

Feuchtemessung in einem Passivhaus

Dr. Wolfgang Feist, Passivhaus Institut, im Dezember 2004

Einführung - Zusammenfassung

Über die Zusammenhänge zwischen Energiesparmaßnahmen und Raumluft- sowie Bauteilfeuchtigkeit kursieren (gerade auch im Internet) die unterschiedlichsten Auffassungen. Während eine Fraktion durch Dämmmaßnahmen und Luftdichtheit die Häuser geradezu „absaufen“ sieht, wird von einer anderen Seite „trockene Luft“ in Energiesparhäusern ausgemacht. Die tatsächlichen Zusammenhänge folgen den Regeln der Bauphysik, die seit Jahrzehnten erforscht und publiziert sind [Klopfer 1974] [Künzel 1997]. Für Passivhäuser ist der Stand der Kenntnisse in Protokollbänden des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser dokumentiert [AkkP 23] [AkkP 24] [AkkP 27] [AkkP 29] [AkkP 30]. Von der Physik her ist somit eigentlich alles klar – aber auch hier kann nur die gelebte und nachgemessene Erfahrung überzeugen.

In diesem Kurzpapier werden dazu Messergebnisse aus dem Passivhaus Darmstadt Kranichstein veröffentlicht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Feuchteverhältnisse in diesem Gebäude genau den durch die Physik bestimmten Erwartungen entsprechen und dass sie weder als „zu feucht“ noch als „zu trocken“ bezeichnet werden können, vielmehr genau in dem Feld der Feuchtezustände liegen, die für behagliches und gesundes Wohnen gewünscht werden. Weil die sich einstellende Raumluftfeuchtigkeit im Winter vor allem durch die vom Nutzer eingestellten Außenluftmengen bestimmt wird, steht es den Bewohnern im übrigen weitgehend frei, durch die Auswahl einer entsprechenden Luftaustauschrate eine ihren Wünschen entsprechende Raumluftfeuchtigkeit einzustellen; im Gegensatz zu konventionellen Gebäuden, in denen die maximal zulässige relative Feuchtigkeit der Innenluft jedenfalls kleiner ist als 50%, wäre es Passivhäusern durchaus zulässig, auch bis zu 60% relative Raumluftfeuchte zu wählen, ohne dass es zu feuchtebedingten Bauschäden kommen kann. Empfehlenswert ist aus Sicht des PHI, die relativen Raumluftfeuchten im Winter bei Passivhäusern in einem Bereich zwischen 35 und 55% einzustellen. Dies gelingt bei durchschnittlichen Haushalten mit den empfohlenen Außenluftvolumenströmen zwischen 25 und 30 m³/h/Person, wie sie z.B. auch in [DIN 1946] empfohlen werden. Mit diesen Werten werden dann regelmäßig auch sehr gute Ergebnisse bzgl. anderer Innenraumluftverunreinigungen erreicht [Feist 1997a] [Münzenberg 2002].

Zum Messobjekt

Das Passivhaus Darmstadt Kranichstein ist ein seit 1991 bewohntes Reihenhaus, das eine extrem gute Wärmedämmung (U-Werte von Wänden, Decken und Dächern unter 0,14 W/(m²K), hoch wärmedämmende Passivhausfenster (U-Wert um 0,75 W/(m²K)), eine extrem gut luftdichte Gebäudehülle (n_{50} -Werte unter 0,3 h⁻¹) und eine Lüftungsanlage mit je 100 m³/h Zu- sowie Abluft mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung (Wärmebereitstellungsgrad über 80%) aufweist. Das Gebäude und die baulichen Details einschließlich aller Anschlüsse sind sehr gut dokumentiert [Feist 1997c]. Verbrauchsmessungen und Temperaturverläufe aus den Wohnungen liegen für mehr als 13 Jahre ununterbrochenen Wohnbetrieb von vier Familien vor [AkkP 5] [Feist 1997b].

Feuchtetechnisch relevante Details sind: Das Gebäude ist ein Kalksandsteinmassivbau mit Stahlbetondecken und einem Holzleichtbaudach, die Dachräume im 2. OG sind bewohnt. Die Luftdichtheit wird hergestellt durch

- die Beton-Kellerdecke, Durchbrüche sind mit Gipsverguss geschlossen;
- den Innenputz der gemauerten Außenwände, dieser ist von Oberkante Rohfußboden bis Unterkante Rohdecke ausgeführt, Steckdosen sind vollflächig in Putzbatzen eingeputzt;
- mit Putzendschienen und Acrylfugen (Zweiflankenhaftung durch Haftverhinderungsband auf dem Laibungsgrund) luftdicht an den Innenputz angeschlossene Holzfensterrahmen mit doppelten Lippendichtungen und Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen, die Fensterrahmen sind mit Dämmschalen zusätzlich im Wärmeverlust reduziert;
- eine Polyäthylenfolie auf der Innenseite des voll mit Mineralwolle ausgedämmten Daches, innenseitig durch eine Gipskartonplatte verkleidet. Die Folie geht in jedem Raum ununterbrochen durch und ist an den Rändern über den Ringanker der Außenwände umgeklappt und eingeputzt.

Mit diesen Details wurde eine dauerhafte Luftdichtheit mit zuletzt im Jahr 2002 nachgemessenen n_{50} -Werten um $0,3 \text{ h}^{-1}$ erreicht.

Die Wärmedämmung besteht bei den Außenwänden und der Kellerdecke aus Polystyrol-Hartschaum (EPS) auf der Außenseite mit jeweils 220 bis 275 mm Dämmstärke. Die gesamte massive Baukonstruktion liegt daher auf der warmen Seite der Dämmung. Im Dach ist die Dämmung aus Mineralwolle insgesamt 450 mm dick; die Dachhaut wird durch einen Gründachaufbau gebildet [AkkP 29].

Jede Wohnung hat ein balanciertes Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung, welches auf Volumenströme im Normalbetrieb von etwa $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (viermal $25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person}$) dimensioniert ist. Die Benutzer können darüber hinaus einen Grundlüftungszustand mit etwa $70 \text{ m}^3/\text{h}$ und eine „Partylüftung“ mit $160 \text{ m}^3/\text{h}$ einstellen; ganz überwiegend wird der Normalbetrieb gewählt, beim Kochen und Baden kurzzeitig auch der Starkbetrieb. Die Langzeitstatistik zeigt, dass im Mittel ziemlich genau $100 \text{ m}^3/\text{h}$ Außenluftvolumenstrom gefördert werden [AkkP 30]. Dies ist – zusammen mit den (typischen) Feuchtequellen im Innenraum – die bestimmende Größe für die mittlere Feuchtebilanz im Innenraum. Im übrigen sind in diesem Haus alle 10 Außenfenster mit Dreh/Kipp-Beschlägen zu öffnen; im Sommer und in den Übergangsjahreszeiten wird durch die Bewohner von der Fensterlüftung rege Gebrauch gemacht; die Öffnungszeiten der Fenster im Winter sind vernachlässigbar. Vernachlässigbar ist auch der Infiltrationsluftwechsel, der in den Anfangsjahren durch eine Tracergasmessung als unter $0,02 \text{ h}^{-1}$ bestimmt wurde. Ebenso vernachlässigbar ist der Nettofeuchtetransport durch die Gebäudehüllflächen (Diffusion und kapillare Wasserleitung), wie eine überschlägige Berechnung nach Glaser zeigt. Nach den physikalischen Gesetzen des Wassertransportes und der Feuchtesorption sollten alle Bauteile in einem solchen Haus unkritische Materialfeuchtigkeiten in Bereichen von 0,1 bis 0,5 Massenprozent aufweisen (vgl. dazu die später aufgeführten Messergebnisse). Unter diesen Umständen ist der Feuchtetransport im Bauteil allein durch Diffusion gegeben. Durchaus relevant für das Feuchteverhalten im Raum ist die Sorption und Desorption von Feuchtigkeit in raumnahen Bauteilschichten wie z.B. dem Innenputz, die sog. Feuchtepufferung. Hierdurch vergleichmäßigt sich der zeitliche Feuchteverlauf, und es wird im Netto Feuchte vom Sommer (mit relativen Feuchten um 50 bis 75%) in den Winter (35 bis 55%) übertragen.

Durchführung der Messungen und Messergebnisse

Die Messungen wurden unter normalen Wohnbedingungen am 5. Dezember 2004 durchgeführt. Langzeitaufzeichnungen aus den vorausgehenden Jahren zeigen, dass die dabei vorliegenden Raumluftzustände typisch für diese Wohnung bzgl. Temperatur und Feuchtigkeit sind. Einige Wochen vorausgehender Messungen der Materialfeuchten führten auf vergleichbare Ergebnisse.

Die Messungen wurden zwischen 11:30 und 13:00 im Erdgeschoss auf der Nordseite des Reihenendhauses durchgeführt, da dort noch am ehesten höhere Materialfeuchtigkeiten zu vermuten gewesen wären. Alle anderen Außenbauteile wurden ebenfalls mit einer kapazitiven Feuchtesonde abgescannt – an keiner Stelle wurden signifikant höhere als die hier dokumentierten Werte gemessen.

Als Randbedingung wurden zunächst die Raumlufttemperatur und die relative Raumluftfeuchtigkeit mit der Sonde GANN RHT-37 in 0,86 m Höhe und ungefähr Raummitte bestimmt zu $21,0 \text{ °C}$ und $36,5 \text{ \%}$ rel. Feuchte. Die Messung wurde in 10 cm Höhe über dem Fußboden wiederholt: mit dem Ergebnis $20,4 \text{ °C}$ und 37 \% rel. Feuchte. Diese Werte liegen im Komfortbereich. Dabei ist der Hinweis wichtig, dass die Nutzer durch höhere Luftwechselraten sowohl niedrigere als auch durch geringere Lüftungsstufen höhere relative Raumluftfeuchtigkeiten einstellen können und dies in gewissem Rahmen zulässig ist, wenn die Nutzer dies wollen. Die vorhandenen Feuchtezustände entsprechen den von den Nutzern im Objekt seit längerem bevorzugten Bedingungen.

Messung Raumluftzustand

<i>Ort</i>	<i>Messgerät</i>	<i>Temperatur</i> <i>/ °C</i>	<i>rel. Feuchte</i>
EG-Nord, Esszimmer, 0,86 m Höhe	GANN RHT-37	21.0	36.5%
EG-Nord, Esszimmer, 0,10 m Höhe	GANN RHT-37	20.4	37.0%

Darauf folgend wurden an drei Positionen Materialfeuchtemessungen vorgenommen:

- Am Putz (Gips) einer vollständig innen liegenden Wand.
- Am Innenputz einer nicht verstellten Außenwand (Nordrichtung) in 1 bis 2 m Höhe.
- Am Innenputz dieser Außenwand im Bereich einer Kommode, die 69 cm hoch ist und unmittelbar an der Wand steht (< 1 cm Luftraum). Solche Situationen hinter Möbeln werden in der Literatur regelmäßig als kritisch angesehen. Dies ist für normale, nicht oder wenig gedämmte Außenwände physikalisch nachvollziehbar, da die Möbel wie eine mit Raumluft hinterströmte Innendämmung wirken und hinter den Möbeln Temperaturreduktion und damit erhöhte relative Feuchten auftreten (der Dampfdruckausgleich zur Innenluft ist nämlich konvektiv ausreichend gewährleistet, damit herrscht hinter den Möbeln der gleiche Dampfdruck wie im Raum).

Die Materialfeuchten wurden unabhängig voneinander mit drei verschiedenen Methoden bestimmt:

- A) Durch eine Wasseraktivitätsmessung (a_w -Wert); das ist die relative Gleichgewichtsluftfeuchte, die sich in einem Hohlraum im Sorptionsgleichgewicht mit der Bauteilschicht einstellt. Gemessen wurde dieser Wert mit dem Fühler GANN RHT-37.
- B) Durch kapazitive zerstörungsfreie Feuchtesonden der Hersteller Trotec (T 650) und Gann (B50), die den Wassergehalt über die Dielektrizitätskonstante des Materials in Sondennähe bestimmen.
- C) Durch Leitfähigkeitsmessung in der Putzschicht mit Hilfe der Einschlagelektrode M20 der Firma Gann.

Die nachfolgende Tabelle gibt die Messergebnisse wieder.

Messung Materialfeuchten

Ort	Messgerät	Digits	Materialfeuchte für Baustoff "Gipsputz"
Innenwand zu WC, Gipsputz auf KS	TROTEC T 650 Kapazitiv	35.9	0.30%
Innenwand zu WC, Gipsputz auf KS, 20 Messungen über die ganze Fläche	GANN B50 kapazitiv GP_B50 425		< 0.3%
Innenwand zu WC, Gipsputz auf KS	GANN M20 Edelstahlnägel 16 mm in 3 cm Abstand		<0.2%
Außenwand, Nord, Gipsputz auf KS, Außendämmung ca. 220 mm in 0,9 m Höhe, frei	TROTEC T 650 Kapazitiv	38	0.35%
Außenwand, Nord, Gipsputz auf KS, Außendämmung ca. 220 mm in 0,9 m Höhe, frei	GANN B50 kapazitiv GP_B50 425		< 0.3%
Außenwand, Nord, Gipsputz auf KS, Außendämmung ca. 220 mm in 0,2 bis 0,5 m Höhe, hinter Kommode	TROTEC T 650 Kapazitiv	40	0.39%
Außenwand, Nord, Gipsputz auf KS, Außendämmung ca. 220 mm in 0,2 bis 0,5 m Höhe, hinter Kommode	GANN B50 kapazitiv GP_B50 425		< 0.3%
Außenwand, Nord, Gipsputz auf KS, Außendämmung ca. 220 mm in 0,5 m Höhe, hinter Kommode	GANN M20 Edelstahlnägel 16 mm in 30 mm Abstand; Leitfähigkeitsmessung		<0.2%

Messung a_w -Wert hinter Kommode

		Temperatur / °C	a_w -Wert	Materialfeuchte für Baustoff "Gipsputz"
EG-Nord im Luftspalt hinter Kommode 0,50 m Höhe	GANN RHT-37	20.0	39.3%	0.3%

Die zuverlässigsten Messwerte sind durch die a_w -Wert-Messung und durch die Leitfähigkeitsmessung gegeben. Da sich nach allen Messungen an allen Positionen extrem niedrige Materialfeuchtigkeiten zwischen 0,2 und 0,4 M-% ergeben und die Messgenauigkeit in diesen Bereichen sicher nicht höher als ± 0.1 M-% ist, liegen alle Messwerte im Rahmen der Messgenauigkeit im gleichen Bereich. Diese Ergebnisse waren auf Grund der Sorptionsisothermen und der Randbedingungen zu erwarten. Sie werden nun durch Messungen belegt – wodurch sich auch in diesem Fall wieder die Gültigkeit der Grundgesetze der Bauphysik bestätigt.

Die gemessenen Materialfeuchtigkeiten liegen für alle Positionen in einem Bereich zwischen 0,2 und 0,4 M-%, entsprechend a_w -Werten unter 45% an allen Oberflächen. Damit ist Tauwasserbildung überall, auch hinter dem Möbelstück vor der Außenwand, grundsätzlich ausgeschlossen. Die a_w -Werte reichen zudem auch nicht annähernd für das Wachstum von Schimmel aus (hierzu müsste a_w größer als 75% sein, nach der Norm sind sogar 80% noch zulässig). Derart hohe a_w -Werte können wegen der sehr guten Wärmedämmung an den Innenoberflächen von Passivhaus-Außenwänden nicht auftreten, selbst in den Ecken nicht, selbst wenn dort Möbel stehen und selbst wenn die relative Raumluftfeuchte (anders als im hier gemessenen Objekt) längere Zeit bei um 55% liegen sollte. Da a_w -Werte und mittlere relative Raumluftfeuchtigkeiten bei gleichbleibenden Temperaturverhältnissen einander proportional sind (solange a_w unter 90% bleibt), kann dieser Zusammenhang hier unmittelbar durch die Messergebnisse bestätigt werden.



Abbildung 1: Wand hinter der abgerückten Kommode mit eingeschlagenen Nägeln für die Feuchtemessung

Abbildung 1 zeigt ein Foto der Außenwand mit den eingeschlagenen Elektroden für die Leitfähigkeitsmessung hinter der abgerückten Kommode. Dort zeigt sich der wohnungsübliche Schmutz wie bei jedem über längere Zeit nicht abgerückten Möbelstück, jedoch keinerlei Hinweis auf eine vorhandene oder vergangene Feuchtebelastung. Die Wand wurde übrigens seit dem Bezug nicht wieder neu gestrichen.

Schlussfolgerungen: Hohe Sicherheit vor Feuchteschäden in Passivhäusern

Die Ergebnisse der Kontrollmessungen 13 Jahre nach dem Bezug des Passivhauses in Darmstadt Kranichstein bestätigen die bauphysikalisch zu erwartende sehr gute Situation in Bezug auf konstruktiven Feuchteschutz in einem hochwärmegeprägten Haus mit Wohnungslüftung:

- Durch die gute Wärmedämmung liegen die inneren Oberflächentemperaturen auch in Kanten und Ecken und selbst hinter Möbeln an Außenbauteilen nur maximal 2 bis 4 Kelvin unter den Raumlufftemperaturen. Dadurch sind die Wasseraktivitäten an den Wandoberflächen nur unwesentlich höher als die relative Raumlufffeuchtigkeit. Diese darf daher in Passivhäusern (aber keinesfalls in schlechter gedämmten Objekten) durchaus Werte bis 55% annehmen. Niedrige Wasseraktivitäten führen über den Zusammenhang der Sorptionsisothermen zu niedrigen Werten für die Materialfeuchten, welche hier durch Messungen bestätigt wurden.
- Eine gute außen liegende Wärmedämmung ist daher ein wichtiger Beitrag zur Vermeidung von Bauschäden und zum gesunden Wohnen. Die oft diskutierten feuchtetechnischen Eigenschaften der Dämmstoffe spielen dabei eine nur untergeordnete Rolle, weil sich der massive Teil der Außenwand bei Außendämmung unabhängig davon immer im Feuchtgleichgewicht mit dem Innenraum befindet und sich daher „wie eine Innenwand“, d.h. unkritisch, verhält.
- Selbstverständlich sind Feuchteschäden durch andere Ursachen, wie z.B. eine leckere Wasserleitung, eine ausgelaufene Waschmaschine etc. auch in Häusern mit Wärmedämmung nicht ausgeschlossen. Aber auch Wasser, das auf anderem Weg eindringen sollte, kann wegen der höheren Temperaturen im Bauteilquerschnitt besser und schneller wieder austrocknen. Bei dauerhaft kapillarem Wassersaugen z.B. aus dem Erdreich wegen fehlender Sperrschichten wird natürlich irgendwann eine Grenze der Gutmütigkeit auch bei hochgedämmten Häusern erreicht. Gute Wärmedämmung befreit den Planer nicht von einer sorgfältigen Projektierung und Ausführung nach den Regeln der Baukunst – aber sie bietet eine erheblich verbesserte Sicherheit gegenüber raumluffbedingten Feuchteschäden.
- Mit der Wohnungslüftung lassen sich in sehr weiten Grenzen die jeweils gewünschten relativen Raumlufffeuchten einstellen: Und zwar wird es umso trockener, je höher die Luftwechselrate eingestellt wird. In herkömmlichen Gebäuden sollte 50% rel. Raumlufffeuchte nicht für längere Zeiträume im Winter überschritten werden, da sonst Feuchteschäden z.B. hinter Schränken an Außenwänden sehr wahrscheinlich werden. In gut gedämmten Häusern, insbesondere in Passivhäusern, können auch 55% relative Raumlufffeuchte in Mitteleuropa im Winter noch akzeptiert werden. Der mit der Wohnungslüftung erreichte Luftwechsel ist regelmäßig höher als bei üblicher Fensterlüftung.
- Fenster können und dürfen selbstverständlich auch in Passivhäusern geöffnet werden. Die Nutzer können nach dem Grundsatz verfahren: "Wenn es zu kalt wird, dann mache ich das Fenster wieder zu".

Die wichtigste Schlussfolgerung aus der durchgeführten Untersuchung ist, dass sich die Methoden der Bauphysik für den gekoppelten Feuchte- und Wärmehaushalt in einem Gebäude bestätigt finden. Die für den Planer wichtigsten Konsequenzen sind, dass sich eine gute (außenliegende) Wärmedämmung und luftdichtes Bauen als entscheidende Voraussetzungen für eine trockene und bauschadensfreie Wohnung bewährt haben, sowohl im Neubau als auch bei einer Sanierung. Die kontrollierte Wohnungslüftung erlaubt es dann, die relativen Feuchten in den von den Nutzern gewünschten Bereich einzustellen.

Literatur

- [AkkP 5] **Energiebilanz und Temperaturverhalten**, Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase II; Passivhaus Institut; Darmstadt 1997.
- [AkkP 23] **Einfluss der Lüftungsstrategie auf die Schadstoffkonzentration und die Schadstoffausbreitung im Raum**, Protokollband Nr. 23 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2003.
- [AkkP 24] **Einsatz von Passivhaustechnologien bei der Altbau-Modernisierung**, Protokollband Nr. 24 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2003.
- [AkkP 27] **Wärmeverluste durch das Erdreich**, Protokollband Nr. 27 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004.
- [AkkP 29] **Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen**, Protokollband Nr. 29 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt.
- [AkkP 30] **Lüftung bei Bestandssanierung: Lösungsvarianten**, Protokollband Nr. 30 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt.
- [DIN 1946] DIN 1946: **Raumluftqualität; Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)**; Beuth Verlag; Berlin 1994.
- [Feist 1997a] Feist, W.: **Ergebnisse der Luftqualitätsmessungen im Passivhaus**, in: Protokollband Nr. 8 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase II: „Materialwahl, Ökologie und Raumlufthygiene“; Passivhaus Institut, Darmstadt 1997.
- [Feist 1997b] Feist, W.: **Der Härte-test: Passivhäuser im strengen Winter 1996/97**, GRE-Inform 12/97 Seiten 18 bis 26.
- [Feist 1997c] Feist, W.: **Passivhaus Darmstadt Kranichstein - Planung**, Bau, Ergebnisse; Passivhaus Institut, 1. Auflage, 1997.
- [Klopfer 1974] Klopfer, H.: **Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen**, Wiesbaden und Berlin, 1974.
- [Künzel 1997] Gösele, K.; Schüle, W. und Künzel, Helmut: **Teil C, Feuchteschutz in Schall, Wärme, Feuchte**, Wiesbaden und Berlin 1997.
- [Münzenberg 2002] Münzenberg, U.: **Messtechnische Evaluierung und Verifizierung der energetischen Einsparpotentiale und Raumluftqualität an Passivhäusern in Nürnberg**, Schulze Darup, B. (Hrsg.), Verlag AnBUS e.V., Fürth, 2002.