weit über 100%, wie man sie aus Enthalpiebetrachtungen herleiten kann, keine sinnvolle Eingangsgröße in Energiebilanzverfahren sind.



Inhalt

1	Einführung	10
2	Grundlagen zur Raumlufffeuchte	12
2.1	Die Bedeutung der Raumlufffeuchte in der Wohnungslüftung	12
2.2	Einfluss der Raumlufffeuchte auf den thermischen und nichtthermischen Komfort	12
2.3	Einfluss der Raumlufffeuchte auf die Gesundheit.....	14
2.3.1	Funktion der Atmungsorgane	14
2.3.2	Literaturrecherche zum Thema Raumlufffeuchte und Gesundheit.....	15
2.3.3	Symptome und Auswirkungen zu geringer Raumlufffeuchte	17
2.4	Grenzbereiche der zuträglichen Raumlufffeuchte.....	21
3	Passive Feuchterückgewinnung in der Lüftungstechnik	25
3.1	Regeneratoren (Rotationswärmeübertrager, zyklischer Regenerator).....	25
3.2	Plattenwärmeübertrager mit Membran	27
4	Gekoppelte thermische und hygrische Simulation	28
4.1	Simulationsprogramm	28
4.2	Simulationsmodell.....	29
4.2.1	Gebäudemodell.....	29
4.2.2	Bauteile.....	33
4.2.3	Lüftung.....	33
4.2.4	Raumheizung.....	34
4.2.5	Interne Wärmegewinne und Feuchtelasten.....	35
4.2.6	Wechselwirkung zwischen Raumlufffeuchte und Feuchtelasten.....	38
4.2.7	Simulationsmodelle für Rotor und Wärmeübertrager mit Membran	39
5	Simulationsergebnisse	41
5.1	Die verschiedenen Wirkmechanismen der Feuchterückgewinnung.....	41
5.2	Vermeidung von überhöhten Luftfeuchten.....	46
5.2.1	Begrenzung auf konstante Luftfeuchte.....	46
5.2.2	Begrenzung auf außentemperaturabhängige Luftfeuchte.....	47
5.2.3	Ideale variable Feuchterückgewinnung.....	48
5.2.4	Variable Feuchterückgewinnung beim Rotor.....	49
5.3	Effektiver Wärmebereitstellungsgrad bei Feuchterückgewinnung.....	52
5.4	Frostschutz	53
5.5	Sensitivitätsanalysen.....	54
5.5.1	Einfluss der Annahmen zu den Feuchtequellen	54
5.5.2	Einfluss der Öffnung von Innentüren.....	55
5.5.3	Einfluss der Bauweise: Leichtbau oder Massivbau.....	56
5.5.4	Einfluss der Annahme zur Solltemperatur	57
5.6	Luftbefeuchtung	58
6	Ableitung von energetischen Bewertungsverfahren	61
6.1	Einfluss des reduzierten Kondensats im Wärmeübertrager.....	61
6.2	Einfluss der reduzierten Verdunstung aus Bauteilen	61
6.3	Einfluss der reduzierten Wärmeverluste bei reduzierter operativer Temperatur ...	61
6.4	Erhöhte interne Wärmegewinne bei höherer Raumlufffeuchte	62
6.5	Strombedarf	62
6.6	Reduzierung der Energieeinsparung durch feuchtebedingte Regelung des Volumenstromes bzw. der Rotordrehzahl.....	62
6.7	Erhöhung des Lüftungsvolumenstroms	63
6.8	Einsparung von Energie für ggf. notwendige Befeuchtung	64
6.9	Enthalpischer Wirkungsgrad	64
7	Schlussfolgerungen	66
8	Literatur	67
	Anhang A: Bauteilaufbauten	71
	Anhang B: Verteilung der Wärme- und Feuchtequellen.....	76



1 Einführung

Die Luftfeuchte in Gebäuden beeinflusst Gesundheit und Komfort der Bewohner. Sowohl zu geringe als auch zu hohe Feuchten sollten vermieden werden. Um bei Bedarf die Luftfeuchte in Wohngebäuden mit automatischer Komfortlüftung erhöhen zu können, sind verschiedene Systeme auf dem Markt, die Feuchte aus der Abluft zurückgewinnen. Ihr Einsatz ist insbesondere bei Gebäuden mit niedriger Feuchteproduktion oder mit spezifischen Anforderungen an die Raumlufffeuchte zweckmäßig.

Die Feuchterückgewinnung erhöht nicht nur die Luftfeuchtigkeit, sie wirkt sich auch in verschiedener Weise auf den Heizwärmebedarf aus:

- Es verdunstet während der Heizperiode weniger Wasser aus Bauteilen, Möbeln etc., die zugehörige Latentwärme muss nicht mehr durch das Heizsystem aufgebracht werden.
- Bei höherer Luftfeuchte kann nach ISO 7730 eine geringere Raumtemperatur angesetzt werden, um den gleichen Komfort zu erreichen.
- Die internen Wärmegewinne werden durch die Luftfeuchte beeinflusst: Die Wärmeabgabe von Personen verschiebt sich von der latenten zur sensiblen Wärmeübergabe, die Verdunstung aus z.B. Zimmerpflanzen wird reduziert.
- Im Wärmeübertrager entsteht weniger Kondensat, dadurch sinkt der Wärmebereitstellungsgrad.
- Durch die Reduzierung des Kondensats könnten die Perioden, in denen zum Frostschutz die Außenluft vorgewärmt werden muss, kürzer werden.
- Die geringere Feuchteabfuhr kann es teilweise notwendig machen, durch höheren Luftwechsel eine überhöhte Raumlufffeuchte zu vermeiden. Das führt zu höherem Heizwärmebedarf und erhöhtem Stromverbrauch für das Lüftungsgerät.

Der Einfluss dieser Aspekte wird in der vorliegenden Studie mit Hilfe gekoppelter, dynamischer Wärme- und Feuchtesimulation anhand eines vollständigen Beispiel-Passivhauses untersucht. Ziel ist es dabei, eine vereinfachte Bewertung der Feuchterückgewinnung für die Verwendung in den gängigen Energiebilanzverfahren wie z.B. dem PHPP abzuleiten. Der Schwerpunkt der Analyse liegt also nicht auf den erzielbaren Komfortverbesserungen, sondern auf der energetischen Bewertung der Feuchterückgewinnung. Die Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude im Passivhausstandard, d.h. mit sehr gutem Wärmeschutz und ausgezeichneter Luftdichtheit.



Danksagung

Das Forschungsprojekt „Energetische Bewertung von Wohnungslüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung“ wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Für weitere finanzielle Unterstützung danken wir auch der Hovalwerk AG, Vaduz, und Zehnder ComfoSystems, Zwolle.



2 Grundlagen zur Raumlufffeuchte

2.1 Die Bedeutung der Raumlufffeuchte in der Wohnungslüftung

Lüftungstechnisch gesehen gilt es, neben der Minimierung von Raumlufschadstoffen die Raumlufffeuchte in gewissen Grenzen zu halten. Für Letzteres gibt es unterschiedliche Beweggründe und Maßgaben. Von primärer Bedeutung ist dabei selbstverständlich der Einfluss auf die Gesundheit. Diesbezügliche Untersuchungen insbesondere für den Bereich niedriger Raumlufffeuchten werden im Abschnitt 2.3 vorgestellt und verglichen. Die Obergrenze der Raumlufffeuchte innerhalb der Heizperiode hängt primär vom bauphysikalischen und wärmetechnischen Standard der Gebäudehülle ab. Dabei wird die sichere Vermeidung von Schimmelpilzwachstum auf Bauteiloberflächen sowie die feuchtetechnische Bauschadensfreiheit gefordert. Behaglichkeitsprobleme treten erst bei höheren Temperaturen und Raumlufffeuchten auf, wenn die Wärmeabgabe des Körpers durch Strahlung, Konvektion und insbesondere Verdunstung an ihre Grenzen stößt (siehe hierzu Abschnitt 2.2). Eine physiologisch bedenkliche Situation bezüglich der Atmungsorgane besteht für den Menschen erst bei gesättigter Luft über Körperkerntemperatur, weil es ab dann zu Kondensat auf den Schleimhäuten mit entsprechender Viskositätsänderung kommt. Diese Grenze spielt jedoch in der Klimatechnik normalerweise keine Rolle. Ein weiterer Einwand gegen dauerhaft hohe Raumlufffeuchten und Temperaturen ist die vermehrte Ausgasung von Formaldehyd, welches in Werkstoffen eingebunden ist. Die Formaldehydkonzentration in der Raumluff verdoppelt sich bei einem Anstieg der Raumlufffeuchte von 34 % auf 70%, oder wenn die Temperatur um 7 K ansteigt [Lazzarin 2004].

Wesentlich weniger klar definiert ist die Grenze der physiologischen Zuträglichkeit der Raumlufffeuchte nach unten. Aus diesem Grund wird in den nachfolgenden Abschnitten hauptsächlich auf die Problematik geringer Raumlufffeuchten eingegangen. Trotz zahlreicher Untersuchungen auf diesem Gebiet können hier noch keine abschließenden Bewertungen vorgenommen werden.

2.2 Einfluss der Raumlufffeuchte auf den thermischen und nichtthermischen Komfort

Seit sich die Forschung mit der Frage des thermischen Komforts beschäftigt, wird auch die Frage nach der erforderlichen Luftfeuchte der umgebenden Luft untersucht, um thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Bis heute gibt es hierzu keine eindeutige Antwort. Vielleicht kann es eine solche Antwort auch gar nicht geben, vor allem weil verschiedene Körperpartien davon ganz unterschiedlich betroffen sind.



[Rietschel 1888] hat sich schon 1888 gründlich mit dem Thema auseinandergesetzt. Er schlägt vor, eine relative Feuchte von 40 bis 70 % in belüfteten Räumen anzustreben.

Es gibt nur wenige Betrachtungen, die zum Thema Luftfeuchtigkeit und Behaglichkeit später angestellt wurden, bei denen auf den Einfluss der Strömung im Raum eingegangen wird. In einer Untersuchung von [Olesen 1972] wird die gesamte Wasserabgabe einer Person auch unter verschiedenen Strömungsbedingungen gemessen. Es stellte sich bei so unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten wie $<0,1$ m/s und $0,8$ m/s bei einer sitzenden Person keine veränderte Wasserabgabe durch Verdunstung ein, obwohl der Stoffübergangskoeffizient sich stark geändert haben musste. Der Regelmechanismus des Körpers sorgt offensichtlich dafür, dass die gesamte Wärmeabgabe und damit auch die Verdunstung bei gleicher Aktivität konstant bleibt. Auf diesen Regelmechanismus wird im Abschnitt 2.3.3 näher eingegangen.

Wie in den nachfolgenden Ausführungen erläutert wird, wirkt sich die Luftfeuchte stets indirekt auf das Komfortempfinden des Menschen aus. Dies erschwert eine Sollwertfestlegung bzw. die Definition von Behaglichkeitsfeldern. Dass hier auch international noch keine Einigkeit zu diesem Thema erreicht wurde, zeigt sich an den unterschiedlichen Festlegungen in den jeweiligen Normen:

Nach DIN 1946 Teil 2, Kap. 4.15 kann als Behaglichkeitsgrenze – weitgehend unabhängig von der Lufttemperatur – 30 % r.F. gelten; gelegentliche Unterschreitungen sind vertretbar.

Gemäß dem Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA) erstreckt sich der Behaglichkeitsbereich für die relative Luftfeuchtigkeit von 30 % r.F. im Winterbetrieb bei Raumlufttemperaturen von 19 bis 24 °C bis 65 % r.F. im Sommerbetrieb bei 22 bis 28 °C. Gelegentliche Unterschreitungen an wenigen Tagen pro Jahr bis 20 % r.F. und gelegentliche Überschreitungen bis 75 % r.F. sind physiologisch zulässig (SIA V382/1, Kap. 2 2 3 3).

Im ASHRAE Fundamentals Handbook 8.12 wird vermerkt, dass Klagen über Komforteinbußen wegen trockener Nase, Hals, Augen und Haut im Bereich niedriger Raumluftfeuchten auftreten, typischerweise bei Taupunkttemperaturen unter 0 °C (das entspricht bei 20 °C einer relativen Feuchte von 21,2 %). Unter Berücksichtigung dieser und anderer Beobachtungen empfiehlt der ASHRAE Standard 55, dass die Taupunkttemperatur von bewohnten Räumen nicht unter 2 °C (das entspricht 25 % r.F. bei 20 °C) liegen sollte.



2.3 Einfluss der Raumluftfeuchte auf die Gesundheit

2.3.1 Funktion der Atmungsorgane

Kalte trockene Luft wird nicht in gleichem Grade als trocken empfunden wie warme Luft mit der gleichen absoluten Feuchte. Die Befeuchtungsleistung, die der Körper und seine Schleimhäute aufbringen müssen, ist in beiden Fällen gleich. Allerdings kommt es bei kalter Luft zu einem erheblichen Sekretionsreiz und dadurch zur Befeuchtung der Schleimhäute, die im Bereich der Nase durch Rückkondensation der warmen Ausatemluft auf den bei Einatmung abgekühlten Schleimhäuten verstärkt wird.

Die Nase

Die Nase bildet in ihrem Eingangsbereich den engsten Teil der Atemwege mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit. In ihrem inneren Teil wird die Luft durch von den Seiten vorspringende Leitelemente, die sog. „Choanen“, mehrfach umgelenkt und verwirbelt, so dass ein intensiver Schleimhautkontakt zustande kommt. In der Nase wird die Luft bei der Einatmung angewärmt und befeuchtet, bei der Ausatmung wieder abgekühlt und entfeuchtet, so dass man von einem regenerativen Wärmeaustauscher sprechen kann. An der Schleimhaut der Nase und den Haaren des Naseneingangsbereiches können vor allem gröbere Partikel zurückgehalten werden. Auf schädigende Wirkungen, z.B. Reizgase, Allergene oder Infektionen reagiert die Nase durch Schwellung der Schleimhäute, Sekretabsonderung und evtl. eitrigen Ausfluss, Symptome, die jedem als verschiedene Stadien des Schnupfens bekannt sind.

Die Luftröhre und das Bronchialsystem

Die Luftröhre und das Bronchialsystem bilden den nächsten größeren Abschnitt der Atemwege. Ihr Epithel ist mit feinen Flimmerhärchen besetzt, den sog. Zilien, welche Schleim und Verunreinigungen nach außen tragen können und die Oberfläche des Epithels vor Schädigungen schützen können. Diese Zilien können bei schädigenden Einflüssen schnell verloren gehen, um sich später wieder zu regenerieren. Die Wand der Trachea ist durch Knorpelringe verstärkt und damit im Wesentlichen starr, während die Wand der kleineren Bronchien und Bronchiolen eine Ringmuskulatur aufweist und sich kontrahieren oder erweitern kann. Schadstoffe können aus diesem Teil der Atemwege durch Sekretabsonderung sowie durch die Bewegung der Flimmerhärchen abtransportiert werden sowie bei Reizung der Schleimhäute durch Hustenstöße entfernt werden. Die Reaktion der mittleren und unteren Atemwege kann in vermehrter Schleimabsonderung und in Schwellung der Schleimhaut bestehen, daneben kann es zu Verengungen der Atemwege kommen, die als erhöhter Atemwegswiderstand die Atmung behindern. Bei Asthma kann dies zu erstickungs-



artigen Anfällen mit Hustenreiz führen. Bei schweren Entzündungen kommt es zum Auswandern von Leukozyten, Fibrinabsonderung, vermehrter Durchblutung und Schleimhautschädigung bis zu Blutungen und Geschwüren.

Der Alveolarbereich

Der Alveolarbereich hat den größten Querschnitt bzw. die größte Oberfläche der Atmungsorgane (fast 100 m²) und demnach die geringste Strömungsgeschwindigkeit. Hier findet der Gasaustausch statt, und sehr kleine Partikel (ca. 1 µm) können hier deponiert werden. Alle Substanzen, die an den Wänden der Alveolen adsorbiert worden sind, bleiben im Körper, weil es aus dem Alveolarbereich für abgeschiedene Substanzen keinen Abtransport über die Luftwege gibt. Sehr kleine Partikel können wieder ausgeatmet werden, wenn sie nicht vorher adsorbiert wurden, alles andere muss aber über das Blut oder über Gewebszellen im Körper aufgenommen und verarbeitet werden. Schädigungen im Alveolarbereich können sich akut durch Flüssigkeitsansammlung im Gewebe äußern, unter dem Bild des lebensbedrohenden Lungenödems. Die lokal freigesetzten Entzündungsprodukte, wie Sekret, Eiter, Fibrin, Zellansammlungen, müssen an Ort und Stelle wieder aufgelöst werden, was meistens mit Vernarbungsvorgängen verbunden ist. Langsam wirkende Substanzen, wie z.B. manche Infektionserreger oder Asbestfasern, verursachen lokale Entzündungsreaktionen oder bösartige Wucherungen. Sie können aber auch auf dem Blutweg in andere Regionen des Körpers transportiert werden und dort ihre schädigende Wirkung ausüben. Gut wasserlösliche Substanzen, wie z.B. Schwefeldioxid, wirken bevorzugt in den oberen Luftwegen, während lipophile Substanzen, wie z.B. Ozon, bevorzugt im Alveolarbereich wirken.

2.3.2 Literaturrecherche zum Thema Raumlufftfeuchte und Gesundheit

Zum Thema Raumlufftfeuchte und „trockene Luft“ sowie zu deren Auswirkungen auf das menschliche Wohlbefinden und die Gesundheit wurde bereits sehr viel publiziert. Eine aktuelle und ausführliche Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen findet sich in [Hahn 2007].

Innerhalb der Heizperiode werden von Beschäftigten an Innenraumarbeitsplätzen vermehrt folgende Beschwerden geäußert:

- trockener Hals
- trockene Haut
- trockene Augen

Desweiteren soll der häufig geäußerten Meinung, dass durch zu trockene Luft die Schleimhäute der Atemwege ausgetrocknet würden und dadurch deren Widerstandskraft gegenüber Bakterien und Viren herabgesetzt wird, nachgegangen werden.



Über längere Zeit anhaltende Raumlufffeuchten auf ausgeprägt niedrigem Niveau treten in skandinavischen Ländern auf, diese liegen nach [Reinikainen 1992] häufig im Bereich von 10 bis 20 %.

Die Frage, ob die häufig geäußerte Empfehlung einer relativen Luftfeuchte von mindestens 30 bis 40 % zur Vermeidung negativer Auswirkungen auf die Gesundheit eingehalten werden soll, wurde auf Veranlassung der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft vom Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitsschutz – BGIA in Form der genannten Literaturstudie ([Hahn 2007]) untersucht, weil hierzu zum Teil widersprüchliche Studien vorlagen.

Bei den Studien handelt es sich sowohl um Laboruntersuchungen in Klimakammern als auch um Feldstudien in Form von Vergleichsuntersuchungen mit bzw. ohne Befeuchtungseinrichtung. Die Ergebnisse liegen fast ausschließlich in Form von Fragebögen zum persönlichen Empfinden der Probanden vor.

Nur vereinzelt wurden auch medizinische Untersuchungen z.B. zur Schleimhautviskosität in den Atemwegen oder zur Veränderung der Stabilität des Tränenfilms der Augen in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte durchgeführt.

Zunächst stellt sich die Frage, ob der Mensch überhaupt in der Lage ist, die relative Luftfeuchte wahrzunehmen. Die Klimakammeruntersuchungen von [Koch 1969] und [Andersen 1974] zeigten, dass die Einschätzungen der Probanden eher unzuverlässig waren, lediglich die Veränderung der relativen Luftfeuchte über einen größeren Bereich wurde wahrgenommen. Nach [McIntyre 1978] ist die Wahrnehmungsfähigkeit für die relative Luftfeuchte von der Lufttemperatur abhängig, sie nimmt mit steigender Temperatur zu. Von [Nagda 2001] wurde bemängelt, dass alle bisherigen Studien mit relativ jungen Probanden im Alter von 16 bis 26 Jahren durchgeführt wurden. Diese Studie gibt zu bedenken, dass ältere Menschen eine stärker ausgeprägte Wahrnehmungsfähigkeit für die relative Luftfeuchte besitzen könnten.

Die Wahrnehmung der Luftqualität in Abhängigkeit von der Temperatur und Luftfeuchte wurde von [Fang 1998a], [Fang 1998b] und [Reinikainen 1992], [Reinikainen 1997] untersucht. Demnach sinkt die wahrgenommene Luftqualität mit zunehmender Temperatur und Luftfeuchte, die Luft wird dann als stickig empfunden. Nach [Toftum 1998] führt die Verdunstungskühlung der Schleimhäute bei niedrigen Temperaturen und geringer Luftfeuchte zu einer angenehmen, akzeptablen und frischen Empfindung. Bei hohen Temperaturen und relativen Luftfeuchten wird die empfundene Luftqualität hauptsächlich durch die Klimaparameter bestimmt, innenraumübliche Luftverunreinigungen spielen dann eine geringere Rolle.

Wie in [Sundell 1993], [Fang 2004] und [Gassel 2003] berichtet können Klagen über zu trockene Luft auch bei mittleren Luftfeuchten auftreten, verursacht z.B. durch zu



hohe Raumlufttemperaturen, zu geringe Luftwechselrate, Luftverunreinigungen, erhöhte Staubbelastung oder Zugluft.

2.3.3 Symptome und Auswirkungen zu geringer Raumluftfeuchte

Austrocknung der Schleimhäute

Untersuchungen zum nasalen Schleimfluss von [Andersen 1972], [Andersen 1974] konnten keinen signifikanten Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Schleimfluss in der Nase nachweisen. Die Nase der jungen Probanden war auch noch bei relativen Luftfeuchten von 9 % über einen Zeitraum von 78 Stunden in der Lage, die Trockenheit durch eine körpereigene Befeuchtung zu kompensieren. Noch extremeren Bedingungen waren Arbeiter an einer Produktionsstätte mit 2,4 % r.F. ausgesetzt, ohne dass Unterschiede in der Beschwerdehäufigkeit im Vergleich zu nicht exponierten Kollegen nach [Sato 2003] festzustellen war. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass es sich dabei um Reinraumuntersuchungen mit hochgradig gefilterter Luft handelt.

Abweichende Beobachtungen wurden von [Strauss 1978] bei Asthmatikern dokumentiert, hier konnte eine Luftbefeuchtung zur Linderung der Symptome beitragen, weil die Erkrankung die körpereigene Befeuchtung einschränkt.



Flimmerhärchen Becherzelle Basalzelle

Quelle: Prof. Dr. Guggenbichler

Im Unterschied zu den vorgenannten Untersuchungen wurden von [Guggenbichler 2007] experimentelle und klinische Untersuchungen des Sekrettransportes durchgeführt. Dabei konnte einerseits eine Korrelation zwischen einer verminderten Luftfeuchtigkeit im Schlafraum für mindestens 8 h und der Transportgeschwindigkeit der Gelschicht der Schleimhaut festgestellt werden. Auffällig war dabei aber auch die hohe individuelle Streubreite, die vom Hydrationszustand und den individuellen Eigenschaften der Versuchsteilnehmer abhing. Guggenbichler zieht aus seinen Untersuchungen das Fazit, dass für eine effiziente mechanische Klärfunktion der Luftwege (mucociliäre Clearance) eine Luftfeuchtigkeit von mindestens 30 %, besser 45 % nötig sei. Die Transportgeschwindigkeit (Zilienschlagfrequenz) nimmt mit sinkender Luftfeuchte ab. Eine vollständige Blockierung der Zilientätigkeit wurde bei



Raumluftfeuchten unter 20 % beobachtet. Dies sei besonders für einen gefährdeten Personenkreis z.B. in Krankenhäusern und in Altenheimen von besonderer Bedeutung. Ausreichend hohe Luftfeuchtigkeit führe auch zu einer geringeren Anfälligkeit für Infektionen der Luftwege.

Erkältungskrankheiten

Eine Übertragung der Keime entsteht erst bei der Verbreitung durch kleinste Aerosole. Unter anderem landen größere Tropfen, welche durch Husten oder Schnupfen in die Luft geschleudert werden, bereits nach einem Meter am Boden. Bei trockener Luft beginnt die Tropfenoberfläche schnell zu sehr kleinen Tröpfchen (0.5 bis 5 μm) zu verdunsten. Diese Aerosole werden tief in die Lunge eingeatmet und können dabei Bakterien und Viren mit sich tragen ([Lazzarin 2004]).

In vergleichenden Feldstudien (siehe [Feldstudien]) wurde jeweils mit einer Kollektivgruppe mit Luftbefeuchtung verglichen. Es zeigte sich in den meisten Studien, dass durch eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte die Wahrscheinlichkeit, an einem grippalen Infekt zu erkranken, gesenkt werden kann.

Als ursächlich wird in [Fiedler 1996], [Lubart 1979] und [Green 1985], allerdings ohne medizinischen Beleg, die Austrocknung der Schleimhäute der Atemwege genannt. Die medizinischen Untersuchungen zu diesem Sachverhalt von [Andersen 1972], [Andersen 1974] kommen, wie bereits erwähnt, zu anderen Ergebnissen.

Nach Laboruntersuchungen von [Hemmes 1960] ist die Überlebensfähigkeit von Influenzaviren in der Raumluft im Bereich von ungefähr 15 bis 40 % r.F. hoch, im Bereich von ca. 50 bis 90 % relativer Luftfeuchte dagegen eher gering (siehe hierzu auch [Green 1974], [Green 1985] und [Arundel 1986]). Auch nach [Lowen 2007] konnte ein Zusammenhang zwischen steigenden Grippefällen und der Raumluftfeuchte ermittelt werden. Es zeigte sich, dass bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 20 und 35 % das Risiko, sich mit einem Influenza-A-Virus anzustecken, etwa dreimal so hoch ist im Vergleich zu einer mittleren Raumluftfeuchte von 50 %. Ursachen sind u. a. die schnellere und weitere Verteilung der feinen Tröpfchen sowie die längere Lebensdauer der Viren in trockenerer Luft.

Bei höherer relativer Luftfeuchte werden u.a. Bakterien mit Wasser umschlossen. Dadurch erhöht sich der Partikeldurchmesser, was nach [Sale 1972] und [Arundel 1986] zum einen zu einer Zunahme der Sinkgeschwindigkeit führt und zum anderen das Vordringen der Teilchen in den Atemtrakt erschwert [Green 1985].

Ein weiterer Grund für die höhere Häufigkeit von Erkältungskrankheiten bei geringen Raumluftfeuchten liegt vermutlich auch im höheren Staubgehalt der Luft. Staubpartikel und darin befindliche Mikroorganismen bleiben nach [Sale 1972] und [Lubart 1979] länger schwebfähig.



Stimme

Mit abnehmender Raumlufffeuchte ändert sich das Schwingverhalten der Stimm lippen, die Stimmritze verschließt nicht mehr komplett. Dies führt zu erhöhter Stimmbelastung und Heiserkeit, bis hin zum Verlust der Stimme [BGIA 2005]

Augenbeschwerden

Nach [Laviana 1988] wurden jeweils bei 10 resp. 30 % r.F. über eine Dauer von zehn Stunden kein Einfluss auf die Sehschärfe und die Hornhautverkrümmung festgestellt. Allerdings fühlten sich die Probanden unter beiden Umständen nach vier Stunden zunehmend belastigt. Auch [Sato 2003] stellte bei den Beschäftigten der Produktionsstätte mit nur 2,5 % r.F. vermehrt Beschwerden über trockene Augen fest.

Neben dem Einfluss der Raumlufffeuchte spielen auch die erhöhte Verdunstung bei Zugluft sowie die geringere Blinzelfrequenz bei konzentrierter Bildschirmarbeit eine Rolle. Letztere führt zu einer Störung im Aufbau des Tränenfilms und somit zu einer vorübergehenden Austrocknung der Augenoberfläche [Backmann 1999].

Durch eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte von im Mittel 26% auf im Mittel 33 % kann nach einer Studie von [Reinikainen 1992] die Häufigkeit von Klagen über trockene Augen gesenkt werden.

Hautbeschwerden

Werden Klagen über Hautbeschwerden durch zu trockene Haut (Xerodermie) geäußert, so treten häufig Rauigkeit, Schuppung oder mangelnde Elastizität auf, verbunden mit Brennen und Jucken (häufig an Armen und Händen), sowie rissige Lippen und Hautrisse (Entzündungen).

Nach [Spiegl 1998] konnte eine Zunahme der Hautrauigkeit nach dreistündigem Aufenthalt in einer Klimakammer mit einer relativen Luftfeuchte von 30 % festgestellt werden.

Der Diffusionskoeffizient der Haut soll nach [Baartz 1996] unter anderem vom Wassergehalt der obersten Schicht der Epidermis, dem Stratum Corneum abhängen. Die höchste Wasserdampfabgabe tritt bei einer relativen Feuchte von 30 bis 40 % auf. Darunter wird der Wassergehalt der Haut geringer und der Diffusionswiderstand wächst an. Der Aufbau der Haut wird als zweischichtiges Modell erläutert, wonach die interzellulären Strukturen sowohl für die Wasserbarrierefunktion der Haut als auch für ihr Wasserhaltevermögen verantwortlich sind und die Hautwasserabgabe um das 50- bis 100fache verringern können. Der Regelmechanismus für die reduzierte Wasserdampfabgabe bedeutet längerfristig vermutlich eine Austrocknung der Haut.



Elektrostatische Auf- und Entladung

Elektrostatische Phänomene stellen im Allgemeinen keine Gefahren für die Menschen dar, allerdings können durch die Entladungsvorgänge z.B. Halbleiterbauteile im Inneren von Geräten zerstört werden sowie Partikelansammlungen auf glatten Oberflächen (z.B. verschmutzte Bildschirme) hervorgerufen werden. Gefährlich werden diese Phänomene nur in Gegenwart explosionsfähiger Stoffe. Ab einer relativen Luftfeuchte von 40 bis 45 % sinkt die Gefahr des Auftretens elektrostatischer Phänomene rapide ab.

Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Milbenwachstum

Milben selbst sind keine Gesundheitsgefahr. Jedoch können Körperteile und Kot von Milben beim Menschen Abwehrreaktionen der Antikörper und somit Allergien auslösen. Sie stellen die häufigste Ursache der sog. Hausstauballergie dar und gedeihen in sehr vielen und auch in sauber gehaltenen Wohnungen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte. Milben vermehren sich am besten bei 25 °C und 70-80% relativer Luftfeuchtigkeit, können aber auch bei trockener Umgebung überleben. Ihre Ansprüche an Luftfeuchtigkeit und Temperatur sind nach unten hin bei ca. 50% und 15-20 °C begrenzt. Durch trockene Luft und Kühle kann man also ihr Auftreten ganz wesentlich reduzieren. Dies stößt allerdings dort auf Schwierigkeiten, wo sie besonders häufig zu finden sind, nämlich im Bereich von Kopfkissen und Matratzen der Betten. Tägliches Lüften und Ausschütteln kann auch hier die Konzentration erheblich verringern.

Gesundheitliche Beeinträchtigungen durch Schimmelpilz

Schimmelpilz benötigt entgegen der bekannten Meinung nicht zwingend feuchte Luft. Schimmelpilzwachstum wurde zwischen 11% und 92% r.F. gefunden. Viel wichtiger ist der Untergrund, auf welchem Schimmelpilz wachsen kann. Hier verwendet man den Wasseraktivitätsgrad¹ (water activity) als relevanten Wert. Liegt dieser zwischen 0,90 und 0,97, kann der Schimmelpilz wachsen und sich vermehren. Unter 0,80 wurden keine Vermehrungen festgestellt.

Gesundheitliche Beeinträchtigungen treten vornehmlich durch die allergene Wirkung von Schimmelpilzen auf. Als Schimmelpilzallergene können Bestandteile der Zellwand oder auch Sekretionsprodukte der Schimmelpilze fungieren. Anhand von epidemiologischen Untersuchungen wurde wiederholt ein Zusammenhang zwischen Feuchteproblemen bzw. Schimmelpilzbefall in Gebäuden einerseits und einer erhöhten Rate an Reizerscheinungen an den Schleimhäuten sowie Atemwegs-

¹ Die Wasseraktivität ist definiert als der Quotient aus der Konzentration an Wasser in der Dampfphase im Luftraum über dem Material und der Wasserkonzentration im Luftraum über reinem Wasser bei der gleichen Temperatur. Wenn ein Feuchte- und Temperaturgleichgewicht zwischen Material und umgebender Luft erreicht ist, ist die Wasseraktivität gleich der relativen Luftfeuchte.



erkrankungen andererseits nachgewiesen. Da die Rate allergischer Erkrankungen häufig nicht sehr ausgeprägt mit diesen Parametern korrelierte, wurden toxische und irritative Effekte von Schimmelpilzen als Ursache vermutet. In diesem Zusammenhang wurden neben irritativ wirksamen Zellwandbestandteilen von Schimmelpilzen (z.B. sog. Glucanen) auch die Mykotoxine ins Spiel gebracht. Mykotoxine sind sekundäre Metaboliten von Schimmelpilzen, die für Menschen oder Tiere toxische Eigenschaften haben ([Engelhart 2000]).

Behinderung der Sauerstoffaufnahme

Trockene Atemluft behindert die Sauerstoffaufnahme und dessen Transport zur Blutbahn. Abgespanntheit, Müdigkeit und Konzentrationsschwäche sind Symptome verminderter Sauerstoffzufuhr.

2.4 Grenzbereiche der zuträglichen Raumlufffeuchte

Wie bereits eingangs erwähnt ist die physiologische Obergrenze der Raumlufffeuchte in der Heizperiode für die Raumlufftechnik nicht relevant. Zur Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen durch Schimmelpilzbildung, welche, wie bereits erwähnt, schon vor der Kondensatbildung an Oberflächen auftritt, ist jedoch die Raumlufffeuchte in der Heizperiode je nach Baustandard der Gebäudehülle zu begrenzen.

Nach DIN 4108-2 März 2001 (Mindestanforderungen an den Wärmeschutz im Bereich von Wärmebrücken) sind nach Abschnitt 6.2 (Maßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung) folgende bauliche Randbedingungen einzuhalten:

Ecken von Außenbauteilen mit gleichartigem Aufbau, deren Einzelkomponenten die Anforderungen nach Tabelle 3 erfüllen, bedürfen keines gesonderten Nachweises. Alle konstruktiven, formbedingten und stoffbedingten Wärmebrücken, die beispielhaft in DIN 4108 Bbl. 2 aufgeführt sind, sind ausreichend wärmegeämmt. Es muss kein zusätzlicher Nachweis geführt werden. Für alle davon abweichenden Konstruktionen muss der Temperaturfaktor an der ungünstigsten Stelle die Mindestanforderung $f_{Rsi} \geq 0,70$ erfüllen, d. h. bei den unten angegebenen Randbedingungen ist eine raumseitige Oberflächentemperatur von $\theta_{si} \geq 12,6 \text{ °C}$ einzuhalten. Fenster sind davon ausgenommen. Für sie verweist die Norm auf E DIN EN ISO 13788.

Bei bekanntem f_{Rsi} kann die raumseitige Oberflächentemperatur wie folgt berechnet werden:

$$\theta_{si} = f_{Rsi} (\theta_i - \theta_e) + \theta_e$$



Dabei ist

θ_{si} die raumseitige Oberflächentemperatur

θ_i die Innenlufttemperatur

θ_e die Außenlufttemperatur

Es liegen folgende Randbedingungen zu Grunde:

Innenlufttemperatur $\theta_i = 20 \text{ °C}$;

relative Luftfeuchte innen $\Phi_i = 50 \text{ %}$;

auf der sicheren Seite liegende kritische zu Grunde gelegte Luftfeuchte nach E DIN EN ISO 13788 für Schimmelpilzbildung auf der Bauteiloberfläche $\Phi_{si} = 80 \text{ %}$

Außenlufttemperatur $\theta_e = - 5 \text{ °C}$;

Wärmeübergangswiderstand innen $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ (beheizte Räume) bzw. $R_{si} = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ (unbeheizte Räume);

Wärmeübergangswiderstand, außen $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Bei Wärmebrücken in Bauteilen, die an das Erdreich oder an unbeheizte Kellerräume und Pufferzonen grenzen, muss von den in Tabelle 5 angegebenen Randbedingungen ausgegangen werden: Keller 10 °C ; Erdreich 10 °C ; unbeheizte Pufferzone 10 °C ; unbeheizter Dachraum -5 °C .

Dieser Bewertungsansatz gilt nur für zwei angrenzende Räume. Grenzen mehr als zwei Temperaturrandbedingungen an ein Bauteil, so sind mit mehrdimensionalen Wärmebrücken-Berechnungsprogrammen die jeweiligen Temperaturgewichtungsfaktoren g_i für den kältesten Oberflächenpunkt eines Raumes zur Beurteilung nach EN ISO 10211-1 heranzuziehen. Für dreidimensionale Bauteile mit i angrenzenden Räumen mit der jeweiligen Lufttemperatur θ_i

$$T(x,y,z) = \sum g_i(x,y,z) \theta_i$$

Setzt man nun die Randbedingungen der E DIN EN ISO 13788 für Schimmelpilzbildung auf der Bauteiloberfläche an, so wird die minimale Oberflächentemperatur auf $12,5 \text{ °C}$ begrenzt, wenn man von einer Raumlufftemperatur von 20 °C ausgeht. Für die Raumlufffeuchte gilt dabei die Grenze von 50 % r.F. In den nachfolgenden Tabellen sind darüber hinaus die Grenzen der Raumlufffeuchte bei abweichenden Lufttemperaturen angegeben.

Raumlufftemp.	18 °C	19 °C	20 °C	21 °C	22 °C	23 °C	24 °C	25 °C
Max. r.F.	51%	50%	50%	49%	48%	47%	47%	46%

Tabelle 1: Maximale Raumlufffeuchte zur Vermeidung von Schimmelpilz unter den stationären Randbedingungen nach E DIN EN ISO 13788 bei einer Außenlufttemperatur von $- 5 \text{ °C}$



Raumlufttemp.	18 °C	19 °C	20 °C	21 °C	22 °C	23 °C	24 °C	25 °C
Max. r.F.	46%	46%	45%	44%	44%	43%	42%	42%

Tabelle 2: Maximale Raumlufffeuchte zur Vermeidung von Schimmelpilz unter den stationären Randbedingungen nach E DIN EN ISO 13788 bei einer Außenlufttemperatur von – 10 °C

Im Protokollband 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser [Feist 2003] wurden darüber hinaus die maximalen Raumlufffeuchten unter den Normrandbedingungen (-5/20°C) für unterschiedliche Wärmedämmstandards der Gebäudehülle untersucht, vom ungedämmten Altbau bis zum Passivhausniveau mit 200 mm Dämmstärke auf dem Bestandsmauerwerk. Die jeweiligen Grenzwerte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst, wobei die Temperaturen am Glasrand vernachlässigt werden.

Qualität der Gebäudehülle	Max. r. F	f_{Rsi}
Ungedämmter Altbau	38 %	0,54
Konventionelle Dämmung bei der Modernisierung	45 %	0,64
Nachträgliche Dämmung auf das Niveau Passivhaus geeigneter Komponenten (Außenwand 200 mm Dämmdicke)	62 %	0,84

Tabelle 3: Maximale Raumlufffeuchte zur Vermeidung von Schimmelpilz unter den stationären Randbedingungen nach E DIN EN ISO 13788 (-5/20 °C) und daraus berechnete f_{Rsi} -Werte in Abhängigkeit vom Baustandard der Gebäudehülle

Die angegebenen maximalen relativen Raumlufffeuchten hängen demnach von der Außenlufttemperatur, der Raumlufftemperatur und vom Baustandard der Gebäudehülle ab. Möchte man die Einhaltung der Maximalwerte anlagentechnisch realisieren, so müsste eine entsprechende Feuchteregelung über alle diese Randbedingungen als Eingangsdaten verfügen. Technisch wäre das über einen Außentempersensor sowie eine Parametereingabe für den Baustandard der Gebäudehülle bei der Inbetriebnahme des Gerätes zwar theoretisch realisierbar, in der Praxis sind solche komplexen Verfahren bislang jedoch nicht üblich. Meist werden fixe Obergrenzen definiert. Diese würde für den Altbau sogar unter 40 % r.F., für den Neubau nach E DIN EN ISO 13788 im Bereich von 40-50 % r.F. angesetzt werden müssen, um Schimmelpilzbildung in der Heizperiode sicher vermeiden zu können. Im Passivhaus (bzw. mit PH-Komponenten modernisierten Altbau) wären dagegen über 60 % zulässig.

Bei diesen Betrachtungen wurden lediglich lineare Wärmebrücken mit Ausnahme des Fensterrandverbundes einbezogen. Am Fenster-Randverbund eines Passivhaus-Fensters beträgt f_{Rsi} dagegen typischerweise 0,7 bis 0,75. Ähnliche Werte können bei Altbauten an auskragenden Betonplatten oder in Ecken bei aufgehenden



Außenwänden hinter Möbeln vorliegen, selbst wenn das Gebäude mit Passivhaus-Komponenten modernisiert wurde (vgl. [Feist 2003a]).

Im Folgenden wird daher für einen sicher schadensfreien Betrieb des Gebäudes verlangt, dass die Wasseraktivität an der Innenoberfläche eines Außenbauteils mit $f_{Rsi} = 0,75$ im gleitenden Dreitagesmittel einen Wert von 80 % nicht überschreitet.

Bezüglich der unteren Grenze der zuträglichen Raumlufffeuchte lässt sich zwar vor dem Hintergrund der vorliegenden Literaturrecherche noch keine definitive Aussage ableiten, es verdichten sich allerdings die Hinweise, dass eine dauerhafte Unterschreitung der 30 % r.F in der Summe der Vor- bzw. Nachteile aus gesundheitlicher Sicht als unzutraglich einzustufen ist. Kürzere Perioden der Unterschreitung können dagegen bezüglich einer Unterbrechung des Milbenwachstums sogar förderlich sein.

Im Überblick des derzeitigen Standes der Wissenschaft auf diesem Gebiet entspricht die Empfehlung für die Untergrenze der Raumlufffeuchte damit im Wesentlichen den Aussagen der DIN und SIA, welche die 30 % r.F. bei 20 °C als Untergrenze mit der Zulässigkeit kurzfristiger Unterschreitung empfehlen. Des weiteren wird auch die Empfehlung nach ASHRAE Fundamentals Handbook 8.12, für bewohnte Räume die Taupunkttemperatur von 2 °C nicht zu unterschreiten, wissenschaftlich gestützt.

Im Folgenden wird für gesundheitliche Zuträglichkeit eine minimale relative Raumlufffeuchte von 30 % verlangt, wobei kurzfristige Unterschreitungen zulässig sind.



3 Passive Feuchterückgewinnung in der Lüftungstechnik

In der Wohnungslüftung im europäischen Raum wird passive Feuchterückgewinnung erst seit relativ kurzer Zeit diskutiert. Die grundlegenden Technologien sind bereits seit längerer Zeit bekannt, sie werden bislang vor allem in den USA mit ihren feucht-heißen Klimata eingesetzt. Dabei gibt es zwei grundlegende Funktionsprinzipien, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden.

Das Ausmaß, in dem ein Wärmerückgewinnungsgerät auch Feuchte zurückgewinnen kann, wird in diesem Bericht in Anlehnung an prEN 13141-7:2007 durch das Feuchteverhältnis

$$\eta_x = \frac{x_{zu} - x_{au}}{x_{ab} - x_{au}}$$

charakterisiert. Dieser Wert ist identisch mit der Rückfeuchtzahl Ψ_2 nach VDI 2071.

Diese Definition ist analog zum Temperaturverhältnis bei der sensiblen Wärmerückgewinnung. Sie geht vereinfachend davon aus, dass keine Leckagen und keine Disbalancen im Lüftungsgerät vorhanden sind.

3.1 Regeneratoren (Rotationswärmeübertrager, zyklischer Regenerator)

Häufig werden für die Wärmerückgewinnung zyklisch im Wechsel von Außenluft und Abluft durchströmte Speichermedien eingesetzt. Dieses Prinzip kann sowohl mit rotierenden Speichermedien (Rotationswärmeübertrager, kurz Rotor) als auch mit feststehenden, durch Klappen wechselweise angesteuerten Speichermedien realisiert werden. Nachfolgend wird stellvertretend für diese Systeme nur der Rotor betrachtet.

In Regeneratoren kann neben der Wärme- auch eine Feuchteübertragung stattfinden. Die Charakteristik der Feuchteübertragung kann für Rotoren gut anhand des Kondensationspotentials κ beschrieben werden. Dabei handelt es sich um die Differenz zwischen der Feuchte der Warmluft und der Sättigungsfeuchte der Kaltluft, d.h. die bei Abkühlung der Warmluft auf die Kaltlufttemperatur auskondensierende Wassermenge:

$$\kappa = x_{ab} - x_{s,au}$$

Anhand der Oberfläche des Speichermediums lassen sich drei Typen von Rotoren unterscheiden (Abbildung 1):



- Kondensationsrotor: Hier wird beispielsweise Aluminium als Speichermedium verwendet. Zur Feuchterückgewinnung kommt es nur, wenn flüssiges Wasser aus der Abluft auskondensiert (Kondensationspotenzial $\kappa > 0$) und durch die Außenluft wieder aufgenommen wird.
- Hygroskopischer Rotor: Durch chemische Behandlung, z.B. Beizen, wird eine kapillare Oberflächenstruktur der metallischen Speichermasse erzeugt. Die dadurch erzielte zusätzliche Feuchteübertragung ist jedoch relativ gering.
- Sorptionsrotor: Das Rotormaterial erhält eine hygroskopische Beschichtung, z.B. aus Lithiumchlorid (keimtötend) auf einer Zellulosematrix. Üblich sind auch Beschichtungen aus Molekularsieb, Kieselgel oder Anhydrid; diese Materialien nehmen aber weniger Feuchte auf. Mit Sorptionsrotoren lässt sich die höchste Feuchterückgewinnung aller Rotoren erzielen. Das Feuchteverhältnis hängt nur noch in geringem Maße vom Kondensationspotenzial ab.

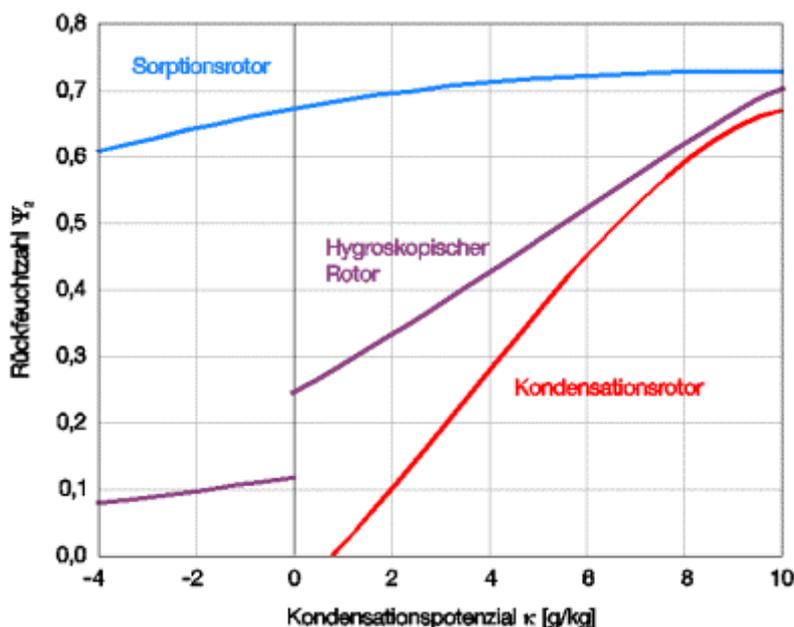


Abbildung 1: Rückfeuchtzahl (Feuchteverhältnis) als Funktion des Kondensationspotenzials (aus [Genath 2008])

Ein Vorteil von Rotoren besteht darin, dass sie erst bei – verglichen mit konventionellen Plattenwärmeübertragern – niedrigen Außentemperaturen einfrieren können, da in den kritischen Situationen meist eine gewisse Entfeuchtung der Abluft stattfindet. Besonders bei Sorptionsrotoren mit hohem Feuchteverhältnis kann die Einfriergrenztemperatur je nach Abluftfeuchte bei -20 °C liegen.

Durch Änderung der Rotordrehzahl lässt sich die Wärme- und Feuchteübertragung in Rotoren in gewissem Umfang beeinflussen.



3.2 Plattenwärmeübertrager mit Membran

Auch mit Plattenwärmeübertragern kann Feuchte aus der Abluft zurückgewonnen werden. Der Wärmeübertrager wird zu diesem Zweck aus einer semipermeablen Membran hergestellt, sodass Wassermoleküle von der Abluft- auf die Außenluftseite gelangen können, ohne dass es darüberhinaus zu bedeutender Stoffübertragung kommt. Das Temperatur- und Feuchteverhältnis von Plattenwärmeübertragern ist nicht regelbar, vielfach hängt es nur wenig von den Eintrittstemperaturen und -feuchten ab.



4 Gekoppelte thermische und hygrische Simulation

4.1 Simulationsprogramm

Die nachfolgend dokumentierten Simulationsrechnungen wurden mit dem Gebäudesimulationsprogramm DYNBIL durchgeführt. Detaillierte Vergleiche der Ergebnisse von DYNBIL-Berechnungen mit Messungen in gebauten Projekten zeigten sehr gute Übereinstimmung. Das Programm hat sich seit vielen Jahren in der Projektierung und thermischen Untersuchung von Gebäuden bewährt. Es wird durch die folgenden Eigenschaften charakterisiert [Feist 1999]:

- Wärmeleitung und Wärmespeicherung: Instationäre Wärmeströme (Mehrkapazitäten-Netzwerkmodell) inkl. eindimensionaler Ersatzdarstellungen für Wärmebrücken
- Konvektiver Wärmeübergang: Temperaturabhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangs an Oberflächen im Raum, Temperaturabhängigkeit des konvektiven Wärmeübergangs im ebenen Spalt (Scheibenzwischenräume)
- Langwelliger Strahlungsaustausch: Approximation des Strahlungswärmeaustausches im Raum durch das Zweisternmodell bei sauberer Trennung zwischen Strahlung und Konvektion
- Kurzwellige Strahlung: Einfluß des Einfallswinkels für den Strahlungsdurchgang am Fenster, Verschattung der kurzwelligen Strahlung
- Wärmeübergang an Außenoberflächen: konvektiver Wärmeübergang windabhängig, langwelliger Strahlungsaustausch an Außenoberflächen mit der Umgebung und Abstrahlung in den Himmel, atmosphärische Gegenstrahlung
- Interne Wärmequellen: Berücksichtigung unterschiedlicher Wärmetransportmechanismen
- Bewertung des Raumklimas mit Hilfe von operativen Temperaturen
- Feuchtebilanz: Simultane Berechnung von Wärme- und Feuchtetransport und -speicherung in Anlehnung an Algorithmen aus [Künzel 1994].



4.2 Simulationsmodell

4.2.1 Gebäudemodell

Die Simulationsrechnungen werden anhand eines zweigeschossigen Reihenendhauses durchgeführt. Dieser Gebäudetyp wurde aufgrund seiner durchschnittlichen Kompaktheit ausgewählt: er stellt einen guten Kompromiss zwischen einem Einfamilienhaus mit großem A/V-Verhältnis einerseits und einem kompakten Mehrfamilienhaus bzw. Reihenmittelhaus andererseits dar.

Die Geometrie des Beispielgebäudes basiert auf einem realen Reihenhaus, das in Hannover-Kronsberg in einer der ersten Passivhaus-Siedlungen errichtet wurde. An einem existierenden Simulationsmodell, das während der Planungsphase der Häuser am Kronsberg entwickelt wurde (Schnieders 1998]), wurden einige Modifikationen vorgenommen, um typische Gebäude besser abzubilden. So besitzt beispielsweise das ursprüngliche Reihenhaus am Kronsberg keinen Keller und ist in Mischbauweise errichtet. Das Beispielgebäude für die vorliegende Studie besitzt einen (von außen zugänglichen) Keller und weist entweder eine reine Massiv- oder eine reine Leichtbauweise auf.

In Abbildung 3 bis Abbildung 5 sind Ansichten, Grundrisse und Schnitte des Gebäudes dargestellt. Das Erdgeschoss besitzt einen weitgehend offenen Grundriss, hier befinden sich ein Wohn-, ein Koch- und ein Essbereich. Im Obergeschoss sind ein Elternschlafzimmer, zwei Kinderzimmer und ein größeres Bad vorhanden. Der Keller ist unbeheizt, die Kellerräume werden als gemeinsame thermische Zone modelliert.

Das Beispielgebäude ist südorientiert, die Giebelwand liegt auf der Westseite, das angrenzende Reihenhaus auf der Ostseite. Um die Wärmeverluste an den Keller zu minimieren, gibt es keinen direkten Kellerabgang aus dem Wohnbereich; der Keller ist nur von außen zugänglich.

Für die Simulationen wurde das Testreferenzjahr 7 (nördliche und westliche Mittelgebirge) mit der Referenzstation Kassel verwendet.



Abbildung 2: Foto des Reihenendhauses in Hannover-Kronsberg

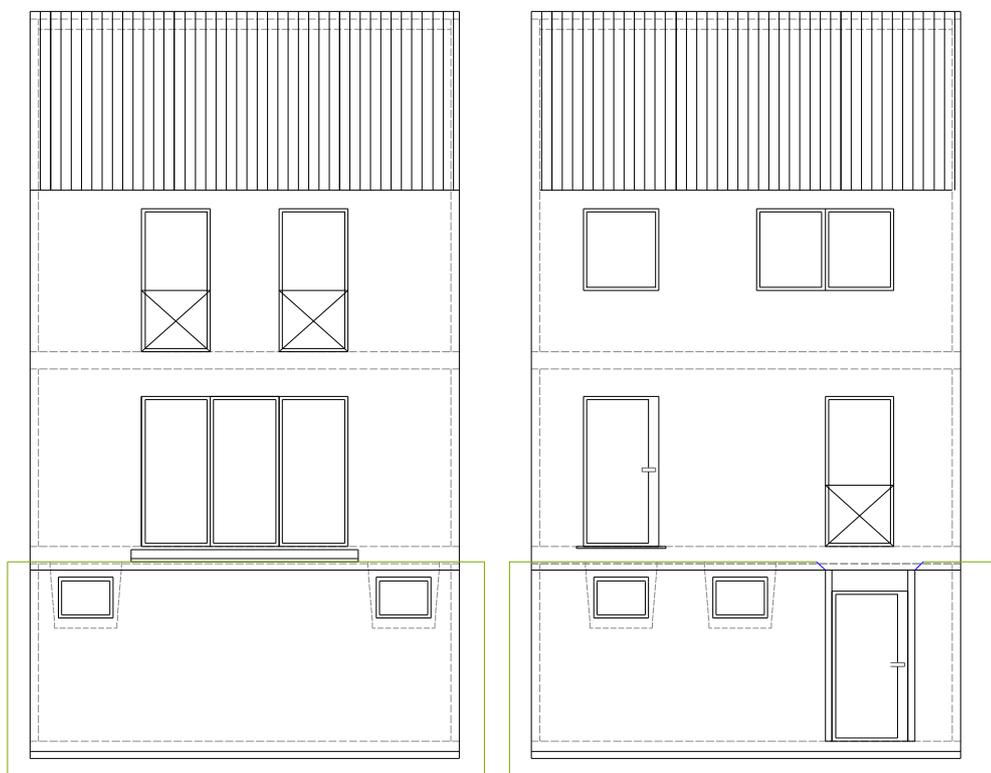


Abbildung 3: Ansicht von Süden (links) und Norden (rechts)

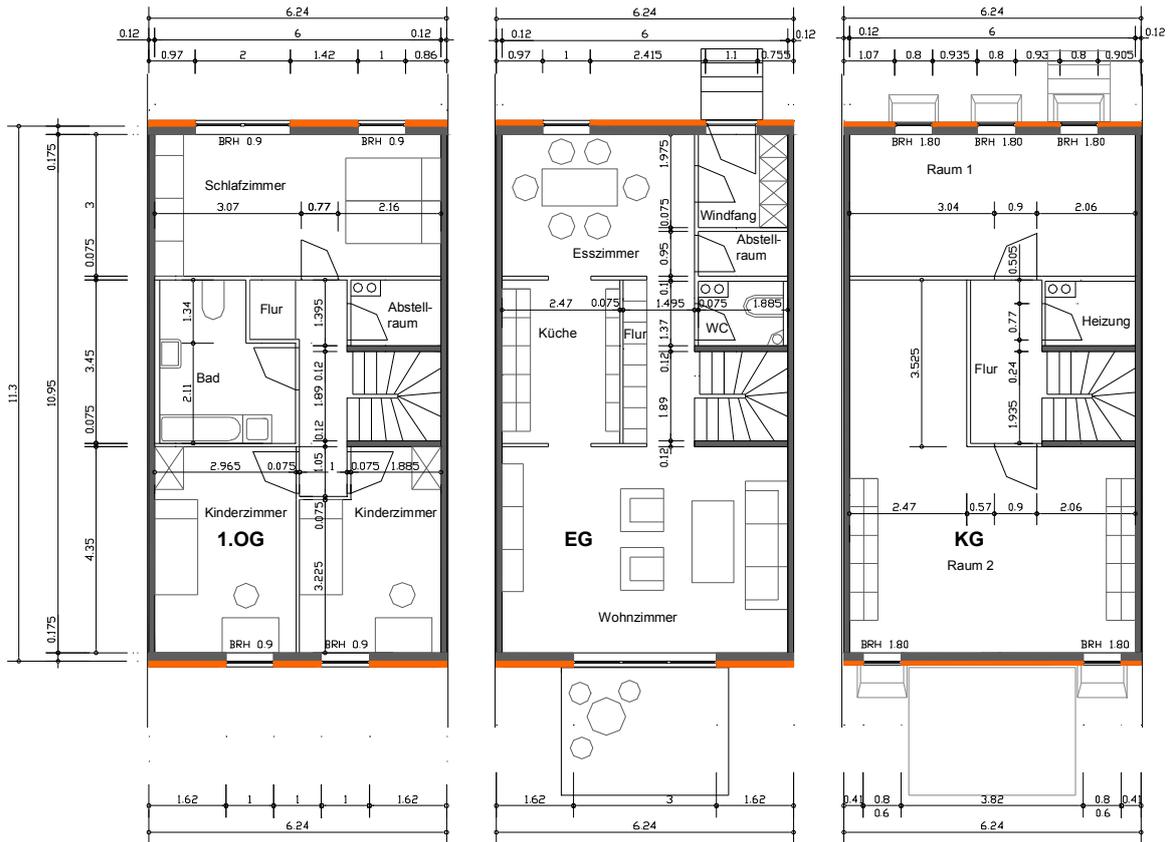


Abbildung 4: Grundrisse

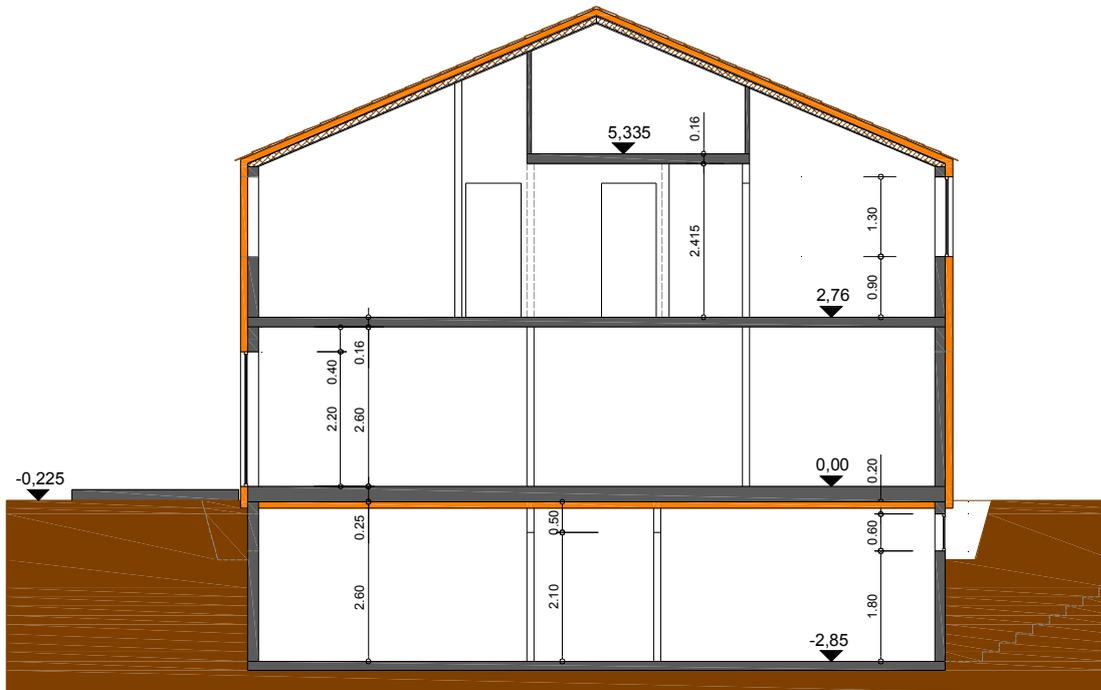


Abbildung 5: Schnitt (Ansicht von Osten)

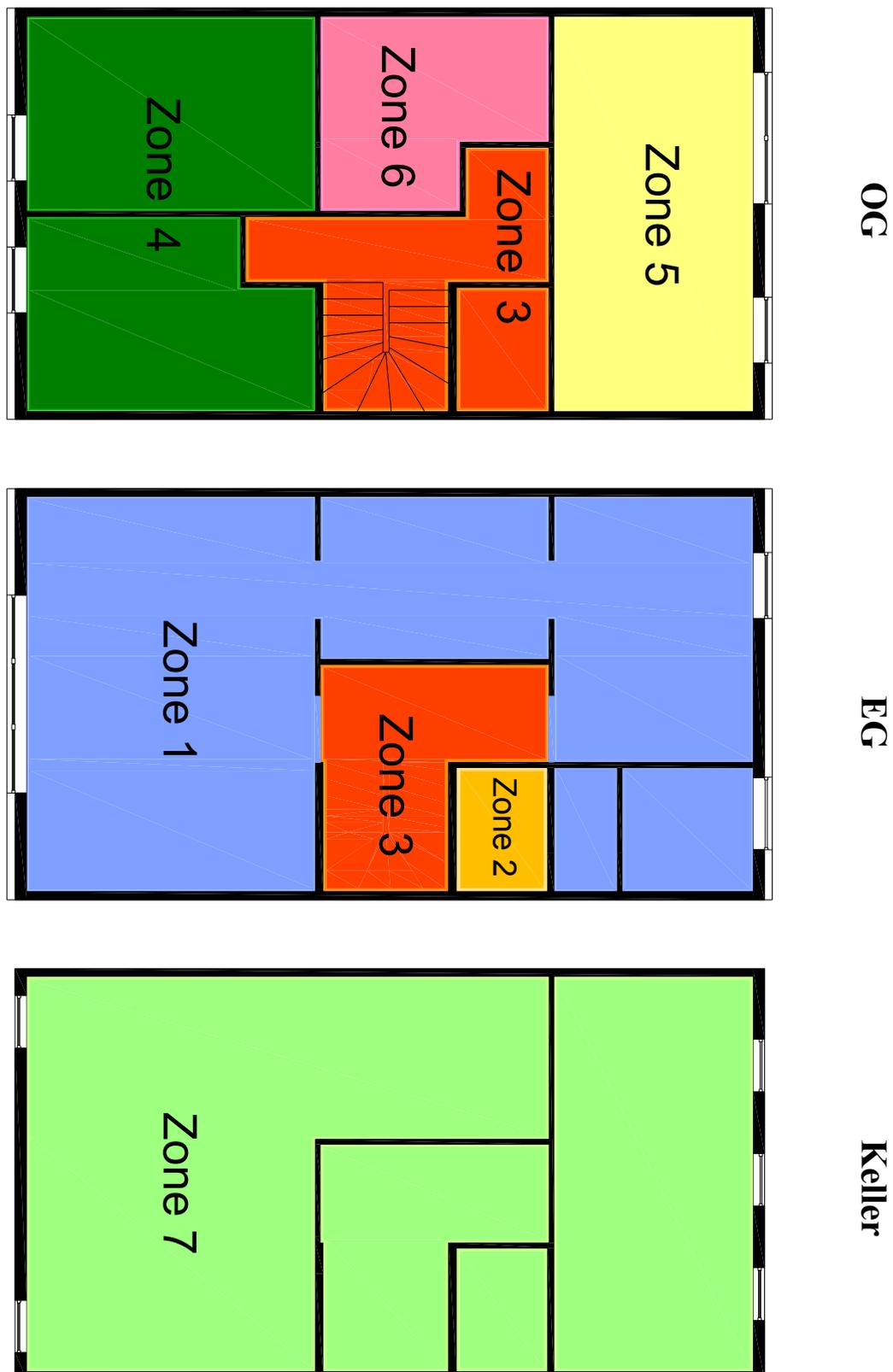


Abbildung 6: Zonierung des Simulationsmodells. Zone 8 (nicht dargestellt) ist der Dachraum mit der Lüftungszentrale



4.2.2 Bauteile

Das Referenzgebäude ist ein Massivbau. Decken, Bodenplatte und Kellerwände bestehen aus Beton, die Außen- und Innenwände aus Vollziegelmauerwerk mit 115 mm Stärke und außenliegender Dämmung. Das Dach ist als konventionelles geneigtes Dach mit hölzernen Dachsparren ausgeführt.

Eine detaillierte Auflistung der verwendeten opaken Bauteile findet sich in Anhang A.

Die Fenster besitzen Passivhaus-Fensterrahmen mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung. Der mittlere U-Wert beträgt $0,81 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, der g-Wert 0,5.

4.2.3 Lüftung

Das Gebäude besitzt eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärme- und ggf. Feuchterückgewinnung. Der Wärmebereitstellungsgrad (vgl. zur Definition 4.2.7) wird im Regelfall als konstant betrachtet, das Feuchteverhältnis wird in den Simulationsrechnungen zwischen 0 und 90 % variiert.

Die von der Lüftungsanlage transportierten Luftmassenströme orientieren sich am hygienisch Notwendigen bei Standardbelegung. Die folgende Tabelle enthält die entsprechenden Volumenströme.

Lüftungsanlage		
Zone Nr.	Zuluft [m^3/h]	Abluft [m^3/h]
1	47	39.2
2	-	39.1
3	-	-
4	30.5	-
5	40	-
6	-	39.2
7	-	-
8	5	5
Summe	122.5	122.5

Die Lüftungsanlage läuft das ganze Jahr über im Wärmerückgewinnungs-Modus (Ausnahme: Die Berechnungen zum außentemperaturabhängig gesteuerten Rotor in Abschnitt 5.2.4). Bei operativen Raumtemperaturen über $22 \text{ }^\circ\text{C}$ werden zusätzlich die Fenster gekippt, sofern die Außentemperatur niedriger als die jeweilige Raumtemperatur ist. Das führt bei einer Temperaturdifferenz von 1 K zu einem zusätzlichen Luftvolumenstrom von 145 Kubikmeter pro Stunde für das ganze Gebäude (einseitige Lüftung), bei höheren Temperaturdifferenzen liegt der Wert entsprechend höher.

Zusätzlich zur mechanischen Lüftung tritt Infiltration auf, die sich auf die außenliegenden Zonen verteilt. Aufgrund der ausgezeichneten Luftdichtheit beträgt der Infiltrationsvolumenstrom $7 \text{ m}^3/\text{h}$, entsprechend einem n_{50} -Wert von $0,3 \text{ h}^{-1}$.



Die Innentüren werden im Referenzfall nur sporadisch geöffnet. Es wird angenommen, dass zwischen dem zentralen Treppenhaus/Flur und den angrenzenden Räumen (Zone 1, 4, 5, 6) zusätzlich zur durch die Lüftungsanlage transportierten Luftmenge durchschnittlich $50 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgetauscht werden.

4.2.4 Raumheizung

Die operative Temperatur in den Wohnräumen (Zone 1 bis 6) wird durch ein ideales, raumweises Luftheizsystem auf dem Sollwert gehalten. Die Heizungsregelung berücksichtigt dabei im Regelfall den Einfluss der Luftfeuchte auf die thermische Behaglichkeit: Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, kann die Reduktion der Raumsolltemperatur bei höheren Feuchten gut durch eine lineare Funktion der absoluten Feuchte approximiert werden.

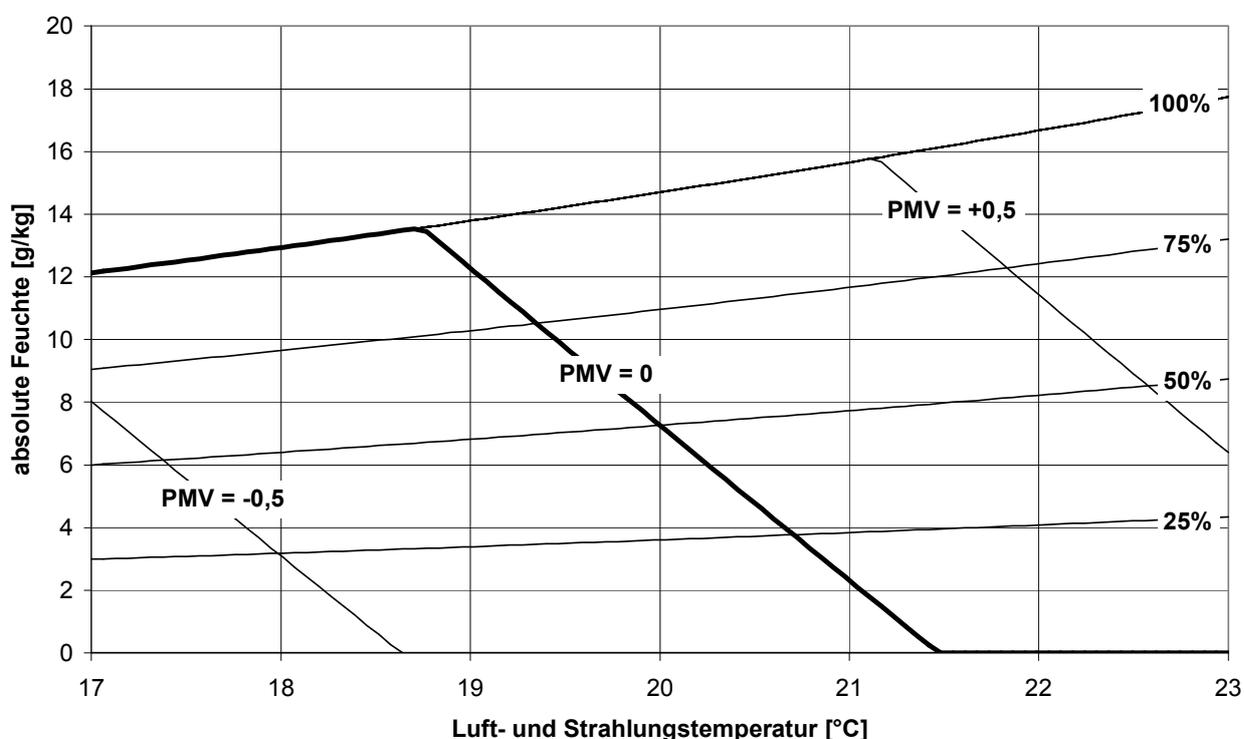


Abbildung 7: Wechselwirkung von operativer Temperatur und Luftfeuchte: Mit wachsender Luftfeuchte sinkt die für den gleichen thermischen Komfort erforderliche Raumtemperatur. Berechnungsgrundlagen: 1,2 met, 1,32 clo, 0,15 m/s.

Es ist anzumerken, dass es sich hier um ein idealisiertes Heizsystem handelt. Reale Heizsysteme weisen ein anderes Regelverhalten auf. Diese Tatsache und die allgemeinen Schwankungen der Temperaturanforderung in bewohnten Gebäuden erschweren den experimentellen Nachweis für diesen Feuchteinfluss. Man wird aber annehmen dürfen, dass die Nutzer das Heizsystem so regeln, dass im Mittel die gewünschte Solltemperatur – unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses – erreicht wird (vgl. hierzu auch [Schnieders 2004]). Das hier beschriebene Vorgehen



erlaubt es am ehesten, die Effekte der Feuchterückgewinnung von anderen Einflüssen zu isolieren.

In jeder Zone (außer Zone 2, dem gefangenen Bad) befindet sich ein Außenbauteil mit geringer Wärmekapazität, vernachlässigbarer Fläche und einem U-Wert von $2,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, entsprechend einem f_{Rsi} von $0,74$. Die Wasseraktivität dieses Bauteils an der Innenoberfläche wird als Kriterium für möglichen Tauwasserausfall bzw. Schimmelrisiko verwendet.

Zusätzlich zur Beheizung ist auch eine Befeuchtung der Räume möglich. Diese erfolgt ebenfalls ideal und raumweise; insbesondere beeinflusst sie nicht unmittelbar die Lufttemperatur, wie es beispielsweise ein Dampfluftbefeuchter tun würde.

4.2.5 Interne Wärmegewinne und Feuchtelasten

Die internen Gewinne haben einen bedeutenden Einfluss auf die Energiebilanz eines Passivhauses. Sie sind meist ähnlich groß wie der verbleibende Heizwärmebedarf, unter bestimmten Bedingungen können sie sogar wesentlich größer werden. Aus diesem Grund sind im Passivhaus Projektierungs Paket [PHPP 2007] Rechenverfahren zur Ermittlung der internen Gewinne enthalten. Auf diesen Verfahren bauen die nachfolgenden Betrachtungen auf.

Die internen Gewinne werden im PHPP standardmäßig mit einem Wert von $2,1 \text{ W}$ pro Quadratmeter Wohnfläche angesetzt, weniger als in den meisten anderen Rechenverfahren. Das hat im Wesentlichen folgende Gründe:

- Ablaufverluste, d.h. Wärmeverluste aufgrund von ablaufendem warmem Wasser, werden berücksichtigt.
- Verdunstungsverluste, d.h. die durch Verdunstung von Wasser z.B. aus Blumentöpfen und Handtüchern entstehenden Verluste an sensibler Wärme, werden berücksichtigt.
- Wärmeverluste ans Kaltwasser, z.B. durch die Erwärmung von Wasser in Leitungen oder WC-Spülkästen, werden berücksichtigt.

Genauere Angaben hierzu finden sich in [Feist 1994].

Die detaillierte Bilanzierung der internen Wärmegewinne im PHPP lässt sich leicht um eine Feuchtebilanz der beteiligten Prozesse erweitern, so dass die internen Wärme- und Feuchtelasten als Eingangsgrößen für die Simulation zur Verfügung stehen. Die Feuchtelasten, die sich so ergeben, sind ähnlich wie die internen Wärmegewinne deutlich niedriger als Ansätze aus älteren Literaturstellen, insbesondere weil früher Feuchtequellen etwa aus dem Kochen von Kleidung oder dem Einkochen von Lebensmitteln berücksichtigt wurden, die heute keine bedeutende



Rolle mehr spielen. Zu beachten ist auch, dass die Verdunstungsleistung von Pflanzen in geschlossenen Räumen weit geringer ist als die häufig angegebenen Werte für das Freiland.

Nachfolgend werden drei verschiedene Szenarien für die Nutzung des Gebäudes betrachtet: eine typische Nutzung, eine Nutzung mit sehr geringen Feuchtelasten und ein Fall mit stark erhöhten Feuchtelasten. Diese Szenarien führen jeweils auch zu bedeutenden Unterschieden in den internen Wärmegewinnen und damit im Heizwärmebedarf.

- Im Standardfall wird eine Belegungsdichte von 35 m² pro Person angenommen, d.h. das Gebäude wird rechnerisch von 3,5 Personen bewohnt. Die Personen halten sich durchschnittlich 55% der Zeit im Gebäude auf. Jede Person verdunstet bei Anwesenheit 64 g/h im Winter (Mitte Oktober bis Mitte April) und 150 g/h im Sommer (Rest des Jahres). Wäsche wird außerhalb der thermischen Hülle getrocknet, so dass dadurch weder die Wärme- noch die Feuchtequellen in den Wohnräumen beeinflusst werden. Die Standard-Feuchteproduktion durch sonstige Quellen beträgt dem PHPP entsprechend 0,85 l pro Person und Tag. Sie wird in drei Teile aufgeteilt: Ein Drittel wird im Bad (Zone 6) morgens und abends nach Benutzung freigesetzt. Das zweite Drittel wird durch Pflanzen verdunstet, die gleichmäßig über das Gebäude verteilt sind, aber in aller Regel nur tagsüber Wasser verdunsten (vgl. [Hartmann 2001], [Schneider 2003]). Dieser Anteil wird im Sommer verdoppelt, um die Abhängigkeit der Verdunstung von Temperatur und Strahlung zu modellieren. Das verbleibende Drittel wird gleichmäßig über Zeit und Raum in den Wohnräumen verteilt. Die gesamte Feuchteproduktion beläuft sich im Winter auf 6,5 l/d, im Sommer auf 11,5 l/d. Die internen Wärmegewinne im Winter betragen in diesem Fall 2,1 W/m². Im Sommer werden sie mit 1,4 W/m² niedriger angesetzt, da die höheren Raumtemperaturen geringere Wärmeströme aus dem Warmwasser- bzw. höhere Wärmeströme ans Kaltwassernetz zur Folge haben und eine stärkere Verdunstung aus Zimmerpflanzen angesetzt wird.
- Im Fall mit niedrigen Feuchtequellen wird die Personenbelegung auf 2 Personen reduziert. Ferner wird die personengebundene Verdunstung auf 40% des Standardwertes reduziert. Wäsche wird im Kondensationstrockner, ohne Feuchteabgabe in der Wohnung, getrocknet. Die gesamte Feuchteproduktion beläuft sich damit im Winter auf 2,7 l/d, im Sommer auf 5,2 l/d. Die internen Wärmegewinne im Winter betragen in diesem Fall 1,1 W/m², im Sommer 0,8 W/m².
- Im Fall mit hohen Feuchtequellen steigt die Personenbelegung auf 5 Personen. Zusätzlich wird die Wäsche auf einem Wäscheständer im Wohnzimmer



(Zone 1) getrocknet. Für das Warmwassersystem wird eine etwas geringere Effizienz angenommen: Es existiert nun eine Zirkulationsleitung, und der Verlust des Warmwasserspeichers ist höher. Die gesamte Feuchteproduktion beläuft sich damit im Winter auf 11,4 l/d, im Sommer auf 18,5 l/d. Die internen Wärmegewinne im Winter betragen in diesem Fall 2,8 W/m², im Sommer 1,8 W/m².

Die genaue räumliche und zeitliche Verteilung der Wärme- und Feuchtequellen ist für den Winterfall in Anhang B dokumentiert.

Die hier verwendeten Ansätze decken sich in etwa mit den Ergebnissen neuerer Untersuchungen, insbesondere mit [Hartmann 2001] (vgl. Abbildung 8) und [Moosberger 2007] (dort werden 1,6 l/d für eine Person, 3,0 l/d für zwei Personen und 5,8 l/d für 4 Personen angesetzt).

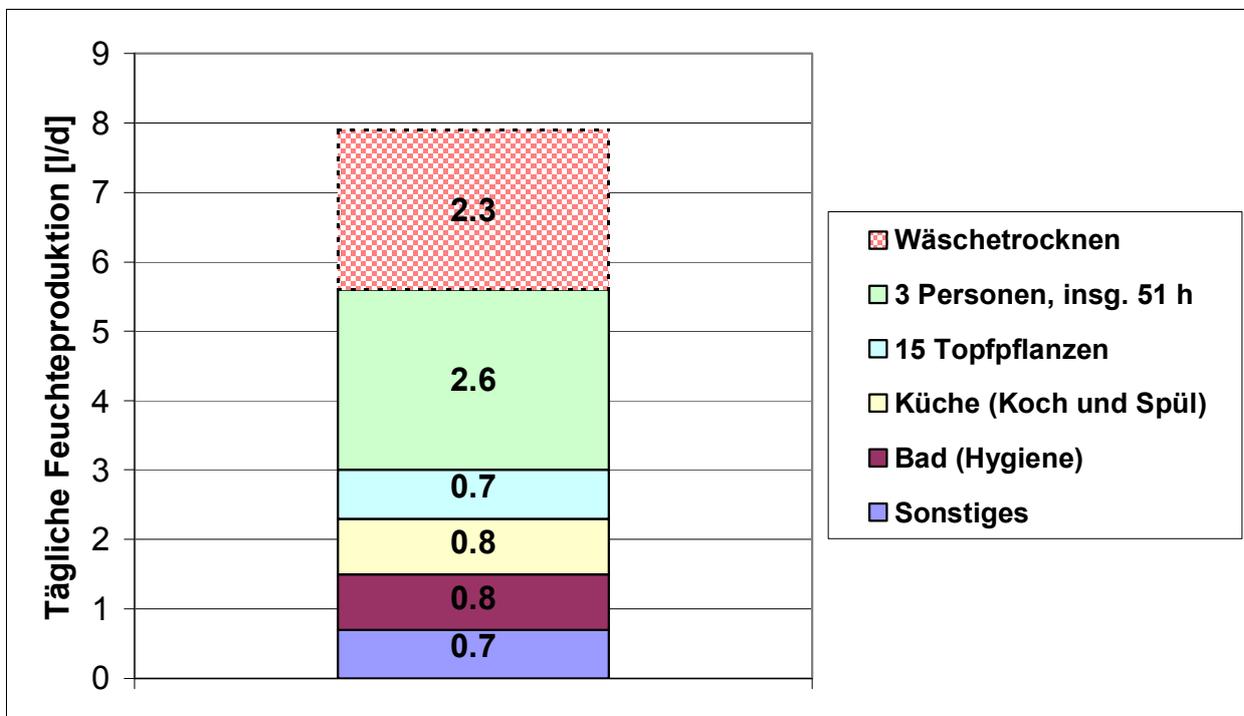


Abbildung 8: Typische tägliche Feuchteproduktion für eine dreiköpfige Familie nach [Hartmann 2001].



4.2.6 Wechselwirkung zwischen Raumlufffeuchte und Feuchtelasten

Die Feuchteproduktion im Gebäude ist nicht unabhängig von der Raumlufffeuchte. Zu berücksichtigen sind insbesondere drei Auswirkungen einer erhöhten Raumlufffeuchte:

- weniger Verdunstung aus Möbeln/Bauteilen (in DYNBIL bereits enthalten)
- reduzierte Verdunstung von Personen
- reduzierte Verdunstung aus z.B. Pflanzen, Handtüchern, nassen Jacken

Die Feuchteabgabe von Personen erfolgt über Atmung, Diffusion durch die Haut und Schwitzen. Geht man wie hier davon aus, dass Personen in Wohnräumen im Winter nicht in bedeutendem Umfang schwitzen, bleiben Atmung und Diffusion, die beide vom Wasserdampfdruck der Umgebungsluft abhängen.

Für die Quantifizierung kann man sich am PMV-Modell von Fanger orientieren. Wenn die Raumtemperatur bei verschiedenen Raumlufffeuchten jeweils so angepasst wird, dass der gleiche thermische Komfort erreicht wird, ergibt sich zwangsläufig die gleiche Wärmeabgabe des Menschen. Es verschieben sich jedoch die latenten und sensiblen Anteile (vgl. Abbildung 9).

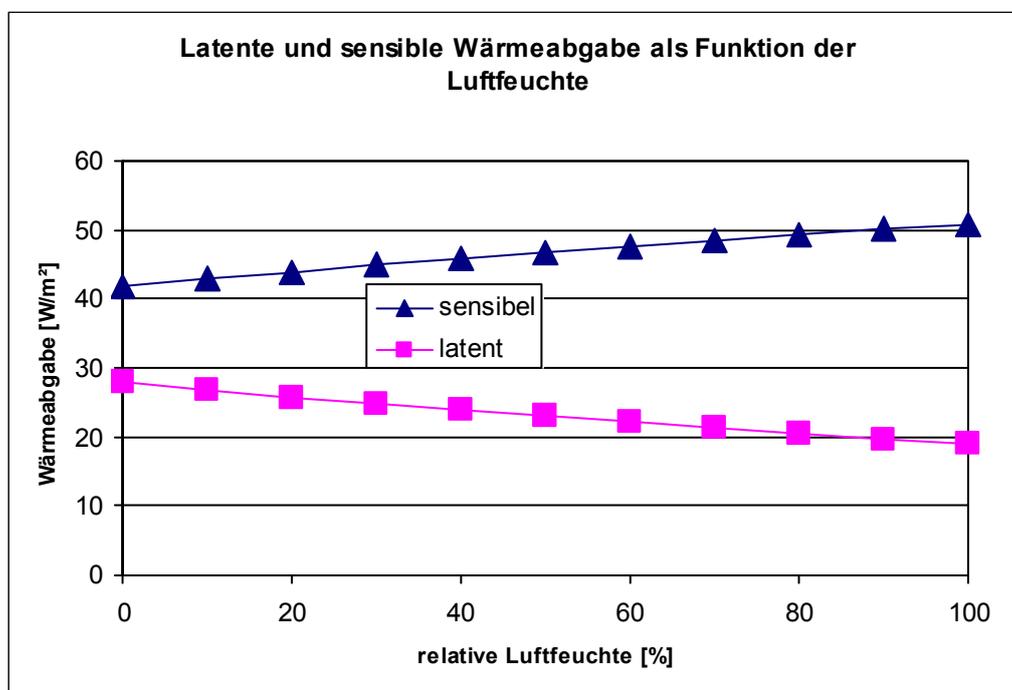


Abbildung 9: Wärmeabgabe des Menschen in Watt pro Quadratmeter Hautoberfläche. Bei zunehmender Luftfeuchte und gleichem Komfortempfinden verschiebt sich das Verhältnis von latenter und sensibler Wärmeabgabe. Annahmen: 1,2 met, 1,4 clo, $v_{\text{Luft}} = 0,15$ m/s, $PMV = 0$ (d.h. operative Raumtemperaturen zwischen 18,3 und 21,0 °C).



Dieser Effekt wurde abgebildet, indem die sensible und latente Wärmeabgabe der Personen als Funktion der absoluten Feuchte im Raum behandelt werden: Für einen Dampfdruck, der 25% relativer Feuchte entspricht, gelten die in Abschnitt 4.2.5 angesetzten Wärme- und Feuchtegewinne durch Personen. Bei höheren bzw. niedrigeren Dampfdrücken ändern sich beide Werte linear mit dem Dampfdruck, mit einem Gradienten entsprechend Abbildung 9.

Die „sonstige“ Verdunstung setzt sich aus unterschiedlichen Anteilen zusammen. Einige sind in der Massenbilanz weitestgehend unabhängig von der Raumlufffeuchte, z.B. die aus Handtüchern oder nassen Kleidungsstücken verdunstete Feuchtigkeit. Höhere Raumlufffeuchte wirkt sich hier lediglich auf die zeitliche Verteilung der Verdunstung aus. Für diesen Typ von Feuchtequellen wird daher vereinfachend angenommen, dass keine Wechselwirkung von Raumlufffeuchte und Verdunstungsleistung besteht.

Bei Pflanzen hängt die Verdunstung gewöhnlich mit der Öffnung der Stomata zwecks CO_2 -Aufnahme und Photosynthese zusammen; die Spaltöffnungsweite wiederum wird in Innenräumen im Winter vorwiegend durch die Belichtung bestimmt. Daher wird hier näherungsweise eine Proportionalität von Verdunstung und Dampfdruckdifferenz angesetzt (vgl. hierzu insbesondere [Schneider 2003]). Wie bei den Personen entspricht die Verdunstungsleistung der Pflanzen im Referenzfall 25% relativer Luftfeuchte.

4.2.7 Simulationsmodelle für Rotor und Wärmeübertrager mit Membran

Die für die Lüftungsgeräte verwendeten Modelle sollen dem Zweck dienen, die prinzipiellen Auswirkungen von Feuchterückgewinnung auf die Energiebilanz zu ermitteln. Die Abbildung gerätespezifischer Abhängigkeiten von z.B. dem Volumenstrom, den Temperaturen oder Luftfeuchten ist daher zunächst nicht sinnvoll; sie würde lediglich die interessierenden Zusammenhänge verdecken. Gleiches gilt für die in realen Lüftungsgeräten auftretenden Leckagen und parasitären Wärmeströme. Für die überwiegende Mehrzahl der Simulationen werden daher, unabhängig von der Funktionsweise des Gerätes, idealisierte Wärmeübertrager mit folgenden Eigenschaften verwendet:

- Die Geräte sind perfekt dicht, es gibt keine Leckagen zwischen den Luftströmen oder nach außen.
- Die Luftmassenströme von Außen- und Fortluft sind perfekt balanciert.
- Die Geräte sind perfekt gedämmt, mit dem Aufstellraum wird keine Wärme ausgetauscht.



- Es gibt keine kalten Leitungen innerhalb der thermischen Hülle bzw. warme Leitungen außerhalb der thermischen Hülle.
- Das zuluftseitig gemessene, trockene Temperaturverhältnis $(T_{zu}-T_{au})/(T_{ab}-T_{au})$ der Geräte – im Gegensatz zur üblichen Definition hier ohne Berücksichtigung der Abwärme der Ventilatoren angegeben – beträgt 85 %.
- Die Geräte besitzen je einen Ventilator in der Außen- und Fortluft mit zusammen 49 W Leistung, entsprechend einer spezifischen Leistungsaufnahme im Normalbetrieb von $0,4 \text{ Wh/m}^3$. Aufgrund der guten Wärmerückgewinnung wirkt sich die Ventilatorabwärme nur unbedeutend auf die thermischen und hygienischen Verhältnisse aus.
- Das zuluftseitig gemessene Feuchteverhältnis $(x_{zu}-x_{au})/(x_{ab}-x_{au})$ ist konstant. Unter den oben genannten Bedingungen ist es identisch mit dem abluftseitig gemessenen Feuchteverhältnis. Variabilität gibt es auch hier für den außen-temperaturgesteuerten Rotor.

In einem zweiten Schritt werden die Auswirkungen einer variablen Drehzahl bei Sorptionsrotoren betrachtet. Durch Reduzierung der Rotordrehzahl kann hier bei geeignet dimensionierten Sorptionsschichten zunächst das Feuchteverhältnis reduziert werden, während der Wärmebereitstellungsgrad weitgehend unbeeinflusst bleibt. Erst bei weiterer Reduktion der Drehzahl sinkt dann auch der Wärmebereitstellungsgrad.



5 Simulationsergebnisse

5.1 Die verschiedenen Wirkmechanismen der Feuchterückgewinnung

In diesem Abschnitt werden die Einflüsse verschiedener Mechanismen für das Referenzgebäude illustriert. Für alle Fälle in diesem Abschnitt wurde zunächst, wie bei Anlagen ohne Feuchterückgewinnung weitgehend üblich, ein konstanter, unregelter Luftmassenstrom angesetzt.

Verglichen werden die Ergebnisse für den Heizwärmebedarf bei verschiedenen Feuchteverhältnissen für folgende Fälle:

- a) ohne Feuchtepufferung in der Gebäudestruktur, z.B. bei vollständig gefliesten Räumen; für die Feuchtepufferung stehen damit nur noch die Raumluft selbst sowie wiederverdunstendes Kondensat auf den Oberflächen zur Verfügung
- b) mit Feuchtepufferung, bei konstanter operativer Solltemperatur
- c) mit Feuchtepufferung, bei feuchteabhängiger Solltemperatur
- d) Berücksichtigung der Wechselwirkung von Raumluftfeuchte und Feuchte- und Wärmeabgabe von Personen und Zimmerpflanzen

Der Heizwärmebedarf für alle Fälle ist in Abbildung 10 dargestellt.

Zunächst soll der Fall ohne Feuchterückgewinnung analysiert werden (Feuchteverhältnis Null, linker Rand des Diagramms). Ein interessantes Ergebnis ist zunächst, dass durch die Berücksichtigung der Feuchtepufferung in Bauteilen und Mobiliar der Heizwärmebedarf des Beispielobjekts um $0,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ansteigt. Ein solcher Anstieg war zu erwarten, da die reduzierte Raumluftfeuchte während der Heizperiode zu einer Netto-Verdunstung aus den Bauteilen führt; der zusätzliche Latentwärmebedarf muss dann durch die Raumheizung gedeckt werden. Die verdunstete Feuchtigkeit wird außerhalb der Heizperiode wieder aufgefüllt, die entsprechende Verdunstungsenthalpie wird dabei wieder frei. Der Einfluss dieser Verdunstung auf den Heizwärmebedarf ist verhältnismäßig klein, da Teile des verdunsteten Wassers bereits gegen Ende der Heizperiode, bei wieder ansteigender Außenluftfeuchte, wieder in den Bauteilen adsorbiert werden.

Wird zusätzlich eine Feuchteabhängigkeit der operativen Solltemperatur gemäß Abbildung 7 angenommen, so schwankt die mittlere Raumtemperatur in der Heizperiode abhängig von der durchschnittlichen relativen Feuchte. Wird zusätzlich die Wechselwirkung von Raumluftfeuchte und Feuchte-/Wärmeabgabe im Gebäude berücksichtigt, kann sich erneut eine Änderung des Heizwärmebedarfs ergeben.



In welcher Richtung sich die beiden letztgenannten Effekte auswirken, hängt von der Festlegung der Solltemperaturen bzw. Wärme- und Feuchtequellen für die vereinfachten Modelle ab, die prinzipiell beliebig ist. Im vorliegenden Fall wurden – zur besseren Vergleichbarkeit des Einflusses der Feuchterückgewinnung in den verschiedenen Fällen und ohne Beschränkung der Allgemeinheit – die Sollwerte der Raumtemperaturen und die Feuchte- und Wärmequellen im Gebäude so gewählt, dass sich für ein Feuchteverhältnis von Null jeweils etwa die gleichen Heizwärmebedarfswerte ergeben.

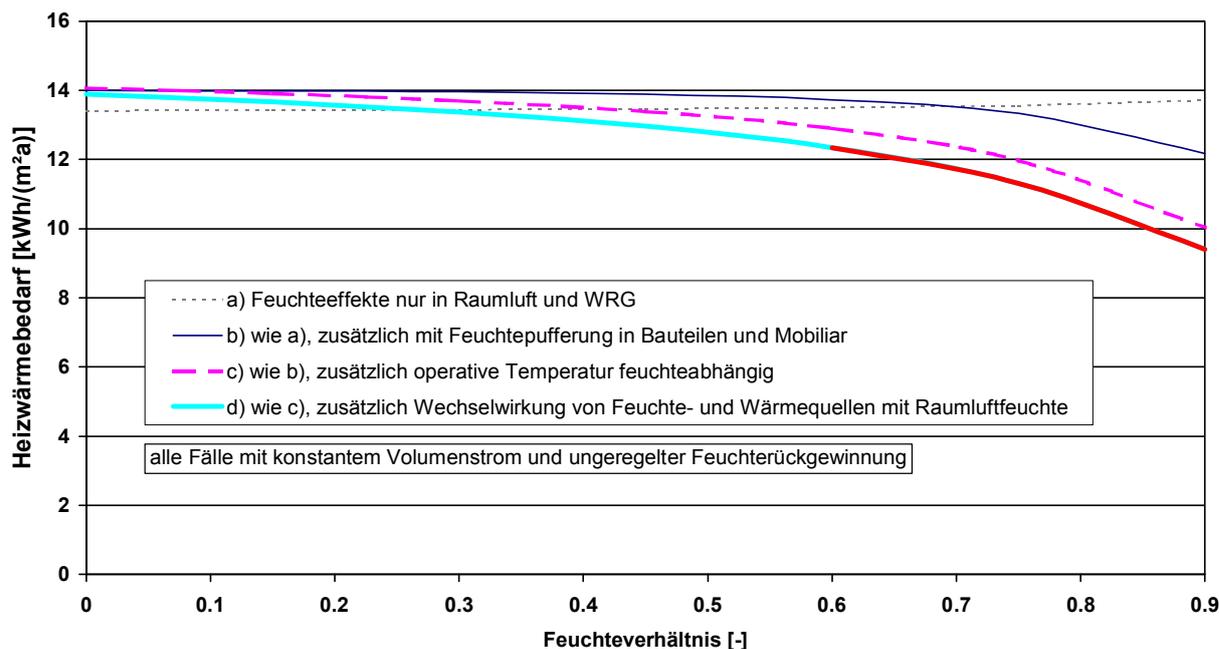


Abbildung 10: Zum Einfluss verschiedener Mechanismen auf den Heizwärmebedarf als Funktion des Feuchteverhältnisses. Bereiche mit bezüglich Schimmelbildung kritischen Raumluffteuchten sind rot markiert.

Betrachtet man nun den Einfluss der Feuchterückgewinnung, so fällt zunächst auf, dass ohne Feuchtepufferung (Fall a)) der Heizwärmebedarf mit zunehmender Feuchterückgewinnung, vielleicht unerwartet, leicht *ansteigt*. Der Grund kann aus einer genaueren Analyse der Simulationsergebnisse entnommen werden: Ohne Feuchtepufferung treten zeitweise sehr hohe Raumluffteuchten im Gebäude auf, die zu Kondensat im Wärmeübertrager und damit zu höheren Zulufttemperaturen führen. Je größer das Feuchteverhältnis wird, um so weniger Kondensat fällt im Mittel an, so dass der Heizwärmebedarf etwas ansteigt.

Bei üblicher Feuchtepufferung (hinreichend diffusionsoffene Wandbekleidung) und konstanter Raumtemperatur (Fall b)) sinkt der Heizwärmebedarf, wenn durch die Feuchterückgewinnung die Raumluffteuchte steigt und damit die Verdunstung aus den Bauteilen zurückgeht. Die Reduktion des Heizwärmebedarfs beträgt bei einem Feuchteverhältnis von 0,6 etwa 0,3 kWh/(m²a). Erst bei größeren Feuchteverhält-



nissen ist ein deutlicherer Einfluss festzustellen, der sogar den für den Fall ohne Feuchterückgewinnung ermittelten Einfluss der Feuchtespeicherung von $0,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ überschreitet, da statt der Austrocknung des Gebäudes während der Heizperiode eine Auffeuchtung stattfindet (Abbildung 11). Solch hohe Feuchteverhältnisse bei konstantem Volumenstrom würden jedoch Probleme mit zu hoher Raumlufffeuchte mit sich bringen (vgl. unten).

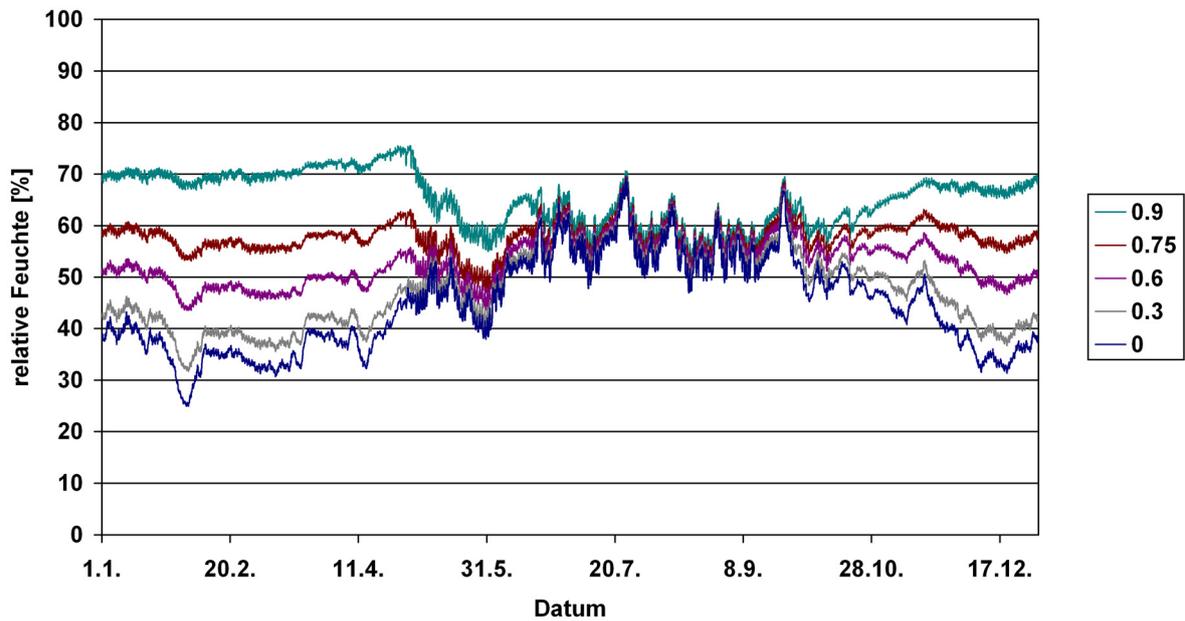
Wird die Solltemperatur abhängig von der Raumlufffeuchte eingestellt (vgl. Abbildung 7), so ergibt sich ein stärkerer Einfluss der Feuchterückgewinnung, da die höhere Feuchte niedrigere Raumtemperaturen und damit niedrigere Wärmeverluste erlaubt. Bei einem realistischen Feuchteverhältnis von $0,6$ sinkt der Heizwärmebedarf immerhin um $1,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Die Rückwirkung einer höheren Raumlufffeuchte auf die internen Gewinne (vgl. Abschnitt 4.2.6) verstärkt den Effekt der Feuchterückgewinnung weiter. Bezüglich der Personen bewirkt eine höhere Raumlufffeuchte reduzierte Verdunstung und damit eine Verschiebung der Wärmeabgabe zur sensiblen Wärme. Die bei höherer Luftfeuchte reduzierte Verdunstung aus Pflanzen wirkt in der gleichen Richtung. Die Dimension beider Größen ist insgesamt moderat: Bei einem Feuchteverhältnis von $0,6$ statt 0 steigen die mittleren sensiblen internen Wärmegewinne um $0,22 \text{ W}/\text{m}^2$. Ein Teil der zusätzlichen Wärmegewinne wird durch reduzierte Verdunstung von Personen, damit einen reduzierten Anstieg der Raumlufffeuchte und folglich erhöhte Verdunstung aus den Bauteilen wieder kompensiert. Insgesamt führt dieser Effekt im Beispiel zu einer Abnahme des Heizwärmebedarfs um $0,55 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$.

Es ist anzumerken, dass ein Feuchteverhältnis von $0,6$ bezüglich der Gefahr von Schimmelbildung am Fensterrandverbund bereits im Grenzbereich liegt. Abbildung 12 zeigt im Jahresverlauf den höchsten Wert des gleitenden Dreitagesmittels der Wasseraktivität im Bereich des Randverbunds aus allen außenliegenden Zonen (unter Berücksichtigung sämtlicher genannten Mechanismen). Während im Fall ohne Feuchterückgewinnung in den kalten Perioden auch die Raumlufffeuchte abfällt, bleibt sie bei hohen Feuchteverhältnissen tendenziell konstant, so dass ausgeprägte Peaks der relativen Feuchte an den kalten Oberflächen entstehen – mit der Gefahr von Schimmelwachstum und/oder Kondensat (vgl. hierzu auch den nächsten Abschnitt).



Mittlere relative Raumlufffeuchte



Heizleistung im Fall ohne Feuchterückgewinnung

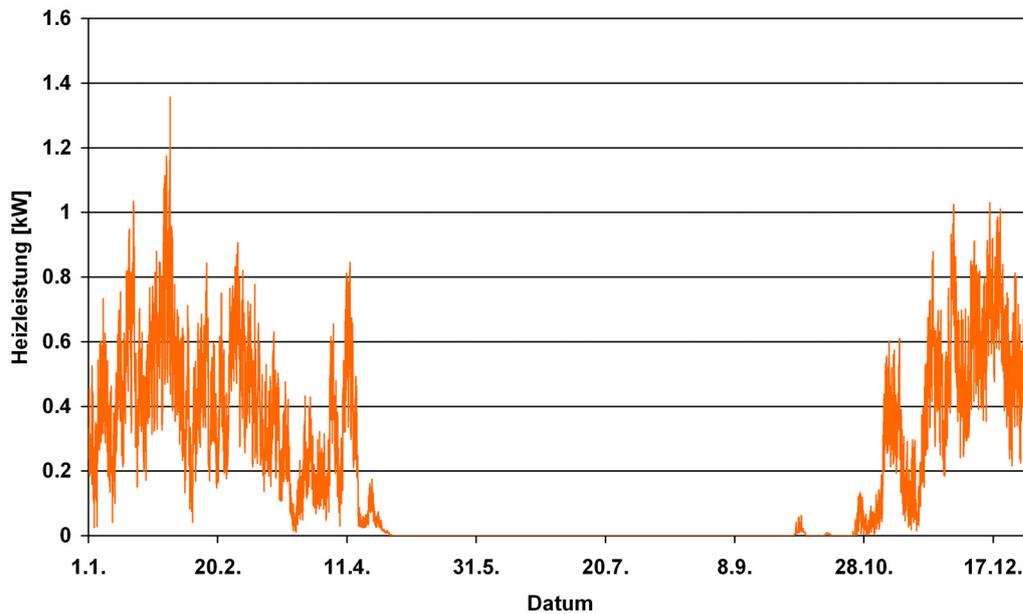


Abbildung 11: Bei hohen Feuchteverhältnissen wächst die Raumlufffeuchte während der Heizperiode an anstatt abzusinken. Die zugehörige Kondensationsenthalpie durch Feuchtespeicherung in den Wänden reduziert den Heizwärmebedarf. Flächengewichteter Mittelwert der relativen Raumlufffeuchte für Zone 1 bis 6. Fall d) aus Abbildung 10.

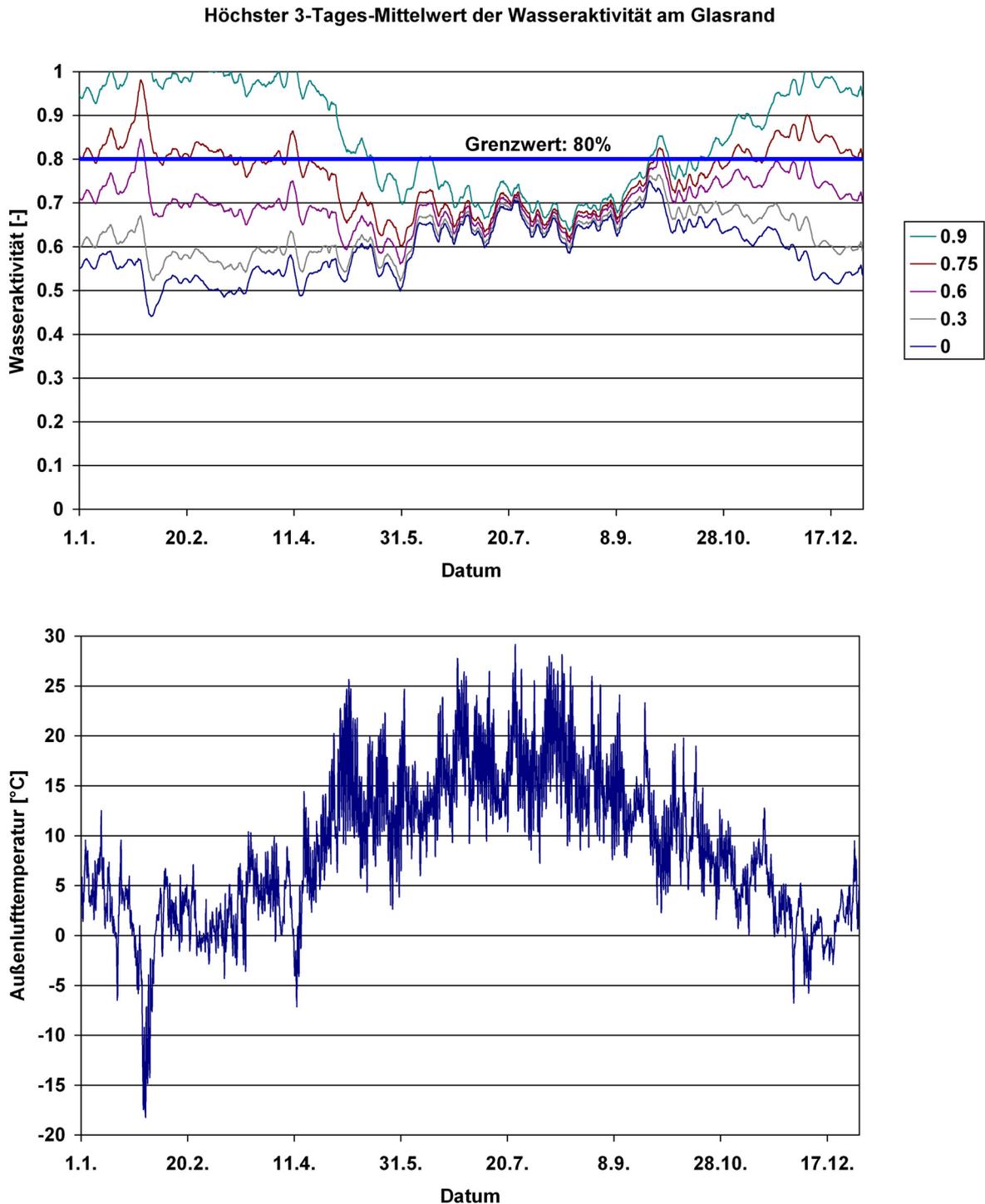


Abbildung 12: Am Fensterrandverbund treten ab einem Feuchteverhältnis von 0,6 zeitweise Feuchtigkeiten auf, die zu Schimmelwachstum z.B. am Scheibenrandverbund führen können. Für jede an Außenluft grenzende Zone wurde zu jedem Zeitpunkt der 3-Tages-Mittelwert der Wasseraktivität an einem Fenster-Randverbund ermittelt. In der Grafik ist der Wert für den Raum mit der höchsten Wasseraktivität dargestellt. Fall d) aus Abbildung 10.



5.2 Vermeidung von überhöhten Luftfeuchten

In diesem Abschnitt werden verschiedene Strategien untersucht, mit denen überhöhte Luftfeuchten vermieden werden können. Die Abschnitte 5.2.1 bis 5.2.3 behandeln dabei Systeme mit unregelmäßiger Feuchteübertragung, z.B. Plattenwärmeübertrager mit Membran. In Abschnitt 5.2.4 wird ein Sorptionsrotor, d.h. ein System mit gesteuerter Feuchteübertragung, untersucht.

5.2.1 Begrenzung auf konstante Luftfeuchte

Das Problem überhöhter Feuchten bei Feuchterückgewinnung lässt sich im Prinzip durch einen feuchteabhängig erhöhten Luftwechsel lösen: Wenn die Luftfeuchte einen festgelegten Grenzwert übersteigt, wird der Volumenstrom erhöht, bis sich die Luftfeuchte wieder reduziert hat. Bei dieser Strategie bringt die Feuchterückgewinnung allerdings keine Energieeinsparung mehr: Es muss so viel mehr gelüftet werden, dass der Heizwärmebedarf denjenigen ohne Feuchterückgewinnung erreicht oder sogar übersteigt. Abbildung 13 zeigt ein Beispiel, in dem durch Erhöhung des Luftvolumenstroms die Abluftfeuchte auf maximal 55% begrenzt wird. Die Einsparungen im Heizwärmebedarf werden durch die erhöhten Lüftungswärmeverluste weitgehend kompensiert. Bei sehr hohen Feuchteverhältnissen kommt es sogar zu einem gravierenden Mehrverbrauch an Heizwärme.

Durch die höheren Luftwechsel entsteht darüberhinaus ein höherer Stromverbrauch für die Lüftungsanlage. Um diesen gegenüber den Einflüssen auf die Heizwärme bewerten zu können, werden primärenergetische Wichtungsfaktoren für Raumwärme (1,15) und Elektrizität (3,0) eingeführt. Damit lässt sich der zusätzliche Stromverbrauch grob in eine äquivalente Heizwärmebedarfs-Erhöhung umrechnen. Setzt man nun – ohne Berücksichtigung der Nichtlinearitäten im Leitungsnetz – einen Stromverbrauch von 0,4 Wh pro Kubikmeter geförderter Luft an, so ergibt sich die in Abbildung 13 gestrichelt eingezeichnete Linie.

Erschwerend kommt hinzu, dass die hier beschriebene Regelung unter bestimmten Bedingungen nicht ausreicht: Die Schimmelpilzgrenze am Randverbund kann auch bei 55% r.F. noch überschritten werden, wenn die Außentemperatur unter ca. -5 °C sinkt. In Gebäuden mit Lüftungsanlagen ohne oder mit nur geringer Feuchterückgewinnung tritt dieses Problem nicht auf. Bei niedrigen Außentemperaturen, die mit niedrigen Außenluftfeuchten einhergehen, sinkt in diesem Fall auch die Raumluftfeuchte rasch auf Werte ab, die Schimmelbildung ausschließen.



Abluftfeuchte durch erhöhten Luftwechsel auf 55% begrenzt

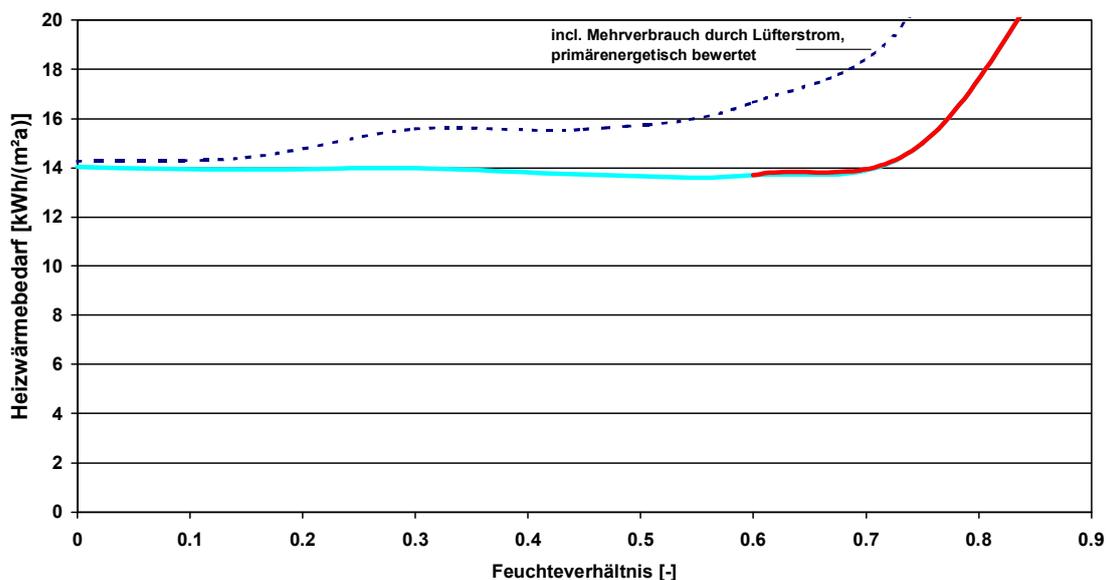


Abbildung 13: Wird die relative Raumlufffeuchte durch erhöhten Luftwechsel auf 55% Abluftfeuchte begrenzt, so kann durch die Feuchterückgewinnung keine Energieeinsparung mehr erzielt werden.

5.2.2 Begrenzung auf außentemperaturabhängige Luftfeuchte

Das unbefriedigende Ergebnis aus dem letzten Abschnitt hängt auch mit der Art der Regelung zusammen. Man kann im Prinzip den Volumenstrom so regeln, dass die Feuchte außentemperaturabhängig gerade unter dem gebäudeabhängigen Grenzwert für Schimmelbildung gehalten wird (vgl. Abschnitt 2.4). In diesem Fall muss nur relativ selten zusätzlich gelüftet werden. Wie Abbildung 14 zeigt, kann dann wieder eine gewisse Heizwärmeeinsparung realisiert werden.



Abluftfeuchte durch erhöhte Lüftung außentemperaturabhängig begrenzt

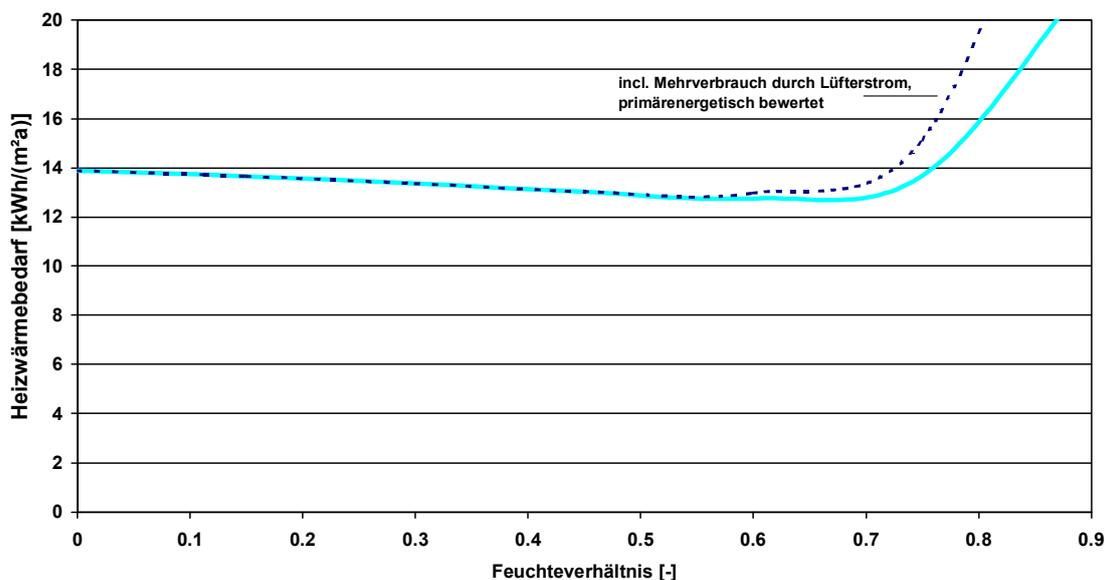


Abbildung 14: Bei Begrenzung der relativen Raumluftfeuchte durch erhöhten Luftwechsel auf einen außentemperaturabhängigen Wert lässt sich das Schimmelrisiko eliminieren und der Heizwärmebedarf senken – außer bei sehr hohen Feuchteverhältnissen.

Auch primärenergetisch bewertet kann bei mäßigen Feuchteverhältnissen eine Energieeinsparung erreicht werden. Lange Zeiträume, in denen zusätzlich gelüftet werden muss, entstehen erst bei sehr hohen Feuchteverhältnissen.

5.2.3 Ideale variable Feuchterückgewinnung

Prinzipiell ist es denkbar, dass Feuchte- und Wärmerückgewinnung unabhängig voneinander stattfinden. Beispielsweise könnte man zwei Wärmeübertrager, mit und ohne Feuchterückgewinnung, in einem Gehäuse installieren und je nach Erfordernissen abwechselnd betreiben. Auch mit geeigneten Sorptionsrotoren lassen sich Feuchte- und Wärmerückgewinnung näherungsweise entkoppeln.

Im Fall unabhängig reduzierbarer Feuchterückgewinnung entsteht kein zusätzlicher Lüftungswärme- bzw. -strombedarf für die Feuchtebegrenzung. Wie Abbildung 15 zeigt, kann dann auch bei hohen Feuchteverhältnissen noch eine weitere Reduzierung des Heizwärmebedarfs erreicht werden. Der Abfall des Heizwärmebedarfs entspricht in diesem Fall ungefähr einem Anstieg des Wärmebereitstellungsgrades von 10% des Feuchteverhältnisses. Anders ausgedrückt: Ein Feuchteverhältnis von 0,6 würde einer Erhöhung des Wärmebereitstellungsgrades um 6 Prozentpunkte entsprechen.



Abluftfeuchte ideal außentemperaturabhängig begrenzt

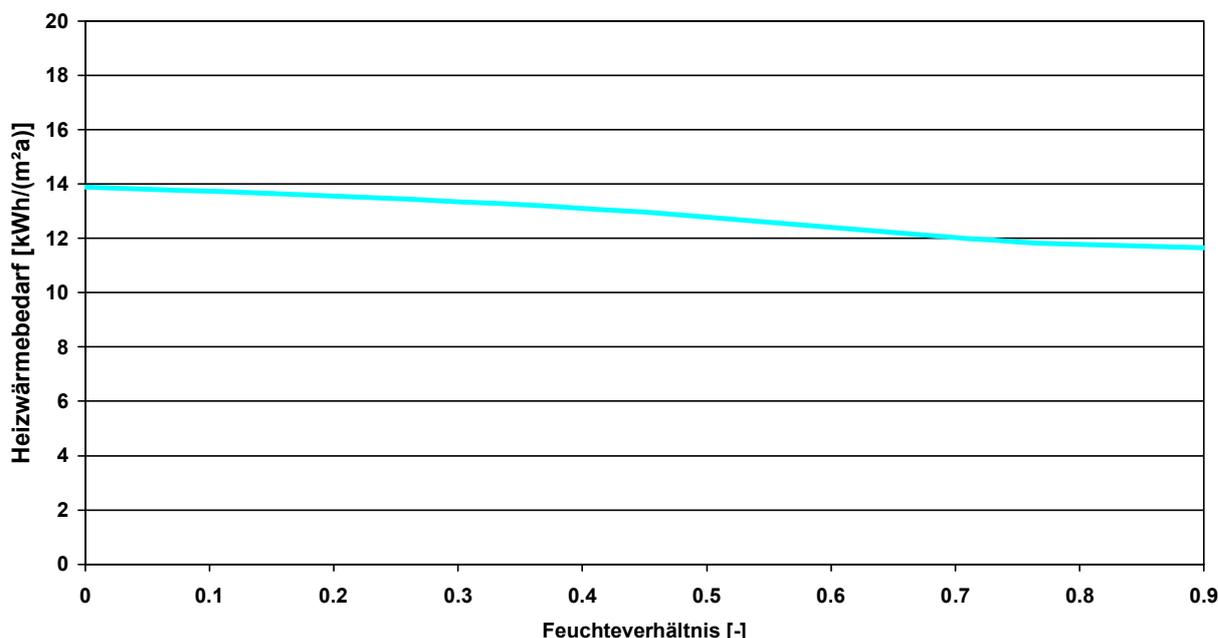


Abbildung 15: Bei Begrenzung der relativen Raumlufffeuchte durch Regelung der Feuchterückgewinnung kann auch bei hohen Feuchteverhältnissen eine weitere Reduzierung des Heizwärmebedarfs erreicht werden.

5.2.4 Variable Feuchterückgewinnung beim Rotor

In geeignet dimensionierten Sorptionsrotoren hängen Feuchte- und Wärmeübertragung in unterschiedlicher Weise von der Drehzahl ab. Bei sinkender Drehzahl geht dabei zuerst das Feuchteverhältnis zurück, erst danach der Wärmebereitstellungsgrad. Durch geeignete Wahl der Drehzahl kann somit die Raumlufffeuchte eingestellt werden.

In Anlehnung an ein reales Gerät mit Sorptionsrotor wurden entsprechende Kennlinien angenommen. Bei der untersuchten Strategie hängt die Drehzahl von der Außentemperatur ab; bei milderer Außentemperaturen wird die Drehzahl reduziert. Der Wärmebereitstellungsgrad des modellierten Rotors beträgt maximal 85% wie für den Plattenwärmeübertrager; bei Außentemperaturen oberhalb von 17 °C sind es nur noch 20%. Das Feuchteverhältnis kann maximal 83% erreichen; oberhalb von 17 °C liegt es nur noch bei 3%. Die genauen Kennlinien werden vom Hersteller als vertraulich betrachtet und können daher hier nicht angegeben werden.

Zusätzlich wird in diesen Geräten der Volumenstrom durch einen Feuchtefühler in einem Zulufrum nach der relativen Feuchte geregelt. Der Nutzer gibt einen Sollwert ein, das Gerät fährt mindestens die (einstellbare) Grundlüftung und versucht ansonsten mittels einer P-Regelung die Raumlufffeuchte entsprechend einzuregeln. Diese Strategie wurde mit folgenden Parametern untersucht: Der Sollwert der



relativen Feuchte in Zone 1, dem Wohnzimmer, wird mit 42 % gewählt. Bis zu dieser Feuchte liegt der Standard-Volumenstrom von 122,5 m³/h an. Bei höheren Feuchten steigt der Volumenstrom linear an bis auf einen Wert von 240 m³/h, der bei 62 % relativer Feuchte erreicht wird. Von Mai bis September läuft die Anlage im Simulationsmodell nur mit der Grundlüftung, um unnötigen Stromverbrauch zu vermeiden.

Um den Effekt der variablen Drehzahl abbilden zu können, wurden in der Simulation verschiedene Strategien der Feuchtebegrenzung vergleichend untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 zusammengefasst.

Zunächst wird wie für die Geräte mit konstanter Feuchterückgewinnung die Abluftfeuchte durch Erhöhung des Volumenstroms auf einen festen Wert von 55% begrenzt. Trotz der variablen Feuchterückgewinnung zeigt sich auch hier, dass eine pauschale Begrenzung der Raumlufftfeuchte auf einen solchen festen Wert so häufig erhöhte Volumenströme erfordern würde, dass insgesamt ein zusätzlicher Energiebedarf resultiert, während gleichzeitig bei niedrigen Außentemperaturen kurzzeitige Überschreitungen der maximal zulässigen Wasseraktivität im Bereich des Randverbundes auftreten. Der Mehrverbrauch ist im Wesentlichen auf die erforderliche Reduzierung der relativen Feuchte zu Beginn der Heizperiode zurückzuführen; bei anders gewählten Randbedingungen könnten sich hier bedeutende Änderungen ergeben (vgl. auch den Fall gemäß werkseitiger Regelung).

Bei Regelung der Raumlufftfeuchte nach der Außentemperatur ist dagegen hauptsächlich bei niedrigen Außentemperaturen und gegen Ende der Heizperiode ein erhöhter Volumenstrom notwendig. Die Heizwärmeeinsparung ist jedoch auch in diesem Fall insgesamt gering. Sie kompensiert gerade die Abnahme des Wärmebereitstellungsgrades aufgrund der niedrigeren Drehzahlen bei höheren Außentemperaturen.

Die oben beschriebene werkseitig empfohlene Regelung führt ebenfalls zu einer minimalen Erhöhung des Heizwärmebedarfs gegenüber dem Referenzfall ohne Feuchterückgewinnung.

In den Fällen mit Feuchterückgewinnung ist zur Feuchteabfuhr jeweils ein erhöhter Luftvolumenstrom erforderlich. Je nach Regelstrategie ergeben sich daraus trotz der Steuerung der Rotordrehzahl bedeutende Mehrverbräuche für den Lüfterstrom, die in der Gesamtenergiebilanz negativ zu Buche schlagen.

Die Betrachtung der sich einstellenden Luftfeuchten zeigt, dass im Referenzfall die Raumlufftfeuchte kurzzeitig bis auf 21 % absinken kann, flächenbewertet liegt die relative Luftfeuchte während 2,4% des Jahres unter 30%. Bei den Geräten mit Feuchterückgewinnung gelingt es dagegen für alle Regelstrategien, die relative Feuchte überall im Gebäude während des ganzen Jahres oberhalb von 35 % zu halten.



Feuchtebegrenzung durch regelbare Feuchterückgewinnung

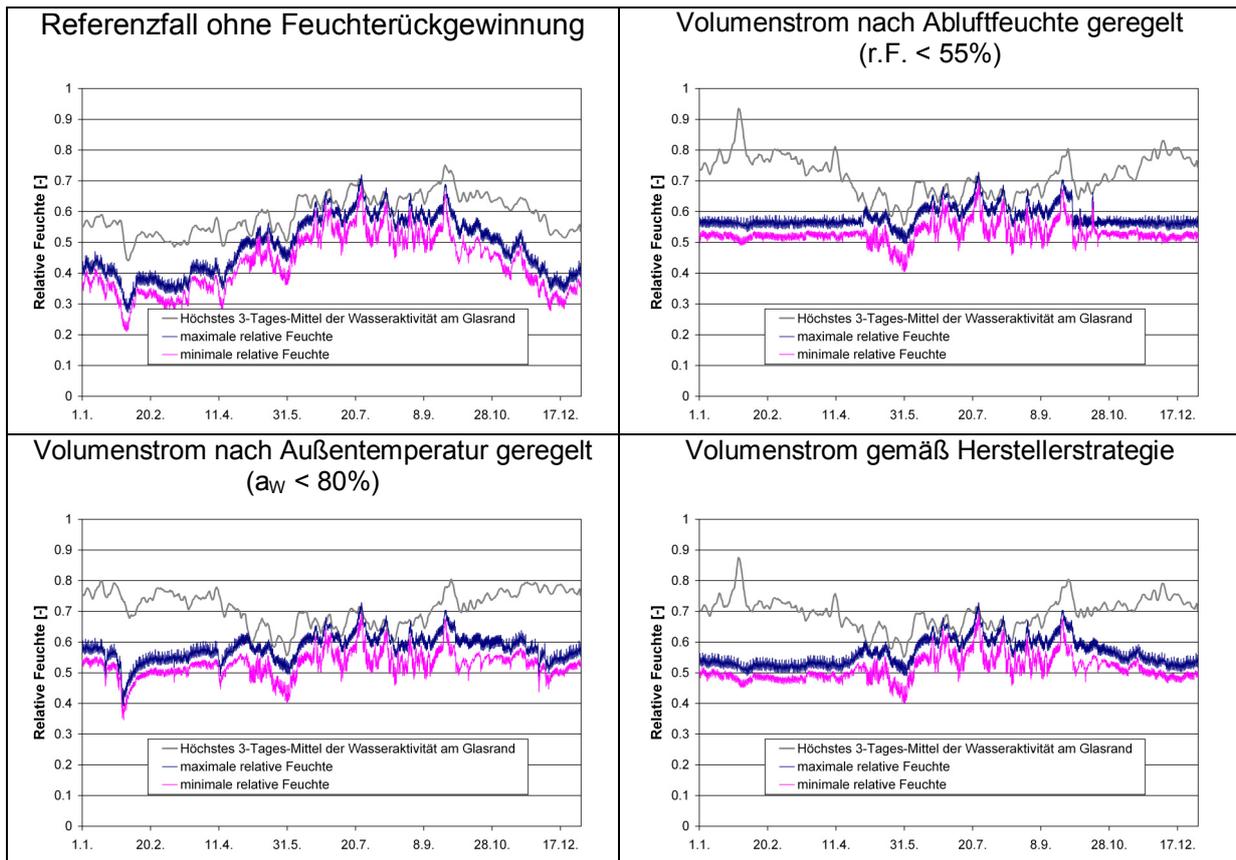
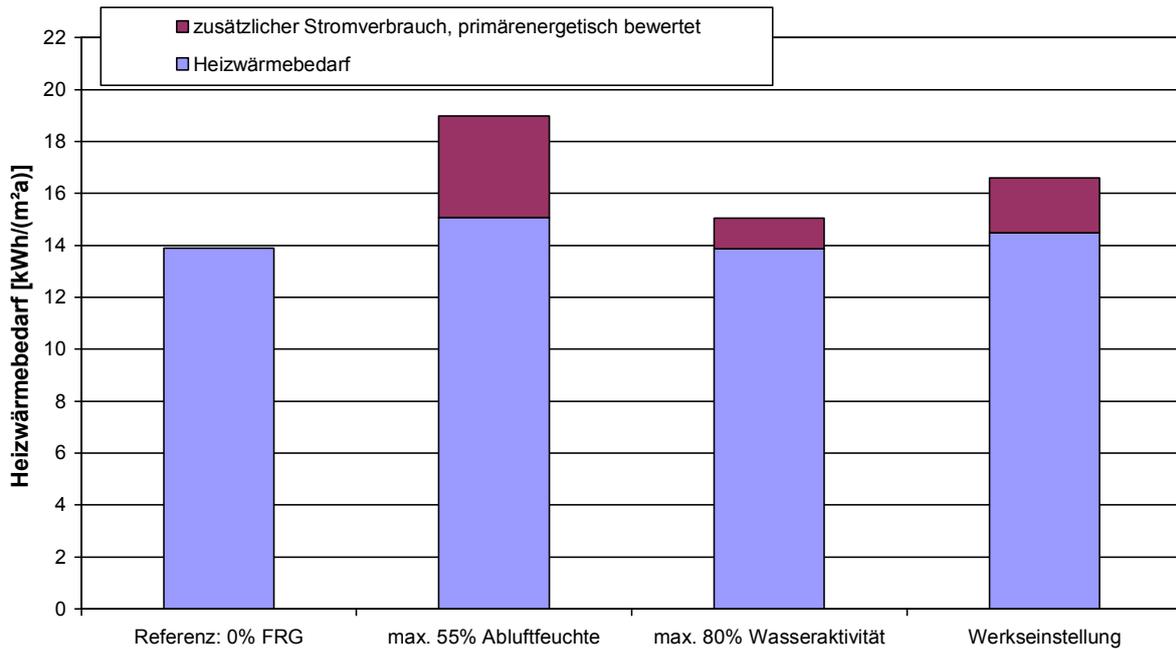


Abbildung 16: Die Feuchterückgewinnung in außentemperaturabhängig gesteuerten Rotoren mit hohem maximalen Feuchteverhältnis von 83 % führt dazu, dass die Raumluftfeuchte im Winter zwischen 40 und 60 % gehalten wird. Eine Energieeinsparung kann jedoch aufgrund des zur Feuchtebegrenzung zeitweise erhöhten Volumenstroms nicht erreicht werden.



5.3 Effektiver Wärmebereitstellungsgrad bei Feuchterückgewinnung

Das wichtigste Ziel dieser Studie besteht darin, eine etwaige Einsparung an Heizwärme, die durch die Feuchterückgewinnung entsteht, so zu quantifizieren, dass sie sich leicht in üblichen Energiebilanzverfahren, beispielsweise im Passivhaus Projektierungs Paket [PHPP 2007], verwenden lässt, ohne dass diese Verfahren die Feuchteeffekte explizit berücksichtigen müssen. Am einfachsten könnte dies über einen effektiven Wärmebereitstellungsgrad gelingen, der gegenüber dem trockenen Wärmebereitstellungsgrad so erhöht ist, dass sich dieselbe Energieeinsparung ergibt wie bei expliziter Berücksichtigung der Feuchteeffekte. Dieser Zuschlag auf den Wärmebereitstellungsgrad berechnet sich in den einzelnen simulierten Fällen zu

$$\Delta\eta_{eff} = \frac{\Delta Q_{Heiz}}{\rho c_p \dot{V} G_t} .$$

Darin sind

ΔQ_{Heiz}	Heizwärmeeinsparung [kWh]
ρc_p	volumenbezogene Wärmekapazität [Wh/(m ³ K)]
\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /h]
G_t	Gradtagszahl [kKh]

Für das hier berechnete Beispielgebäude ergeben sich daraus folgende Gutschriften bzw. Abzüge für den Wärmebereitstellungsgrad, wenn man ein Feuchteverhältnis von 0,6 ansetzt (in Prozentpunkten):

Saisonale Feuchtespeichereffekte incl. Änderung des Kondensats im Wärmeübertrager	+1,0 %
Solltemperatur feuchteabhängig gemäß PMV	+3,7 %
Wechselwirkung Feuchteabgabe Personen und Pflanzen	+1,5 %
Begrenzung der Abluftfeuchte durch erhöhten Luftwechsel	-1,7 %
Bilanz: Gutschrift auf den Wärmebereitstellungsgrad	+4,5 %

Tabelle 4: Verschiedene energetische Auswirkungen der Feuchterückgewinnung, ausgedrückt als Änderung des effektiven Wärmebereitstellungsgrades

Inwieweit diese Ergebnisse sich unter anderen Randbedingungen ändern, wird in den nachfolgenden Abschnitten untersucht.



5.4 Frostschutz

Der Wärmeübertrager von Lüftungsanlagen muss bei entsprechenden Witterungsbedingungen gegen Einfrieren geschützt werden. Dies kann beispielsweise durch Anhebung der Außenlufttemperatur vor dem Wärmeübertrager auf eine ausreichend hohe Temperatur erfolgen, etwa durch einen Erdkanal, eine elektrische oder hydraulische Vorheizung oder die Beimischung wärmerer Luft aus dem Gebäude. Die erforderliche Mindesttemperatur der Außenluft muss dabei geräteabhängig so gewählt werden, dass sich im Abluft/Fortluft-Strang kein Eis bilden kann. Manche Wärmeübertrager dürfen auch einfrieren; sie müssen dann periodisch aufgetaut werden, damit das Eis den Luftstrom nicht zu stark behindert.

Wenn durch eine Feuchterückgewinnung so viel Feuchtigkeit aus der Abluft entfernt wird, dass die Fortluft den Taupunkt nicht unterschreitet, so ist auch bei Außen-temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt kein Frostschutz erforderlich. Man würde daher erwarten, dass die Feuchterückgewinnung den Energieaufwand für den Frostschutz deutlich reduziert. Interessanterweise ist das in den hier berechneten Beispielen nur sehr eingeschränkt der Fall: Es fällt zwar mit Feuchterückgewinnung tatsächlich weniger Kondensat an, die Zahl der Stunden, in denen es bei Fortlufttemperaturen unter dem Gefrierpunkt Kondensat gibt, wird aber erst bei sehr hohen Feuchteverhältnissen spürbar reduziert (Abbildung 17).

Zumindest in Systemen, in denen der Frostschutz durch Anhebung der Außenlufttemperatur realisiert wird, kann der Feuchterückgewinnung daher nicht pauschal eine Einsparung beim Frostschutz gutgeschrieben werden.

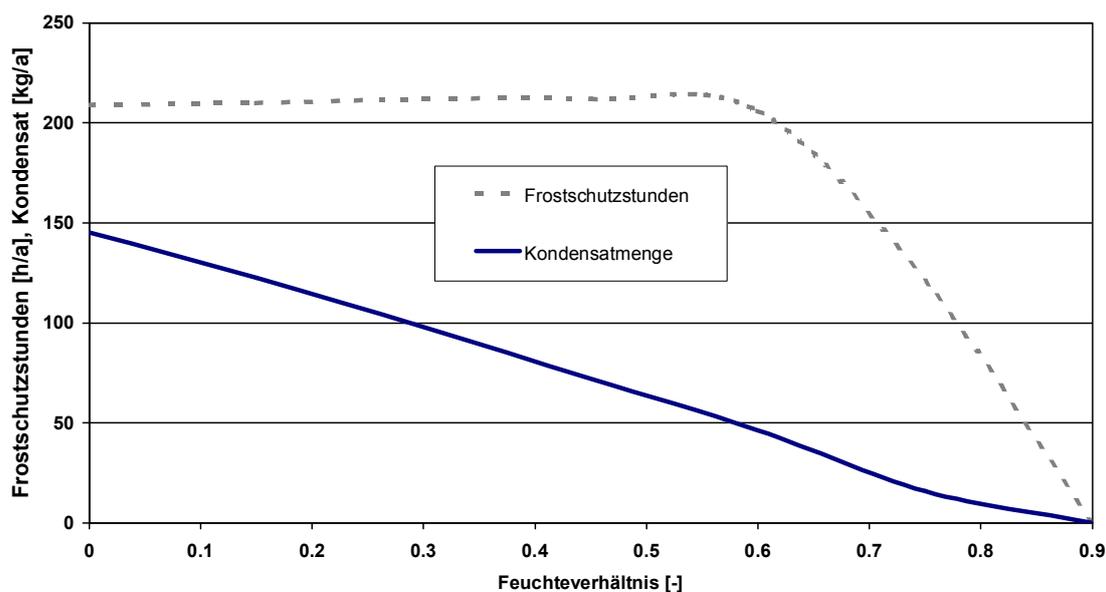


Abbildung 17: Die Feuchterückgewinnung reduziert zwar die Kondensatmenge im Wärmeübertrager, aber nur in begrenztem Umfang die Anzahl von Stunden, in denen bei Fortlufttemperaturen unter 0 °C Kondensat anfällt.



In diesem Zusammenhang sind jedoch Messungen zu erwähnen, die an der HTA Luzern für ein Gerät mit Rotationswärmeübertrager unter Frostschutzbedingungen durchgeführt wurden: Außenluft -15 °C , 72% r.F., Abluft 20 °C , 41% r.F. ([Furter 2008]). Vom Hersteller wird für das Gerät bei einer Außentemperatur von -15 °C ein Feuchteverhältnis von $0,83$ und ein Temperaturverhältnis von $0,81$ angegeben. Das könnte unter den genannten Bedingungen zum Einfrieren des Rotors führen. Tatsächlich lag die relative Feuchte der Fortluft jedoch unter 70% , das Gerät froh während einer 12-stündigen Messung nicht ein. Bei dieser Messung war allerdings keine Balance der Massenströme gegeben, eine genauere Analyse der Verhältnisse ist allein aufgrund der vorliegenden Messdaten nicht möglich.

Die Messung zeigt andererseits eindeutig, dass zumindest bei diesem Gerät tatsächlich kein zusätzlicher Frostschutz erforderlich war. Ein sonst etwa erforderlicher Energieaufwand für den Frostschutz entfällt damit.

5.5 Sensitivitätsanalysen

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit der Einfluss der Feuchterückgewinnung auf den Heizwärmebedarf von bestimmten Annahmen für die Simulationsparameter abhängt. Dabei wird jeweils vorausgesetzt, dass die Raumlufffeuchte durch einen erhöhten Luftwechsel außentemperaturabhängig so begrenzt wird, dass kein Risiko von Schimmelwachstum am Fensterrandverbund besteht.

5.5.1 Einfluss der Annahmen zu den Feuchtequellen

Hier werden die in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Szenarien zu erhöhter bzw. reduzierter Belegung des Gebäudes untersucht. Die Lüftungsanlage wird dabei nicht verändert, so dass der energetische Einfluss der Feuchterückgewinnung auch bei höheren bzw. niedrigeren Feuchtebelastungen in Bezug auf die Zuluftmenge untersucht werden kann.

Im Szenario mit niedrigeren Feuchtequellen wird die Einsparung durch die Feuchterückgewinnung etwas geringer; die Gutschrift für den Wärmebereitstellungsgrad beträgt bei einem Feuchteverhältnis von $0,6$ nun $2,7$ Prozentpunkte. Der Wiederanstieg des Heizwärmebedarfes aufgrund erhöhten Luftwechsels zur Feuchtebegrenzung setzt in diesem Szenario erst bei höheren Feuchteverhältnissen als im Referenzfall ein (Abbildung 18).

Ferner liegt im Fall ohne Feuchterückgewinnung die Raumlufffeuchte nun während 20% des Jahres unter 30% (genauer hier und im Folgenden: das über alle beheizten Zonen flächengewichtete Mittel der Jahresstunden mit relativen Feuchten unter 30% beträgt 20% des Jahres), im Referenzfall nur während $2,4\%$ des Jahres. Erst mit



einem Feuchteverhältnis von 0,45 erreicht man letzteren Wert auch im Szenario mit niedrigeren Feuchtequellen.

Beide Ergebnisse sprechen dafür, in Gebäuden mit niedrigen flächenspezifischen Feuchtequellen Lüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung einzusetzen.

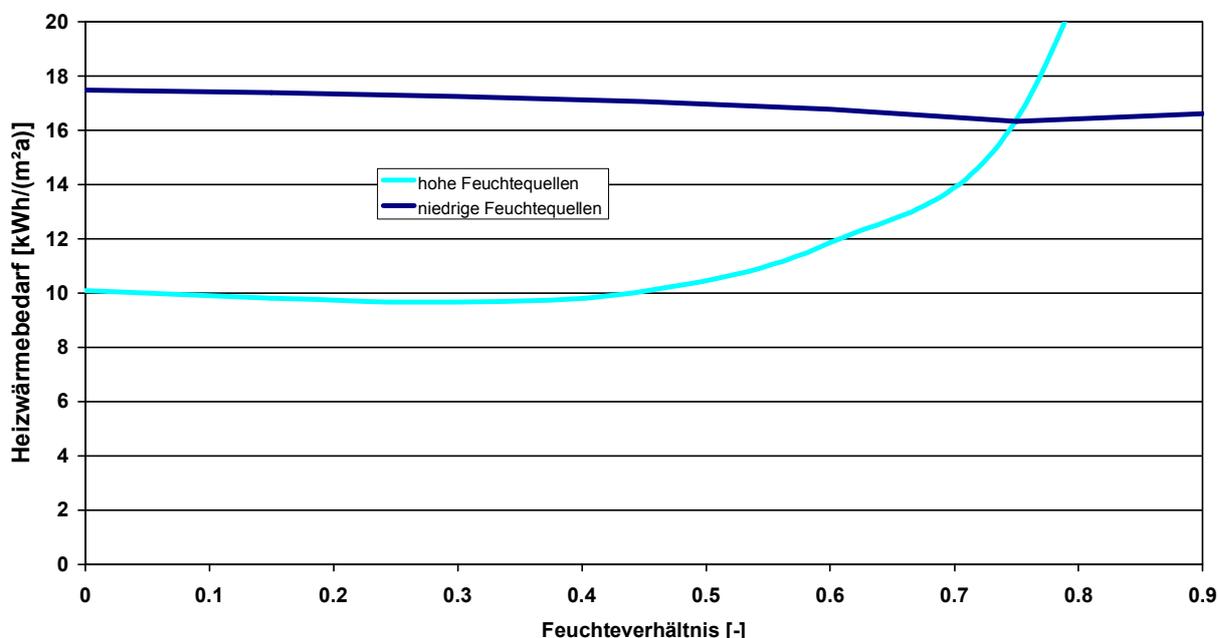


Abbildung 18: Im Fall mit niedrigeren Feuchte- und Wärmequellen muss erst bei höheren Feuchteverhältnissen stark zusätzlich gelüftet werden, im Fall mit erhöhten Quellen dagegen schon bei niedrigen Feuchteverhältnissen.

Im Szenario mit höheren Feuchtequellen sinkt die Raumlufffeuchte bereits ohne Feuchterückgewinnung während weniger als 1% des Jahres unter 30%. Dementsprechend gibt es bereits bei moderater Feuchterückgewinnung Zeiten, in denen ein erhöhter Luftwechsel erforderlich wird. Bei einem Feuchteverhältnis von 0,6 ist bereits ein deutlicher Mehrbedarf an Heizwärme festzustellen. Eine Gutschrift auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad wäre in diesem Szenario nicht gerechtfertigt.

5.5.2 Einfluss der Öffnung von Innentüren

Im Referenzfall sind die Innentüren meistens geschlossen; es wird lediglich ein kleiner Luftvolumenstrom von 50 m³/h durch jede Innentür (mit Ausnahme von Zone 2, WC EG) angenommen. Werden die Innentüren konsequent geschlossen gehalten, so entsteht eine gerichtete Durchströmung des Gebäudes; Feuchtetransport kann nun nur noch von den Wohnräumen zu den Ablufträumen stattfinden. Die Feuchtebelastungen in Bad und WC kommen damit nicht mehr dem Rest der Wohnung zugute. Es



kommt folglich zu einer stärkeren Spreizung der Feuchten. Umgekehrt wird bei durchgehend offenen Innentüren die Feuchte gleichmäßiger im Gebäude verteilt.

Abbildung 19 zeigt den Jahresverlauf der relativen Feuchte in Abhängigkeit von Feuchterückgewinnung und Stellung der Innentüren. Im Fall mit geschlossenen Türen beträgt die Spreizung der relativen Feuchte während der Heizperiode etwa 10 Prozentpunkte. Dadurch kann es relativ leicht zu unerwünschten Raumlufzuständen kommen; die Luft wird im Fall ohne Feuchterückgewinnung leicht zu trocken, im Fall mit Feuchterückgewinnung leicht zu feucht, letzteres vor allem im Herbst. Bei offenen Türen gibt es dagegen in beide Richtungen noch Reserven.

In beiden untersuchten Fällen führt ein Feuchteverhältnis von 0,6 zu einer Erhöhung der effektiven Wärmebereitstellungsgrades um 4,5 Prozentpunkte.

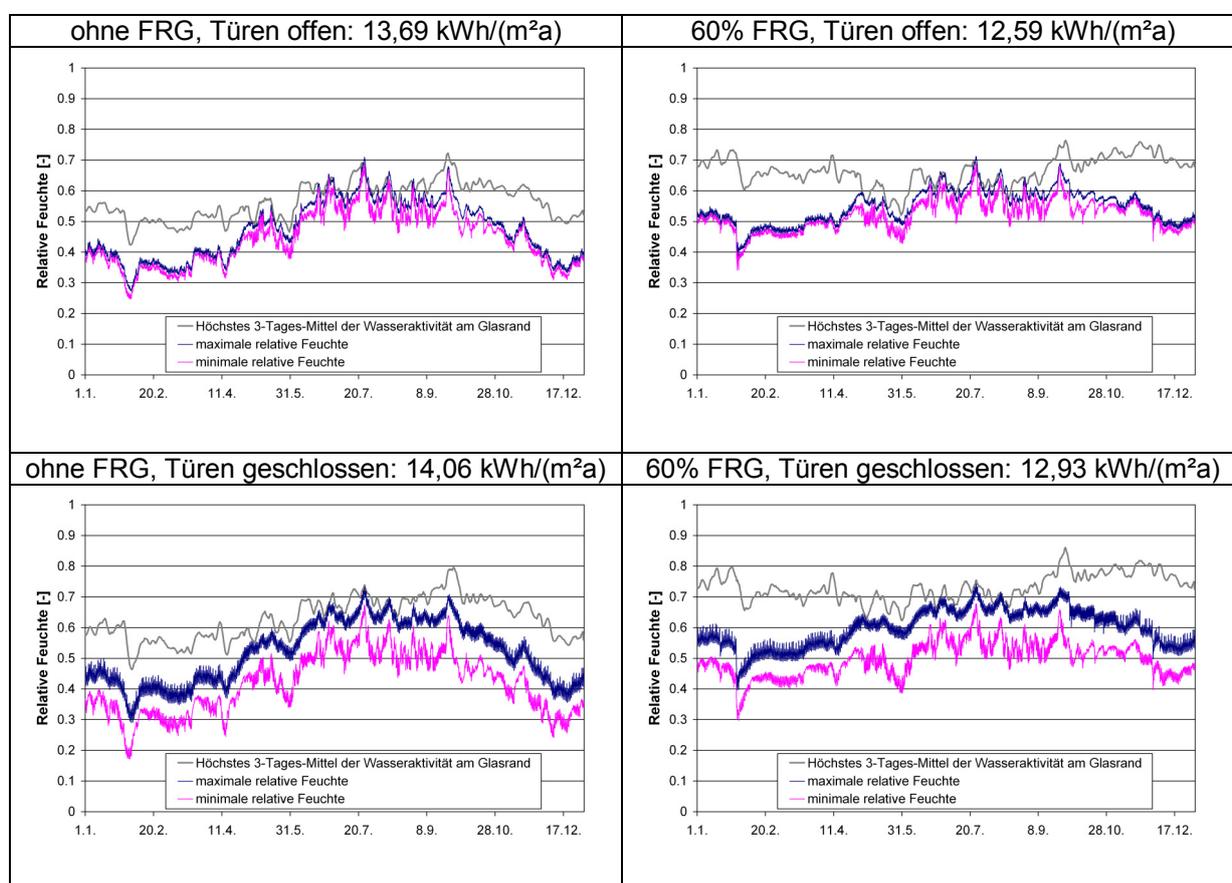


Abbildung 19: Bei offenen Innentüren ist die relative Feuchte fast überall gleich groß, bei geschlossenen Innentüren beträgt die Differenz ca. 10 Prozentpunkte.

5.5.3 Einfluss der Bauweise: Leichtbau oder Massivbau

Hier werden eine sehr leichte (Holz-) und eine sehr schwere (Beton-)bauweise verglichen. Details zu den Bauteilaufbauten finden sich in Anhang A.



Sowohl der extreme Leichtbau als auch der extreme Massivbau benötigen im Fall ohne Feuchterückgewinnung etwas mehr Heizwärme als der Referenzfall (Tabelle 5). Für den Leichtbau ist dieses Ergebnis unmittelbar einsichtig: Die geringere Wärmekapazität führt zu einer kleineren Zeitkonstante und damit zu einem schlechteren Nutzungsgrad für die freie Wärme. Beim sehr schweren Gebäude handelt es sich dagegen um einen Feuchteffekt: Die Betonbauteile geben über den Winter mehr Feuchte ab als die Bauteile des Referenzgebäudes, der resultierende zusätzliche Bedarf an Latentwärme wirkt sich stärker aus als der höhere Nutzungsgrad.

Die höhere Verdunstung spiegelt sich auch in etwas höheren Raumlufffeuchten des schweren Falls. Die Tabelle zeigt, dass sowohl die kleinsten auftretenden Luftfeuchten als auch der Anteil des Jahres mit Luftfeuchten unter 30% im leichten Fall problematischer ausfallen, im schweren Fall weniger problematisch.

	leicht	Referenz	schwer
Heizwärmebedarf ohne FRG [kWh/(m ² a)] *	15,1	13,9	14,2
Anteil des Jahres mit relativer Feuchte unter 30 % [%] *	3,4	2,4	1,2
minimale relative Feuchte [%] *	19,3	21,1	23,0
Gutschrift auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad bei Feuchteverhältnis 0,6 [Prozentpunkte]	6,0 %	4,5 %	5,0 %

Tabelle 5: Vergleich verschieden schwerer Bauweisen. * ohne Feuchterückgewinnung

Die Sensitivität bezüglich der Bauweise ist insgesamt gering. Die sich ergebende Gutschrift auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad liegt auch bei schwerer oder leichter Bauweise in ähnlicher Größenordnung wie im Referenzfall.

5.5.4 Einfluss der Annahme zur Solltemperatur

Änderungen in der Raumtemperatur wirken sich bedeutend auf den Heizwärmebedarf aus. Dies wird hier für Solltemperaturen 2 K unter bzw. 2 und 4 K über dem Referenzfall untersucht.

In dem Rahmen, in dem die von den Bewohnern eingestellten Temperaturen von einer Wohneinheit zur nächsten schwanken können, kann sich der Heizwärmebedarf um einen Faktor 2 ändern (siehe auch Tabelle). Höhere Temperaturen führen dabei – falls sich die Feuchtequellen nicht ändern – auch zu drastisch höheren Anteilen von relativen Feuchten unter 30% und bedeutend geringeren Minimalwerten der relativen Feuchte. Mit Feuchterückgewinnung kann dagegen auch bei höheren Lufttemperaturen eine ausreichende Luftfeuchte erreicht werden.

Die Gutschrift auf den Wärmebereitstellungsgrad liegt auch bei höheren Temperaturen in der gleichen Dimension wie im Referenzfall. Bei niedrigeren Temperaturen ist



die relative Feuchte höher, hier setzt bei einem Feuchteverhältnis von 0,6 bereits häufiger der zusätzliche Luftwechsel zur Feuchtebegrenzung ein.

	-2 K	Referenz	+2 K	+4 K
Heizwärmebedarf ohne FRG [kWh/(m ² a)] *	10,3	13,9	17,8	21,9
Anteil relative Feuchte unter 30% [%] *	0,7	2,4	12,6	28,5
minimale relative Feuchte [%] *	24,4	21,1	18,3	15,8
Gutschrift auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad **	0,6 %	4,5 %	5,3 %	5,6 %
minimale relative Feuchte [%] **	31,1	31,3	32,0	31,0

Tabelle 6: Vergleich verschiedener Ansätze für die Solltemperatur.

* ohne Feuchterückgewinnung, ** Feuchteverhältnis 0,6

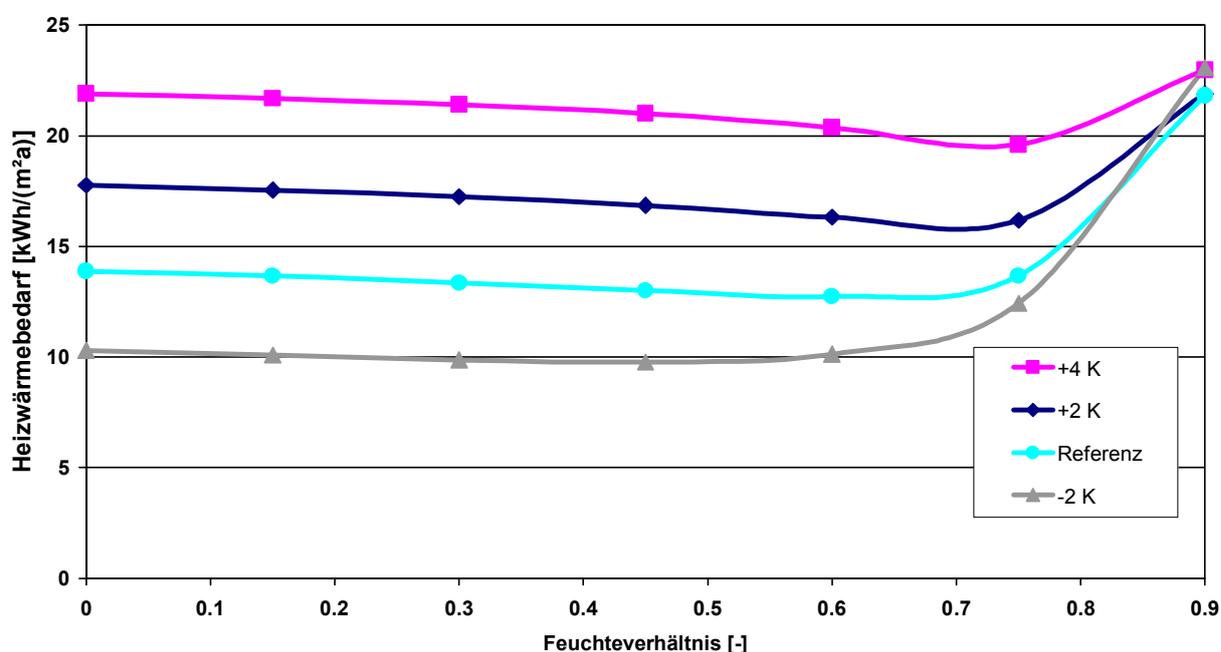


Abbildung 20: Bei höheren Solltemperaturen ist der energetische Einfluss der Feuchterückgewinnung größer, und es muss erst bei höheren Feuchteverhältnissen zusätzlich gelüftet werden, um überhöhte relative Feuchten zu vermeiden.

5.6 Luftbefeuchtung

In der Wohnungslüftung ist eine Luftbefeuchtung in aller Regel nicht notwendig; kurze Zeiträume mit relativen Feuchten unter 30% können nach derzeitigem Kenntnisstand noch als akzeptabel betrachtet werden. Sollen für Sonderanwendungen dennoch höhere relative Feuchten garantiert werden, wird eine Feuchterückgewinnung oder eine Luftbefeuchtung, ggf. auch beides, erforderlich. Nachfolgend wird untersucht, welcher Energieaufwand für eine solche Befeuchtung erforderlich wäre. Dazu wird in der Simulation die Raumluffteuchte auf einem Mindestwert von 30 bzw.



40 % gehalten, wie dies beispielsweise mit raumweisen Luftbefeuchtern möglich wäre. Eine Befeuchtung ist dabei fast ausschließlich in den Zuluftzonen erforderlich.

Im Referenzfall ohne Feuchterückgewinnung sinken die relativen Luftfeuchten nur in Ausnahmefällen unter 30 %. Selbst wenn man 40 % erreichen möchte, muss die relative Feuchte im Gebäude während des größten Teils des Jahres nur um wenige Prozentpunkte angehoben werden (vgl. Abbildung 19). Entsprechend gering ist der energetische (Nutz-)Mehrbedarf für die Luftbefeuchtung auf 30 %; er beträgt $0,17 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Werden mindestens 40 % relative Feuchte verlangt, würde bereits eine zusätzliche Befeuchtungsenergie von $3,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ benötigt. Diese wird zum Teil durch einen aufgrund der höheren Feuchte um $0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ reduzierten Heizwärmebedarf kompensiert. Höhere Werte der relativen Feuchte als 40 % können nicht ganzjährig erreicht werden, da andernfalls das Risiko der Schimmelbildung an kalten Oberflächen zu hoch werden würde.

Ist eine Feuchterückgewinnung mit einem Feuchteverhältnis von 60 % vorhanden, so ist bei einem Sollwert von 30 % r.F. keine Befeuchtung mehr erforderlich, bei einem Sollwert von 40 % r.F. ist der Befeuchtungs-Energieaufwand auf $0,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ gesunken. Entsprechend würde der anzurechnende Zuschlag auf den Wärmebereitstellungsgrad in diesem Fall 5,2 bzw. 13 Prozentpunkte betragen.

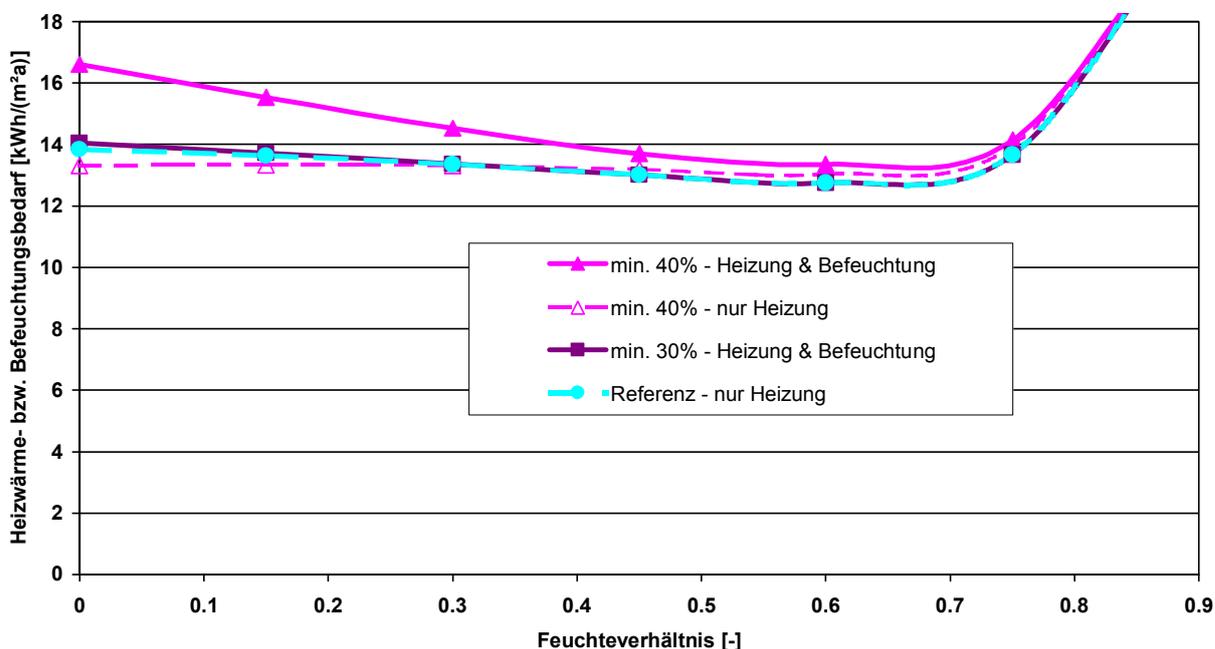


Abbildung 21: Bei hohen Feuchte-Sollwerten führt die Feuchterückgewinnung zu spürbaren Energieeinsparungen.

Im Regelfall wird die Luftbefeuchtung derzeit mit elektrischen Dampfluftbefeuchtern erfolgen, die Raumheizung wird man gewöhnlich auf primärenergetisch günstigere Weise realisieren. Der Wirkungsgrad des elektrischen Heizelements ist nahe 1, zu-



sätzlich zur Verdunstungsenthalpie muss das zu verdunstende Wasser jedoch zunächst auf eine Temperatur von 100 °C erwärmt werden. Die hierfür benötigte Wärme (ca. 15% der Verdunstungsenthalpie) kommt bei der Befeuchtung dem Raum zugute und reduziert den Heizwärmebedarf, hinzu kommen Wärmeverluste des Geräts.

Auf eine genauere Analyse dieser Prozesse wird hier verzichtet. Näherungsweise wird stattdessen für die reine Befeuchtung ein Primärenergiefaktor von 3 und für die Raumheizung ein Primärenergiefaktor von 1,15 angesetzt. Den resultierenden Primärenergiebedarf für Raumheizung und Befeuchtung zeigt Abbildung 22.

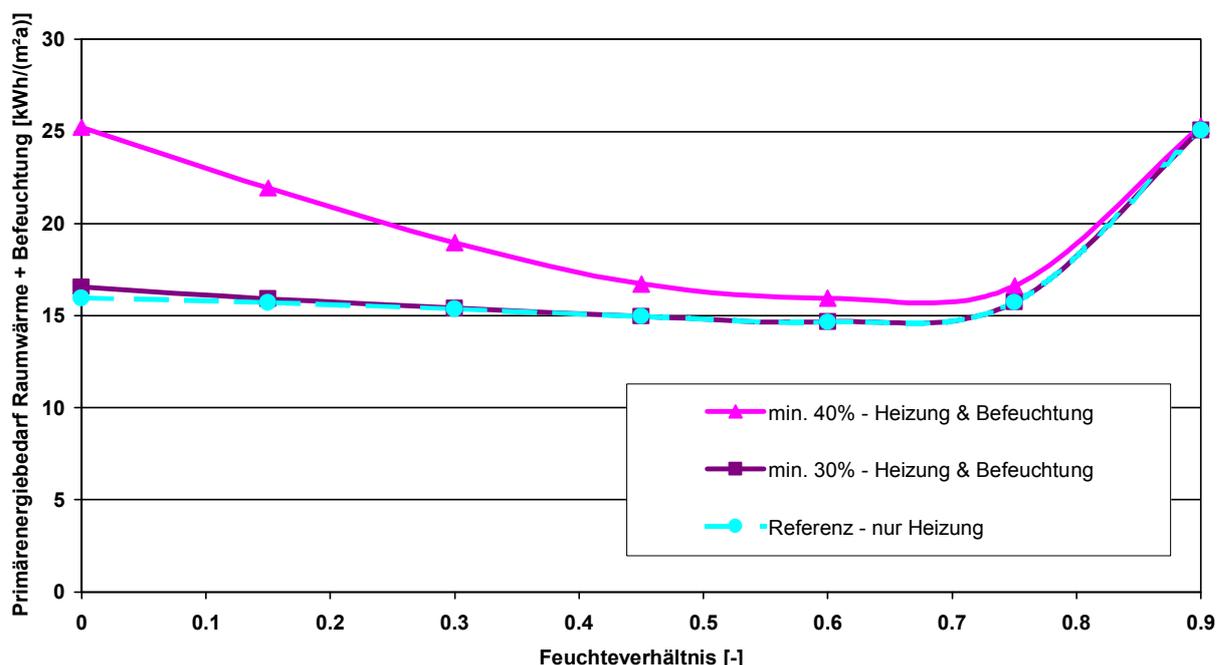


Abbildung 22: Bei Verwendung von Dampfluftbefeuchtern, aber einem primärenergetisch günstigen Heizsystem ist der Einfluss der Befeuchtung auf den Primärenergiebedarf besonders signifikant.

Neuere Entwicklungen von Raumluftbefeuchtern arbeiten über eine Benetzung großer Oberflächen und mit Verdunstung bei Raumtemperatur. In diesem Falle wird die Verdampfungsenthalpie primärenergetisch gesehen vom gleichen Wärmeerzeuger aufgebracht wie die sensible Heizwärme. Der Mehraufwand an Primärenergie für die Einhaltung eines Mindestgrenzwertes fällt damit entsprechend geringer aus als in Abbildung 22 dargestellt.



6 Ableitung von energetischen Bewertungsverfahren

Lüftungsanlagen mit Feuchterückgewinnung wirken sich, wie oben beschrieben, in verschiedener Weise auf den Energiehaushalt eines Gebäudes aus. Basierend auf den obigen Simulationsergebnissen werden diese Einflüsse nachfolgend einzeln im Hinblick auf die Heizwärmebilanz diskutiert.

6.1 Einfluss des reduzierten Kondensats im Wärmeübertrager

Feuchterückgewinnung würde bei konstanter Raumlufffeuchte zu einer Reduktion des Kondensatanfalls in der Lüftungswärmerückgewinnung führen und damit eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs zur Folge haben. Obwohl andererseits die Feuchterückgewinnung auch eine höhere Ablufffeuchte bewirkt, kann dieser Effekt tatsächlich beobachtet werden. Er hängt in stark nichtlinearer Weise von vielen Faktoren ab, etwa dem Klima, der Effizienz des Wärmeübertragers und der Größe der Feuchtequellen. In der Regel wird der Einfluss auf die Energiebilanz jedoch gering sein; im Beispiel führte die fehlende Kondensation zu einer Änderung des effektiven Wärmebereitstellungsgrades um weniger als einen Prozentpunkt.

6.2 Einfluss der reduzierten Verdunstung aus Bauteilen

Feuchterückgewinnung reduziert aufgrund der höheren durchschnittlichen Raumlufffeuchte die während der Heizperiode stattfindende Verdunstung von Feuchtigkeit aus den Bauteilen und der Möblierung. Da gegen Ende der Heizperiode die Außenluft- und damit die Raumlufffeuchte bereits wieder ansteigt, ist der Nettoeffekt durch diesen Mechanismus relativ gering; nur die Feuchtespeicherung in der Tiefe der Bauteile wirkt sich in der Jahresbilanz aus.

Die Größenordnung des Verdunstungseinflusses wird von der Art der Feuchtespeicherung in den Bauteilen (Größe der Speicher? oberflächennah? tieferliegende Speicher verfügbar?) bestimmt. Diese Details sind mit vertretbarem Aufwand nicht detailliert in Energiebilanzverfahren abzubilden. Die Sensitivitätsuntersuchung hat jedoch gezeigt, dass der Einfluss der Bauweise in üblichen Fällen gering ist.

6.3 Einfluss der reduzierten Wärmeverluste bei reduzierter operativer Temperatur

Die höhere Raumlufffeuchte führt zu einer reduzierten Komforttemperatur und damit zu einer Heizwärmeeinsparung, die in guter Näherung proportional zum Anstieg der mittleren Raumlufffeuchte ist. Dabei ist es gleichgültig, ob man sich auf die absolute oder die relative Feuchte bezieht, da die Raumlufftemperatur in beheizten Räumen diesbezüglich hinreichend konstant ist. Ein Zuschlag auf den effektiven Wärme-



bereitstellungsgrad, mit dem dieser Effekt berücksichtigt werden kann, hängt vom Verhältnis von Lüftungs- und Transmissionswärmeverlusten ab. Angebracht wäre daher eigentlich eine Anpassung der im Energiebilanzverfahren angesetzten Raumtemperatur je nach Feuchteverhältnis der Wärmerückgewinnung. Ein solcher Ansatz führt letztlich aber zu einem komplizierteren Bewertungsverfahren, welches angesichts der erreichbaren Genauigkeit kaum zu rechtfertigen ist.

6.4 Erhöhte interne Wärmegewinne bei höherer Raumlufffeuchte

Die höhere Raumlufffeuchte führt zu höheren sensiblen und geringeren latenten Wärmeabgaben von Personen und anderen Quellen. Der Netto-Anstieg der sensiblen Wärme ist in guter Näherung proportional zum Anstieg der Raumlufffeuchte. Für die Berücksichtigung in der Energiebilanz wären daher entsprechend erhöhte interne Wärmegewinne am ehesten angemessen. Auch hier erscheint die höhere Komplexität des Bewertungsaufwandes beim systematisch richtigeren Ansatz nicht gerechtfertigt.

6.5 Strombedarf

Der Energiebedarf für eine Außenluftvorheizung zum Frostschutz kann durch die Feuchterückgewinnung in bestimmten Fällen reduziert werden oder sogar entfallen. Dies führt in der Energiebilanz jedoch nicht zu geringeren effektiven Lüftungswärmeverlusten. Eine Gutschrift auf den Wärmebereitstellungsgrad ist daher nicht angebracht; die Einsparung ist jedoch – bei nachgewiesener Funktionsfähigkeit des Geräts auch ohne Frostschutz, vgl. Abbildung 17 – bei der Berechnung des Primärenergiebedarfs des Gebäudes zu berücksichtigen.

Umgekehrt muss in Fällen, in denen die Raumlufffeuchte durch einen erhöhten Volumenstrom nach oben begrenzt wird, der dadurch induzierte zusätzliche Strombedarf in der Primärenergiebilanz zu berücksichtigen. Der Strombedarf des Lüftungsgeräts ist also für den tatsächlichen mittleren Betriebspunkt zu bestimmen; idealerweise wären sogar die Nichtlinearitäten im Stromverbrauch bei verschiedenen Volumenströmen zu berücksichtigen.

6.6 Reduzierung der Energieeinsparung durch feuchtebedingte Regelung des Volumenstromes bzw. der Rotordrehzahl

Die Art der Begrenzung der Raumlufffeuchte nach oben ist der kritische Punkt in Konzepten für Wohnungslüftung mit Feuchterückgewinnung. Prinzipiell sind hier Sorptionsrotoren im Vorteil, bei denen in gewissen Grenzen die Feuchterückgewinnung ohne bedeutenden Einfluss auf die Wärmerückgewinnung reduziert werden kann. Die außentemperaturgeführte Anpassung der Rotordrehzahl allein hat sich bezüglich der Vermeidung von Kondensat bzw. Schimmelpilzrisiko als nicht aus-



reichend erwiesen. Wie bei den unregulierten Wärmeübertragern mit Membran ist zeitweise zusätzlich eine Erhöhung des Volumenstroms erforderlich, der durch Erhöhung des Heizwärmebedarfs einen Teil der Einsparung wieder zunichte macht. Beim Rotor fällt diese Erhöhung jedoch geringer aus.

Die Größe des zusätzlichen Wärmebedarfs hängt stark nichtlinear von der sich einstellenden Raumlufffeuchte, der Charakteristik des Lüftungsgeräts und der Art der zusätzlichen Lüftung ab. Eine einfache Begrenzung der relativen Feuchte auf einen konstanten Maximalwert hat sich in den Simulationen als kritisch erwiesen: Sie führt zu bedeutenden Mehrverbräuchen, ohne in den kältesten Perioden die Luftfeuchte weit genug abzusenken, um Schimmelbildung sicher zu vermeiden. Die Erhöhung des Luftvolumenstroms muss zusätzlich von der Außentemperatur abhängen. Insbesondere bei einem hohen, fixen Feuchteverhältnis des Lüftungsgeräts könnte sogar ein zusätzlicher Fensterluftwechsel die effizientere Lösung zur Absenkung der Raumlufffeuchte sein. Bei Plattenwärmeübertragern ist der Einsatz einer zusätzlichen Kassette ohne Feuchterückgewinnung zu erwägen; der zugehörige Nutzer-eingriff setzt aber eine detaillierte Anleitung (bzw. Anzeige der korrekten Kassette am Lüftungs-Bediengerät) voraus.

In den Simulationen hat die erforderliche Begrenzung der Raumlufffeuchte nach oben nicht nur die Heizwärmeeinsparung durch Feuchterückgewinnung reduziert, sondern auch dazu geführt, dass oberhalb eines Feuchteverhältnisses von ca. 0,6 keine positiven Effekte der Feuchterückgewinnung mehr erzielt werden konnten. Eine Ausnahme bilden hier Systeme mit regelbarem Feuchteverhältnis.

6.7 Erhöhung des Lüftungsvolumenstroms

Bei hohen Feuchteverhältnissen ist eine Erhöhung des Volumenstroms der Lüftungsanlage erforderlich, um eine ausreichende Feuchteabfuhr zu gewährleisten. Dieser Volumenstrom müsste prinzipiell projektspezifisch ermittelt und in der Energiebilanz berücksichtigt werden.

Für die praktische Anwendung in mitteleuropäischen Wohngebäuden mit typischer Nutzung kann man eine vereinfachte Formel ermitteln. Hier hat sich für unregulerte Feuchterückgewinnung gezeigt, dass eine Erhöhung des Volumenstroms oberhalb eines Feuchteverhältnisses von 0,6 notwendig wird. Daraus ergibt sich folgende Herleitung für den anzusetzenden Volumenstrom.

Hygrisch wirksamer Anteil des Volumenstroms:

$$\dot{V}_{eff,x}(\eta_x) = (1 - \eta_x)\dot{V}$$

Erforderlicher hygrisch wirksamer Volumenstrom (bei Feuchteverhältnis 0,6):

$$\dot{V}_{eff,x,erf} = (1 - 0,6)\dot{V}_0$$



Darin ist \dot{V}_0 der für die Abfuhr der übrigen Luftschadstoffe erforderliche Luftwechsel, der bis zu einem Feuchteverhältnis von 0,6 ausreichend ist. Fordert man nun, dass stets mindestens der erforderliche hygrysch wirksame Volumenstrom erreicht wird, d.h. setzt man

$$\dot{V}_{eff,x,erf} = \dot{V}_{eff,x}(\eta_x),$$

so ergibt sich ein Mindestvolumenstrom von

$$\dot{V}_{min} = \frac{0,4}{(1-\eta_x)} \dot{V}_0$$

6.8 Einsparung von Energie für ggf. notwendige Befeuchtung

In der Regel existieren keine den Temperaturanforderungen vergleichbaren Anforderungen an die Raumlufffeuchte, sondern die Feuchte kann in weiten Grenzen schwanken, ohne den Komfort zu beeinträchtigen; kurzzeitig niedrige Feuchten können sogar insgesamt positive Effekte auf das Raumklima haben. Soll dennoch eine bestimmte minimale Raumlufffeuchte gewährleistet werden, so kann der Energiebedarf für die aktive Befeuchtung durch Feuchterückgewinnung bedeutend reduziert oder ganz vermieden werden. Im Beispiel aus Abschnitt 5.6 kann bei einer Sollfeuchte von 40% durch Feuchterückgewinnung eine Einsparung von 3 kWh/(m²a) erzielt werden, wobei es sich in vielen Fällen um hochwertige elektrische Energie handeln wird.

Bei der diesbezüglich einzusetzenden Energie handelt es sich nicht eigentlich um Heizwärme; da außerdem die genannten Mindestanforderungen eher eine Ausnahme darstellen, wird empfohlen, einen etwaigen Befeuchtungsbedarf unabhängig von der Heizwärme zu betrachten.

6.9 Enthalpischer Wirkungsgrad

Nach dem Prüfrelement für Wohnungslüftungsgeräte des DIBt wird der Wärmebereitstellungsgrad ermittelt zu

$$\eta'_w = \frac{\dot{H}_{Zu} - \dot{H}_{Au}}{\dot{H}_{Zu}^* - \dot{H}_{Au}}$$

Darin ist $\dot{H}_{Zu}^* = \dot{H}(T_{Ab}, x_{au})$. Dieser Wert beschreibt also die insgesamt auf die Zuluft übertragene Enthalpie, bezogen auf den maximal möglichen trockenen Wärmeübertrag. η'_w kann bei Geräten mit Feuchterückgewinnung leicht größer als 100% werden. Die folgende Tabelle gibt (unter Vernachlässigung des Ventilatorstroms) einige Beispielwerte für η'_w an, die sich ergeben, wenn die in dieser Studie standardmäßig verwendeten Werte von 85% trockenem Wärmebereitstellungsgrad und 60% Feuchteverhältnis angesetzt werden.



	T_{au}	T_{ab}	ϕ_{au}	ϕ_{ab}	η'_{w}
Prüfpunkt 1 DIBt	-3	21	0,8	0,36	1,12
Prüfpunkt 2 DIBt	4	21	0,8	0,46	1,23
Prüfpunkt 3 DIBt	10	21	0,8	0,56	1,34
Mittelwert Simulation im Referenzfall während der Heizperiode					1,26

Tabelle 7: Enthalpischer Wärmebereitstellungsgrad nach DIBt. Die letzte Zeile gibt für den Referenzfall, ohne zusätzliche Lüftung zur Begrenzung der Raumluftfeuchte, einen Mittelwert über alle Stunden, in denen geheizt werden musste, an.

Wie bereits die Definition nahelegt, setzt der so definierte „enthalpische Wirkungsgrad“ implizit voraus, dass die gesamte zurückgewonnene Feuchte sonst mittels eines aktiven Systems bereitgestellt werden müsste. Wie nicht zuletzt die obigen Simulationsrechnungen zeigen, ist das keineswegs der Fall: Die rückgewonnene Feuchte wird während eines Großteils des Jahres nicht benötigt oder muss sogar mit zusätzlichem Energieaufwand abgeführt werden. Es gibt dementsprechend auch Gerätezulassungen des DIBt, die nur einen Teil der Feuchterückgewinnung anzurechnen gestatten. Vor diesem Hintergrund wird die Verwendung des so definierten Wärmebereitstellungsgrades für Energiebilanzverfahren hier nicht empfohlen.



7 Schlussfolgerungen

In den Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass durch Feuchterückgewinnung tatsächlich unerwünscht niedrige Raumlufffeuchten vermieden werden können. Bei einem Feuchteverhältnis von 60% treten bei mittleren Feuchtequellen kaum noch Raumlufffeuchten unter 40% auf; selbst bei stark reduzierten Feuchtequellen sinkt die Raumlufffeuchte nicht mehr unter 30%.

Abhängig vom eingesetzten System und von den zu erwartenden Feuchtequellen ist bei der Planung darauf zu achten, dass durch die Feuchterückgewinnung keine überhöhten Feuchten mit dem Risiko von Schimmelbildung im Bereich von Wärmebrücken auftreten. Wird zur Entfeuchtung ein deutlich erhöhter Luftwechsel erforderlich, resultiert dies in einem erheblichen Energieeinsatz, der den Effekt der Lüftungswärmerückgewinnung konterkariert.

Eine korrekte Berücksichtigung der energetischen Einzelwirkungen der Feuchterückgewinnung im Energiebilanzverfahren würde idealerweise Korrekturen an den verschiedensten Stellen erfordern; bei einigen Wirkmechanismen erscheint eine physikalisch motivierte Repräsentation in vereinfachten Bilanzverfahren schlicht unmöglich.

Diese Überlegung führt auf folgenden Vorschlag für Energiebilanzverfahren wie das PHPP:

Wohnungslüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung erhalten – bei Nachweis einer geeigneten Methode zur Vermeidung von Schimmelpilzrisiko – einen Zuschlag auf den effektiven Wärmebereitstellungsgrad in Höhe von $0,08 \eta_x$. Der Zuschlag darf einen Wert von $0,05$, entsprechend einem Feuchteverhältnis von $0,625$, nicht überschreiten, es sei denn, es erfolgt im Einzelfall ein Nachweis einer geeigneten Feuchteregelung.

Bei der Verwendung in Energiebilanzverfahren ist zu beachten, dass die so ermittelte Energieeinsparung nur dann wirksam wird, wenn die zu erwartenden Feuchtequellen im Gebäude eine Feuchterückgewinnung angeraten erscheinen lassen. Mit der Feuchterückgewinnung zusammenhängende Mehr- oder Minderverbräuche, etwa durch erhöhten Luftwechsel zur Feuchteabfuhr oder durch Wegfall des Frostschutzheizregisters, sind projektspezifisch zu bilanzieren.

Typischerweise wird in mitteleuropäischen Passivhäusern für konstante Feuchteverhältnisse über $0,6$ eine Erhöhung des Luftvolumenstroms um den Faktor $0,4/(1-\eta_x)$ erforderlich.



8 Literatur

- [Andersen 1972] Andersen, I. B.; Lundqvist, G. R.; Proctor, D. F.: Human nasal mucosal function under four controlled humidities. *Am. Rev. Respir. Dis.* 106 (1972), S. 438-449.
- [Andersen 1974] Andersen, I. B.; Lundqvist, G. R.; Jensen, P. L.; Proctor, D. F.: Human response to 78-hour exposure to dry air. *Arch. Environm. Health* 29 (1974), S. 319-342.
- [Arundel 1986] Arundel, A. V.; Sterling, E. M.; Biggin, J. H.; Sterling, T. D.: Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environm. Health Perspect.* 65 (1986) Nr. 3, S. 351-361.
- [Baartz 1996] Baartz, F.-J.: die hautwasserabgabe des Menschen unter extremen Umweltbedingungen, Meteorologische Abhandlungen, Serie A, band 9, Heft 2, Verlag von Dietrich reimer, Berlin 1996
- [Backmann 1999] Backman, H.; Haghghat, F.: Indoor-air quality and ocular discomfort. *J. Am. Optom. Assoc.* 70 (1999), S. 309-316.
- [BGIA 2005] Report Innenraumarbeitsplätze BGIA/HVBG, 2005
- [EN 13779] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen. Berlin: Beuth 2005.
- [Engelhart 2000] Engelhart S.: Biologische Innenraumlufverunreinigungen, Abschnitt III-4.3, handbuch für bioklima und Lufthygiene – 3. Erg. Lfg. 3/2000
- [Fang 1998a] Fang, L.; Clausen, G.; Fanger, P. O.: Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality. *Indoor Air* 8 (1998), S. 80-90.
- [Fang 1998b] Fang, L.; Clausen, G.; Fanger, P. O.: Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality during immediate and longer whole-body exposures. *Indoor Air* 8 (1998), S. 276-284.
- [Fang 2004] Fang, L.; Wyon, D. P.; Clausen, G.; Fanger, P. O.: Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. *Indoor Air* 14 (2004), S. 74-81.
- [Feist 1994] Feist, Wolfgang: Interne Gewinne werden überschätzt. *Sonnenenergie & Wärmetechnik* 1/94
- [Feist 1999] Feist, Wolfgang: Das Passivhaus-Konzept für den Sommerfall. In: Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 15: Passivhaus-Sommerfall. Passivhaus Institut, Darmstadt 1999
- [Feist 2003] Feist, Wolfgang: Perspektiven für die Modernisierung des Bestandes mit hocheffizienten Komponenten, Protokollband Nr. 24, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Darmstadt, Sept. 2003



[Feist 2003a] Feist, Wolfgang: Wärmebrücken und Verbesserung der Luftdichtheit im Altbau, Protokollband Nr. 24, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Phase III, Darmstadt, Sept. 2003

[Feldstudien] Feldstudien zu Erkältungskrankheiten:

Sale, C. S.: Humidification during the cold weather to assist perennial allergic rhinitis patients. Ann. Allergy 29 (1971), S. 356-357.

Gelperin, A.: Humidification and upper respiratory infection incidence. Heat. Pip. Air Condit. 45 (1973), S. 77-78.

Green, G. H.: The effect of indoor relative humidity on absenteeism and colds in schools. ASHRAE Trans. 80 (1974), S. 131-141.

Green, G. H.: Indoor relative humidities in winter and the related absenteeism. ASHRAE Trans. 91 (1985), S. 643-653.

Fiedler, K.; Hoyer, H.: Logistische Regressionsanalysen zum Einfluss von Wohnumwelt, Wohnhygiene und Lebensweise auf die Häufigkeit und Dauer akuter respiratorischer Erkrankungen bei Kleinkindern. Zbl. Hyg. 198 (1996), S. 204-214.

Fiedler, K.: Luftfeuchtigkeit und Gesundheit. Wohnmedizin 36 (1998), S. 67-69.

Nagda, L.; Hodgson, M.: Low relative humidity and aircraft cabin air quality. Indoor Air 11 (2001), S. 200-214.

Mendell, M. J.: Non-specific symptoms in office workers: a review and summary of the epidemiologic literature. Indoor Air 3 (1993), S. 227-236.

[Furter 2008] Furter, Rudolf und Patrick Keller: Prüfbericht Nr: HP-07653, Lüftungsgerät Homevent RS180. Hochschule für Technik und Architektur Luzern, Prüfstelle HLK, Luzern, Juni 2008

[Gassel 2003] Gassel, R. P.: Innenraumbehaglichkeit. Wohnmedizin 41 (2003), S. 57-60.

[Genath 2008] Genath, Bernd: Wärmerückgewinnung: Neue Bezugsgröße zur Beschreibung der Effizienz von Rotationswärmeübertragern. Der Kunstgriff mit dem Kondensationspotenzial. www.cci-promotor.de/archiv/wrg.htm, Zugriff am 12.6.2008, 19:15

[Green 1982] Green, G. H.: The positive and negative effects on building humidification. ASHRAE Trans. 88 (1982), S. 1049-1061.

[Guggenbichler 2007] Guggenbichler, Peter; Hüster, Rudolf; Geiger, Stephan: Luftfeuchtigkeit und Immunabwehr. Die Rolle der Schleimhaut und Auswirkungen auf die Klimatechnik, TAB TECHNIK AM BAU Jg.: 38, Nr.9, 2007 Seite 66-68

[Hahn 2007] Hahn, von N.: „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie, Innenraumluft 67 (2007) Nr. 3, März 2007



[Hartmann 2001] Hartmann, Thomas, Ralf Gritzki, Jens Bolsius, André Kremonke, Alf Perschk, and Wolfgang Richter: Bedarfslüftung im Wohnungsbau. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2001

[Hemmes 1960] Hemmes, J. H.; Winkler, K. C.; Kool, S. M.: Virus survival as a seasonal factor in influenza and poliomyelitis. *Nature* 188 (1960), S. 430-431.

[Höppe 1992] Höppe, P.: Die Bedeutung der Luftfeuchtigkeit für das Raumklima. *Ann. Met.* 28 (1992), S. 161-164.

[Koch 1960] Koch, W.; Jennings, B. H.; Humphreys, C. M.: Environmental study II – Sensation responses to temperature and humidity under still air conditions in the comfort range. *ASHRAE Trans.* 66 (1960), S. 264-287.

[Künzel 1994] Künzel, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994

[Laviana 1988] Laviana, J. E.; Rohles, F. H.; Bullock, P. E.: Humidity, comfort and contact lenses. *ASHRAE Trans.* 94 (1988), S. 3-11.

[Lazzarin 2004] Lazzarin, Renato; Nalini, Luigi. Just a drop of water. *Carel S.p.A.* Ausschnitte in *Refrigeration World*. June 04 and September 04

[Lowen 2007] Lowen, A. et al.: Influenza Virus Transmission Is Dependent on Relative Humidity and Temperature, *PLoS Pathogens* (2007)

[Lubart 1979] Lubart, J.: Health care cost containment. *Am. J. Otolaryngol.* 1 (1979), S. 81-83.

[McIntyre 1978] McIntyre, D. A.: Response to atmospheric humidity at comfortable air temperature: A comparison of three experiments. *Ann. Occup. Hyg.* 21 (1978) Nr. 2, S. 177-190.

[Moosberger 2007] Moosberger, Sven: Feuchte in Niedrigenergiebauten. Thermisch-hygrische Raumsimulation zur Ermittlung des Einflusses der Lüftungsstrategie auf die Raumlufffeuchte. *HTA Luzern*, Juli 2007.

[Nordström 1994] Nordström, K.; Norbäck, D.; Akseleson, R.: Effect of air humidification on the sick building syndrome and perceived indoor air quality in hospitals: A four month longitudinal study. *Occup. Environm. Med.* 51 (1994), S. 683-688.

[PHPP 2007] Feist, Wolfgang (Hrsg.): *Passivhaus Projektierungs Paket 2007*, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. Darmstadt, Passivhaus Institut, 2007

[Reinikainen 1992] Reinikainen, L. M.; Jaakkola, J. J. K.; Seppänen, O.: The effect of air humidification on symptoms and perception of indoor air quality in office workers – A six-period cross-over trial. *Arch. Environm. Health* 47 (1992), S. 8-15.



- [Reinikainen 1992] Reinikainen, L.M.; Jaakkola, J.J.K.; Seppänen, O.: On the effect of air humidification on symptoms and perception of indoor air quality in office workers – A six-period cross-over trial. *Arch. Environm. Health* 47 (1992), S. 8-15.
- [Reinikainen 1997] Reinikainen, L. M.; Aunela-Tapola, L.; Jaakkola, J. J. K.: Humidification and perceived indoor air quality in the office environment. *Occup. Environm. Med.* 54 (1997), S. 322-327.
- [Rietschel 1888] Rietschel, H.: Über das „Sättigungsdefizit“ als Maßstab für den angemessenen Feuchtigkeitsgehalt der Luft erwärmter Räume, *GI No 1*, 1888, S. 1-9
- [Sale 1972] Sale, C. S.: Humidification to reduce respiratory illnesses in nursery school children. *South. Med. J.* 65 (1972), S. 882-885.
- [Sato 2003] Sato, M.; Fukayo, S.; Yano, E.: Adverse environmental health effects of ultra-low relative humidity indoor air. *J. Occup. Health* 45 (2003), S. 133-136.
- [Schneider 2003] Schneider, U., F. Oettl, B. Quiring, et.al.: themenwohnen musik, Entwicklung eines urbanen Stützpunktes für Musiker. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2003
- [Schnieders 2004] Schnieders, Jürgen: Simulationen zur Effizienz der Wärmeübergabe. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 28, Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2004
- [Sommer, 1994] Sommer, H.; Johnen, J.; Schongen, P.; Stolze, H.: Adaptation of the tear film to work in air-conditioned rooms (office-eye syndrome). *Ger. J. Ophthalmol.* 3 (1994), S. 406-408.
- [Spiegl 1998] Spiegl, A.: Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Hautrauhigkeit bei Patienten mit atopischem Ekzem. Dissertation Universität München 1998.
- [Strauss 1978] Strauss, R. H.; McFadden, E. R.; Ingram, R. H.; Deal, E. C.; Jaeger, J. J.: Influence of heat and humidity on the airway obstruction induced by exercise in asthma. *J. Clin. Invest.* 61 (1978) Nr. 2, S. 433-440.
- [Sundell 1993] Sundell, J.; Lindvall, T.: Indoor air humidity and sensation of dryness as risk indicators of SBS. *Indoor Air* 3 (1993), S. 382-390.
- [Toftum 1998] Toftum, H.; Jorgensen, A. S.; Fanger, P. O.: Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort. *Energy and Buildings* 28 (1998), S. 15-23.
- [White 1982] White, I. R.; Rycroft, R. J. G.: Low humidity occupational dermatosis – an epidemic. *Contact Dermatitis* 8 (1982), S. 287-290.



Anhang A: Bauteilaufbauten

Nachfolgend werden die Bauteilaufbauten der opaken Bauteile zusammengefasst. Die Bauteilschichten sind jeweils von außen nach innen aufgelistet.

Opake thermische Hülle des Referenz-Passivhauses

Kellerdecke				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.11	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			700	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7
Mineralwolle	30	45	0.85	0.035
Betondecke	25	2400	1.08	1.5
Holzparkett	2	600	1.98	0.13

Außenwand				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.11	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			182	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Mineralischer Putz	1.5	1900	0.85	0.8
EPS	30	18	1.21	0.033
Ziegelmauerwerk	11.5	1400	0.836	0.58
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7

Dach Leichtbau				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.08	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			142	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Betondachsteine	4	2000	1.08	1.4
Luftschicht (10% Holz)	2	42	0.272	0.13
EPS	40	30	1.8	0.035
Spanplatte	1.3	600	1.98	0.13
Luftschicht (10% Holz)	9	42	0.272	0.452
Gipsbauplatte	1.5	1200	0.936	0.21


Innenbauteile des Referenz-Passivhauses

Trennwand				
U-Wert [W/(m ² K)]			2.0	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			168	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7
Ziegelmauerwerk	11.5	1400	0.836	0.58
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7

Zwischendecke				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.91	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			564	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7
Beton	16	2400	1.08	1.5
Trittschalldämmung	2.6214	45	0.85	0.05
Zementestrich	5	2000	1.08	1.4
Holzparkett	2	600	1.98	0.13

Haustrennwand zum Nachbargebäude				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.46	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			271	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Ziegelmauerwerk	11.5	1400	0.836	0.58
Mineralwolle	6	45	0.85	0.04
Ziegelmauerwerk	11.5	1400	0.836	0.58


Leichte und schwere Gebäudehülle

Alle leichten und schweren Konstruktionen wurden so aufgebaut, dass sie exakt dieselben U-Werte wie die entsprechenden Bauteile des Referenz-Passivhauses besitzen.

Leichte Kellerdecke				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.11	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			66	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Luft und Holzbalken	10	82	0.544	5.3
Spanplatte	2.2	600	1.98	0.13
Mineralwolle	30	45	0.85	0.035
Holzparkett	2	600	1.98	0.13

Leichte Außenwand				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.11	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			98	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
OSB-Platte	1.3	600	1.98	0.13
Luft + 10% Holz	44.9	41.5	2.72	1.1937
Gipsbauplatte	1.5	1200	0.936	0.21

Schweres Dach				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.08	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			488	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Betondachsteine	4	2000	1.08	1.4
Luftschicht (10% Holz)	2	42	0.272	0.13
EPS	40	30	1.8	0.035
Mineralwolle (zur U-Wert-Anpassung)	1.279	45	0.85	0.05
Beton	14	2400	1.08	1.5
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7


Leichte und schwere Innenbauteile

Alle leichten und schweren Konstruktionen wurden so aufgebaut, dass sie exakt dieselben U-Werte wie die entsprechenden Bauteile des Referenz-Passivhauses besitzen.

Leichte Trennwand				
U-Wert [W/(m ² K)]			2.0	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			35	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Gipsbauplatte	1.5	1200	0.936	0.21
Mineralwolle mit Holzständern	0.6879	57.7	2.296	0.07
Gipsbauplatte	1.5	1200	0.936	0.21

Schwere Trennwand				
U-Wert [W/(m ² K)]			2.0	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			448	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7
Beton	16	2400	1.08	0.807
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7

Leichte Haustrennwand zum Nachbargebäude				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.46	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			35	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Spanplatte	1.3	600	1.98	0.13
Mineralwolle mit Holzständern	11.282	45	0.85	0.0665
Spanplatte	1.3	600	1.98	0.13

Schwere Haustrennwand zum Nachbargebäude				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.46	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			832	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Beton	16	2400	1.08	1.5
Mineralwolle	6.733	45	0.85	0.04
Beton	16	2400	1.08	1.5

Leichte Zwischendecke				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.91	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			55	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Luft und Holzbalken	10	82	0.544	5.3
Spanplatte	2.2	600	1.98	0.13
Trittschalldämmung	2.5	45	0.85	0.05
Holzparkett	2	600	1.98	0.13



Schwere Zwischendecke				
U-Wert [W/(m ² K)]			0.91	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			841	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
Gipsputz	1.5	1200	0.936	0.7
Beton	25	2400	1.08	1.5
Trittschalldämmung	2.2499	45	0.85	0.05
Zementestrich	7	2000	1.08	1.4
Holzparkett	2	600	1.98	0.13

Andere Bauteile

Kellerwand gegen Erdreich				
U-Wert [W/(m ² K)]			4.1	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			403	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
XPS	0...10	30	1.8	0.035
Beton	17.5	2300	1.0	2.3

Kellerboden gegen Erdreich				
U-Wert [W/(m ² K)]			3.6	
Gesamte Wärmekapazität [kJ/(m ² K)]			575	
Material	Dicke d [cm]	Dichte ρ [kg/m ³]	Wärmekapazität C [kJ/(kgK)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]
XPS	0...10	30	1.8	0.035
Beton	25	2300	1.0	2.3



Anhang B: Verteilung der Wärme- und Feuchtequellen

In diesem Abschnitt werden die internen Wärme- und Feuchtequellen für die drei in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Szenarien Standard, Niedrig und Hoch im Einzelnen aufgelistet. Dabei wird aus Platzgründen nur der hier hauptsächlich interessierende Winterfall dokumentiert. Im Sommer sind die Feuchtelasten höher, die Wärmelasten geringer.



Interne Wärmequellen [W], Szenario: Standard Winter							
	Zeitraum	6-8	8-12	12-14	14-19	19-22	22-6
Zone	Art IWQ						
1 EG Wohnen und Küche	Geschirrspüler				78.5		
	Wäscheleine			0.0	0.0	0.0	
	Kühlen	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8	60.8
	Kochen	85.6		85.6		85.6	
	Beleuchtung	66.8				66.8	
	Sonstiges	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
	Personen	140.0		98.0	19.6	84.0	
	Kaltwasser	-19.5	-19.5	-19.5	-19.5	-19.5	-19.5
	Warmwasser	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8
	Verdunstung	-13.6	-43.4	-43.4	-43.4	-13.6	-13.6
2 EG WC	Beleuchtung	2.9				2.9	
	Sonstiges	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	Personen						
	Kaltwasser	-39.0	-39.0	-39.0	-39.0	-39.0	-39.0
	Warmwasser	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
	Verdunstung	-0.6	-1.9	-1.9	-1.9	-0.6	-0.6
3 Flur/Treppe	Beleuchtung	14.2				14.2	
	Sonstiges	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9
	Verdunstung	-2.9	-9.2	-9.2	-9.2	-2.9	-2.9
4 OG Kinder	Beleuchtung	28.0				28.0	
	Sonstiges	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9
	Personen	84.0			19.6	50.4	120.0
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	-5.7	-18.2	-18.2	-18.2	-5.7	-5.7
5 OG Schlaf	Beleuchtung	21.4				21.4	
	Sonstiges	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	Personen						160.0
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	-4.4	-13.9	-13.9	-13.9	-4.4	-4.4
6 OG Bad	Waschen		78.9				
	Trocknen			0.0			
	Beleuchtung	9.6				9.6	
	Sonstiges	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	Personen	56.0				33.6	
	Kaltwasser	-39.0	-39.0	-39.0	-39.0	-39.0	-39.0
	Warmwasser	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
	Verdunstung	-2.0	-64.6	-6.3	-6.3	-2.0	-60.3
7 UG							
8 DG	WW-Speicher	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	Hilfsstrom	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Warmwasser	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9



Interne Feuchtequellen [g/h], Szenario: Standard Winter							
Zone	Zeitraum	6-8	8-12	12-14	14-19	19-22	22-6
1 EG Wohnen und Küche	Art IWQ						
	Geschirrspüler						
	Wäscheleine			0.0	0.0	0.0	
	Kühlen						
	Kochen	84.0		84.0		84.0	
	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	112.0		78.4	15.7	67.2	
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
Verdunstung	19.3	61.3	61.3	61.3	19.3	19.3	
2 EG WC	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	0.8	2.6	2.6	2.6	0.8	0.8
3 Flur/Treppe	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	4.1	13.0	13.0	13.0	4.1	4.1
4 OG Kinder	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	67.2			15.7	40.3	96.0
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	8.1	25.7	25.7	25.7	8.1	8.1
5 OG Schlaf	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						128.0
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	6.2	19.7	19.7	19.7	6.2	6.2
6 OG Bad	Waschen						
	Trocknen			0.0			
	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	44.8				26.9	
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	2.8	91.2	8.8	8.8	2.8	85.1
7 UG							
8 DG	WW-Speicher						
	Hilfsstrom						
	Warmwasser						



Interne Wärmequellen [W], Szenario: Niedrig Winter							
Zone	Zeitraum	6-8	8-12	12-14	14-19	19-22	22-6
1 EG Wohnen und Küche	Art IWQ						
	Geschirrspüler				82.3		
	Wäscheleine			0.0	0.0	0.0	
	Kühlen	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7
	Kochen	48.9		48.9		48.9	
	Beleuchtung	38.2				38.2	
	Sonstiges	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	Personen	80.0		56.0	11.2	48.0	
	Kaltwasser	-11.1	-11.1	-11.1	-11.1	-11.1	-11.1
	Warmwasser	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
Verdunstung	-3.1	-9.9	-9.9	-9.9	-3.1	-3.1	
2 EG WC	Beleuchtung	1.6				1.6	
	Sonstiges	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	Personen						
	Kaltwasser	-22.3	-22.3	-22.3	-22.3	-22.3	-22.3
	Warmwasser	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	Verdunstung	-0.1	-0.4	-0.4	-0.4	-0.1	-0.1
3 Flur/Treppe	Beleuchtung	8.1				8.1	
	Sonstiges	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	Verdunstung	-0.7	-2.1	-2.1	-2.1	-0.7	-0.7
4 OG Kinder	Beleuchtung	16.0				16.0	
	Sonstiges	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
	Personen	48.0			11.2	28.8	68.6
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	-1.3	-4.2	-4.2	-4.2	-1.3	-1.3
5 OG Schlaf	Beleuchtung	12.3				12.3	
	Sonstiges	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	Personen						91.4
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	-1.0	-3.2	-3.2	-3.2	-1.0	-1.0
6 OG Bad	Waschen		77.9				
	Trocknen			1171.7			
	Beleuchtung	5.5				5.5	
	Sonstiges	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	Personen	32.0				19.2	
	Kaltwasser	-22.3	-22.3	-22.3	-22.3	-22.3	-22.3
	Warmwasser	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
	Verdunstung	-0.5	-14.8	-1.4	-1.4	-0.5	-13.8
7 UG							
8 DG	WW-Speicher	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Hilfsstrom	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Warmwasser	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2



Interne Feuchtequellen [g/h], Szenario: Niedrig Winter							
	Zeitraum	6-8	8-12	12-14	14-19	19-22	22-6
Zone	Art IWQ						
1 EG Wohnen und Küche	Geschirrspüler						
	Wäscheleine			0.0	0.0	0.0	
	Kühlen						
	Kochen	48.0		48.0		48.0	
	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	64.0		44.8	9.0	38.4	
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	4.4	14.0	14.0	14.0	4.4	4.4
2 EG WC	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	0.2	0.6	0.6	0.6	0.2	0.2
3 Flur/Treppe	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	0.9	3.0	3.0	3.0	0.9	0.9
4 OG Kinder	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	38.4			9.0	23.0	54.9
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	1.8	5.9	5.9	5.9	1.8	1.8
5 OG Schlaf	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						73.1
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	1.4	4.5	4.5	4.5	1.4	1.4
6 OG Bad	Waschen						
	Trocknen			0.0			
	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	25.6				15.4	
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	0.6	20.8	2.0	2.0	0.6	19.5
7 UG							
8 DG	WW-Speicher						
	Hilfsstrom						
	Warmwasser						



Interne Wärmequellen [W], Szenario: Hoch Winter							
	Zeitraum	6-8	8-12	12-14	14-19	19-22	22-6
Zone	Art IWQ						
1 EG Wohnen und Küche	Geschirrspüler				93.5		
	Wäscheleine			-205.3	-205.3	-205.3	
	Kühlen	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3	83.3
	Kochen	122.3		122.3		122.3	
	Beleuchtung	95.5				95.5	
	Sonstiges	42.7	42.7	42.7	42.7	42.7	42.7
	Personen	200.0		140.0	28.0	120.0	
	Kaltwasser	-27.8	-27.8	-27.8	-27.8	-27.8	-27.8
	Warmwasser	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2
	Verdunstung	-19.5	-62.0	-62.0	-62.0	-19.5	-19.5
2 EG WC	Beleuchtung	4.1				4.1	
	Sonstiges	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
	Personen						
	Kaltwasser	-55.7	-55.7	-55.7	-55.7	-55.7	-55.7
	Warmwasser	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
	Verdunstung	-0.8	-2.7	-2.7	-2.7	-0.8	-0.8
3 Flur/Treppe	Beleuchtung	20.2				20.2	
	Sonstiges	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
	Verdunstung	-4.1	-13.1	-13.1	-13.1	-4.1	-4.1
4 OG Kinder	Beleuchtung	40.0				40.0	
	Sonstiges	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9
	Personen	120.0			28.0	72.0	171.4
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	-8.2	-26.0	-26.0	-26.0	-8.2	-8.2
5 OG Schlaf	Beleuchtung	30.6				30.6	
	Sonstiges	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7
	Personen						228.6
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	-6.3	-19.9	-19.9	-19.9	-6.3	-6.3
6 OG Bad	Waschen		123.0				
	Trocknen			0.0			
	Beleuchtung	13.8				13.8	
	Sonstiges	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
	Personen	80.0				48.0	
	Kaltwasser	-55.7	-55.7	-55.7	-55.7	-55.7	-55.7
	Warmwasser	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8
	Verdunstung	-2.8	-92.3	-8.9	-8.9	-2.8	-86.1
7 UG							
8 DG	WW-Speicher	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
	Hilfsstrom	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	Warmwasser	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8	18.8



Interne Feuchtequellen [g/h], Szenario: Hoch Winter							
	Zeitraum	6-8	8-12	12-14	14-19	19-22	22-6
Zone	Art IWQ						
1 EG Wohnen und Küche	Geschirrspüler						
	Wäscheleine			289.8	289.8	289.8	
	Kühlen						
	Kochen	120.0		120.0		120.0	
	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	160.0		112.0	22.4	96.0	
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	27.5	87.5	87.5	87.5	27.5	27.5
2 EG WC	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	1.2	3.7	3.7	3.7	1.2	1.2
3 Flur/Treppe	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	5.8	18.6	18.6	18.6	5.8	5.8
4 OG Kinder	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	96.0			22.4	57.6	137.1
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	11.5	36.7	36.7	36.7	11.5	11.5
5 OG Schlaf	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen						182.9
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	8.8	28.1	28.1	28.1	8.8	8.8
6 OG Bad	Waschen						
	Trocknen			0.0			
	Beleuchtung						
	Sonstiges						
	Personen	64.0				38.4	
	Kaltwasser						
	Warmwasser						
	Verdunstung	4.0	130.3	12.6	12.6	4.0	121.6
7 UG							
8 DG	WW-Speicher						
	Hilfsstrom						
	Warmwasser						