

Wohnkomfort und Heizwärmeverbrauch im Passivhaus und Niedrigenergiehaus

Kurzbericht vom 26. Mai 2013



Dieses Projekt wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH im Rahmen des COMET-Förderprogrammes unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Synopsis	3
1. Zusammenfassung	3
2. Fragestellung	5
3. Untersuchungsgegenstand	7
4. Untersuchungsmethoden	11
5. Befragungsstichprobe	12
6. Lüftungsverhalten	13
7. Sonstiges Nutzungsverhalten	16
8. Baubiologische Kennwerte	17
9. Wohnkomfort	19
10. Benutzerfreundlichkeit	23
11. Luftqualität	24
12. Außenklima	32
13. Wasserverbrauch	33
14. Stromverbrauch	36
15. Heizwärmeverbrauch	37
16. Diskussion	44
17. Literaturverzeichnis	46
Kontaktdaten	49

Synopsis

Die Erwartungen hinsichtlich eines höheren Wohnkomforts für BewohnerInnen des Passivhauses im Vergleich zu BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses konnten nicht bestätigt werden. In beiden Gebäudetypen ist die subjektive Wohnkomforteinschätzung durch die Betroffenen gut bis sehr gut. Auch der reale Heizwärmeverbrauch beider Gebäudetypen ist vergleichbar hoch. Nur bei konsequenter Einhaltung des erwarteten Benutzerverhaltens werden die Referenzwerte für das Passivhaus und das Niedrigenergiehaus erreicht.

1. Zusammenfassung

Mit der Raumluftqualität sind die BewohnerInnen beider Gebäudetypen generell zufrieden. Dies wurde von den Betroffenen denn auch als wichtiges Kriterium für die Einschätzung des Wohnkomforts erachtet.

Die kontinuierlichen Luftfeuchtemessungen zeigen, dass die Raumluftfeuchtigkeit in den Wohnungen des Passivhauses ($M_P=45\%$) durchwegs geringer war als im Niedrigenergiehaus ($M_N=53\%$). In den Wintermonaten weisen Wohnungen des Passivhauses eine relativ niedrigere Raumluftfeuchtigkeit auf (minimaler Monatsmittelwert von 27 %). In den Sommermonaten weisen Wohnungen des Niedrigenergiehauses teilweise eine hohe Raumluftfeuchtigkeit auf (maximaler Monatsmittelwert von 66 %). Dennoch beurteilen die BewohnerInnen des Passivhauses und des Niedrigenergiehauses die generelle Behaglichkeit sowohl im Winter als auch im Sommer als sehr hoch. Die BewohnerInnen beider Gebäudetypen empfinden die Raumluftfeuchtigkeit meistens als angenehm.

Die kontinuierlich gemessene Raumlufttemperatur weist eine um 0,3 °C höhere Temperatur in Wohnungen des Passivhauses im Gesamtmittelwert aus. Sowohl die BewohnerInnen des Passivhauses ($M_P=22,1\text{ °C}$) als auch des Niedrigenergiehauses ($M_N=21,8\text{ °C}$) empfinden die Raumtemperatur meistens als angenehm. Die Oberflächentemperaturen von Boden, Außenwand und Fenster(-rahmen) im Passivhaus sind vergleichbar mit dem Niedrigenergiehaus, die Oberflächentemperaturen der Außenwand sowie des Fensters(-rahmens) unterscheiden sich ihrerseits nicht mehr als 3°C von der Raumtemperatur. Ein Großteil der BewohnerInnen empfindet den erwarteten Temperaturunterschied von 1-3 °C nicht als unangenehm.

Die kontinuierlich gemessene Kohlendioxidkonzentration in der Raumluft erwies sich in den Wohnungen des Passivhauses ($M_P= 538\text{ ppm}$) und des Niedrigenergiehauses ($M_N= 556\text{ ppm}$; exklusive Raucher) im Gesamtmittelwert als angemessen. Die Behaglichkeitsgrenze von 1000 ppm wurde im Erfassungszeitraum von Juni 2010 bis März

2013 im Passivhaus in 0,4% der Fälle überschritten und im Niedrigenergiehaus (inklusive Raucher) in 0,6% der Fälle. Sowohl im Passivhaus als auch im Niedrigenergiehaus wurde die Sauberkeit der Luft als hoch bewertet. Ein Großteil von Besuchern der Wohnungen nimmt eine erhöhte Luftqualität und andere positive Aspekte wahr. Geruchsbelästigungen werden in beiden Gebäudetypen kaum wahrgenommen.

Das Lüftungsverhalten der BewohnerInnen beider Gebäudetypen unterscheidet sich nicht unerwartet dahingehend, dass die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses länger manuell über die Fenster lüften als die BewohnerInnen des Passivhauses. Unter Berücksichtigung aller Räume führen BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses nach eigenen Angaben in Summe durchschnittlich 10 Stunden pro Tag eine Raumlüftung mittels Fensterkippen durch, im Passivhaus sind es 2 Stunden pro Tag. Die BewohnerInnen des Passivhauses betreiben die kontrollierte Be- und Entlüftung zu 90% der Zeit auf Lüfterstufe 1 mit einer Luftwechselrate von 0,35 1/h und auf Lüfterstufe 2 mit einer Luftwechselrate von 0,5 1/h. Der durch Einzelmessung registrierte Luftstrom beim Türdurchlass zwischen den Räumen mit Lüftungsauslass und Lüftungsabzug ist im Passivhaus ($M_P=0,36 \text{ m/s}$) tendenziell stärker als bei vergleichbaren Türdurchlässen im Niedrigenergiehaus ohne Belüftungsanlage ($M_N=0,09 \text{ m/s}$). BewohnerInnen des Passivhauses erwähnten dementsprechend im Unterschied zum Niedrigenergiehaus in 4% der 70 wiederholten Befragungen in der Wohnung einen Luftzug wahrgenommen zu haben.

Keiner der befragten BewohnerInnen hatte in der neuen Wohnung Allergien, die sie vorher nicht hatten. BewohnerInnen beider Gebäudetypen gaben an, dass sie ihren Schlaf durchwegs als erholsam empfinden. Gelegentlich wurden von BewohnerInnen beider Gebäudetypen Geräuschbelästigungen wahrgenommen. Im Niedrigenergiehaus wurden im Unterschied zum Passivhaus in einigen Fällen Probleme mit Stechmücken u.ä. erwähnt.

Die Bedienbarkeit und Praktikabilität des Heizungs- und Lüftungssystems wurde positiv bewertet. Allerdings wurde auch erwähnt, dass das Heizungssystem zu wenig Einstellmöglichkeiten biete und das Lüftungssystem zu einer unangenehmen Geräuscentwicklung führe. BewohnerInnen des Passivhauses und des Niedrigenergiehauses beurteilen ihre Wohnung hinsichtlich des Energiebedarfs und der Betriebskosten gleich gut.

Der Wasserverbrauch liegt unterhalb des Verbrauchs pro Einwohner in Österreich. Der Gesamtmittelwert des Kaltwasserverbrauchs im Passivhaus ($M_P=64,4 \text{ l/d}\cdot\text{P}$) ist höher als der Gesamtmittelwert im Niedrigenergiehaus ($M_N=55,8 \text{ l/d}\cdot\text{P}$). Auch der Gesamtmittelwert des Warmwasserverbrauchs im Passivhaus ($M_P=38,0 \text{ l/d}\cdot\text{P}$) ist höher als der Mittelwert im Niedrigenergiehaus ($M_N=31,9 \text{ l/d}\cdot\text{P}$). Für das Passivhaus wurde auf Basis dieser Verbrauchswerte ein Warmwasserwärmeverbrauch von 21,4 kWh/m²·a und für das Niedrigenergiehaus ein Warmwasserwärmeverbrauch von 16,2 kWh/m²·a errechnet. Beide

Gebäudetypen liegen damit über dem erwarteten Warmwasserwärmebedarf von 12,8 kWh/m²·a. Es sind eher die BewohnerInnen des Passivhauses, die über ein langes Warten auf Warmwasser klagen.

Der durch die Wärmemengenzähler registrierte Heizwärmeverbrauch im Erfassungszeitraum von Juni 2010 bis März 2013 ergibt für das Passivhaus einen Heizwärmeverbrauch von $HWV_P=41,9$ kWh/m²·a und für das Niedrigenergiehaus einen Heizwärmeverbrauch von $HWV_N=38,4$ kWh/m²·a. Unter Berücksichtigung des Sommerheizbetriebs, den höheren Temperaturen für die untersuchten Innenräume, dem wärmeren Außenklima, den Temperaturabsenkungen in den Wohnungen, den geringeren internen Wärmegewinnen und den größeren Lüftungswärmeverlusten erzielt sowohl das Passivhaus ($M_P=10,4$ kWh/m²·a) als auch das Niedrigenergiehaus ($M_N=32,9$ kWh/m²·a) annähernd die Referenzwerte nach den Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik (Energieausweis für Wohngebäude) mit $HWB_P=9,03$ kWh/m²·a für das Passivhaus und $HWB_N=33,23$ kWh/m²·a für das Niedrigenergiehaus.

Insgesamt wird von BewohnerInnen beider Gebäudetypen die Wohnsituation und der Wohnkomfort sehr gut bewertet.

2. Fragestellung

Die Bemühungen der Politik, Wissenschaft und Praxis zur Steigerung der Energieeffizienz und des Komforts von Wohngebäuden haben in den letzten Jahren bereits große Erfolge erzielt (Bachmann & Lange, 2012; Schmid, 2013). Der Entwicklungsstand von eingesetzten Gebäudetechnologien ist relativ hoch, so dass auch sehr kleine Änderungen im Gesamtsystem von Umwelt, Mensch und Technik zu einer merklichen Zu- oder Abnahme des Energieverbrauchs führen können. Entsprechend groß sind auch die Variationen des realen Energieverbrauchs in Wohngebäuden, die zudem in einzelnen Fällen relativ stark von den berechneten Zielgrößen abweichen (Seefeldt et al., 2006; Smutny et al., 2008). Auch hinsichtlich des Wohnkomforts werden in Zusammenhang mit der Optimierung von Gebäudetechnologien klare Ziele verfolgt. Das durch eine Vielzahl an Faktoren (z.B. Belüftung, Materialien, Strahlung) geschaffene Innenraumklima erfüllt gewöhnlich sowohl die allgemeinen gesundheitlichen Rahmenbedingungen als auch die individuellen Ansprüche an die Behaglichkeit (Rohregger et al., 2004). Teilweise bedingen sich die unterschiedlichen Zielvorstellungen gegenseitig, wenn z.B. der höhere Wohnkomfort maßgeblich durch den Einsatz von energieeffizienten Technologien und ökologischen Baumaterialien erklärt wird (Peper et al., 2011). Andererseits ist es gerade das komplexe Idealgefüge aus Umwelt, Mensch und Technik welches auch Stimmen aufkommen lässt, die einen partiellen Gegensatz zwischen Bedingungen für Energieeffizienz und Wohnkomfort vermuten (Moeseke, 2011).

Ein Passivhaus ist ein Gebäude, das hohen Wohnkomfort und niedrigen Energieverbrauch verbindet (Feist, 2010). Ein Passivhaus weist nach PHPP-Standard einen Heizwärmebedarf von maximal 15 kWh/m²·a auf, dies entspricht in etwa maximal 10 kWh/m²·a berechnet nach den Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik (Energieausweis für Wohngebäude). Für die Effizienz von Passivhäusern spielt die luftdichte Gebäudehülle eine wesentliche Rolle, die mittels Blower Door Test geprüft wird und den n50-Schwellwert von 0,6 nicht überschreiten darf (s. IG-Passivhaus Österreich, 2013). Folgende Vorteile werden den Passivhäusern zugesprochen:

- Die optimierte Gebäudehülle und die Wärmerückgewinnung aus der Abluft reduziert den Heizwärmeverbrauch.
- Hohe thermische Behaglichkeit, da die Oberflächentemperatur (z.B. der Außenwände, Fenster) praktisch der Lufttemperatur entsprechen.
- Die Raumlufttemperatur bleibt sowohl über das Jahr gesehen als auch über einen Tag sowie für einzelne Räume konstant.
- Die Luftqualität (Kohlendioxid, Gerüche, Pollen etc.) ist in Häusern mit kontrollierter Wohnraumlüftung wesentlich besser als bei Fensterlüftung.
- Durch die Möglichkeit, mit geschlossenen Fenstern zu lüften, ist der Schallschutz stark verbessert und die Belästigung durch Stechmücken u.ä. entfällt.
- Durch kontinuierliche Lüftung werden Bauteilfeuchte und Kondenswasser vermieden (niedriges Schimmelrisiko).
- Bei einer gut ausgeführten Lüftungsanlage kommt es zu keinen Zugerscheinungen.

Zum Erstellungszeitpunkt der untersuchten Gebäude erfüllen Passivhäuser auch den Ökostandard 3 nach den Wohnbauförderungsrichtlinien des Landes Vorarlbergs und alle Vorgaben des nächstniederen Ökostandards 2. Letzterer erfüllt nach den Wohnbauförderungsrichtlinien des Landes Vorarlberg (2007) im Wesentlichen einen maximalen Heizwärmebedarf von 44,2 kWh/m²·a bei einem Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis von A/V=0,46, berechnet nach den Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik (Energieausweis für Wohngebäude). Ferner werden neben dem Heizwärmebedarf auch die restliche Energieversorgung sowie die Qualität des Energieträgers, die Qualität der Gebäudehülle, der Materialien, des Innenraums und des Standorts bewertet. Sämtliche Bewertungen fließen in den Gebäudeausweis für ökologischen Wohnbau des Landes Vorarlberg ein, der entsprechend die Anzahl der Ökopunkte ausweist. Insgesamt müssen in Summe aus bauökologischen und energetischen Maßnahmen bei Mehrwohnungshäusern mit Ökostandard 3 mindestens 200 Ökopunkte erreicht werden und mit Ökostandard 2 müssen mindestens 150 Ökopunkte vorliegen (vgl. Fellner & Lipp, 2007).

Die Firma Rhomberg Bau errichtete am Sandgrubenweg in Bregenz drei Mehrwohnungshäuser nach den Wohnbauförderungsrichtlinien des Landes Vorarlberg (2007) in der Ökologie-Kategorie Ökostandard 2 und ein Mehrwohnungshaus nach

Passivhausstandard gemäß Ökologie-Kategorie Ökostandard 3, entsprechend den Wohnbauförderungsrichtlinien des Landes Vorarlberg (s. Thür et al., 2006). Im Rahmen einer Längsschnittstudie soll nunmehr überprüft werden, ob die Zielvorgaben für Heizwärmebedarf und Wohnkomfort in der realen Nutzung erreicht werden. Es stellt sich die Frage, ob es bei Erfüllung des Ökostandard 3 zu einer Verbesserung des Wohnkomforts kommt. Im Falle von Abweichungen soll ergründet werden, worauf diese Abweichungen zurückgeführt werden können. Ferner gilt es zu prüfen, ob es einen Zusammenhang zwischen Wohnkomfort und realem Heizwärmeverbrauch gibt.

3. Untersuchungsgegenstand

Im Rahmen dieser von Juni 2010 bis März 2013 andauernden Studie wurden zwei von vier Mehrwohnhäuser im Wohnpark am Sandgrubenweg in Bregenz untersucht. Es handelt sich um Haus A und Haus B, die durch die Firma Rhomberg am Sandgrubenweg in Bregenz in der Zeit zwischen 2005 und 2009 errichtet wurden. Die Wohnungen waren seit dem ersten Quartal 2010 bezugsfertig und werden als Eigentumswohnungen genutzt. Gemeinsam mit den bereits zuvor errichteten Häusern C und D bilden sie einen modernen, architektonisch einheitlichen Gebäudekomplex in ruhiger Lage.

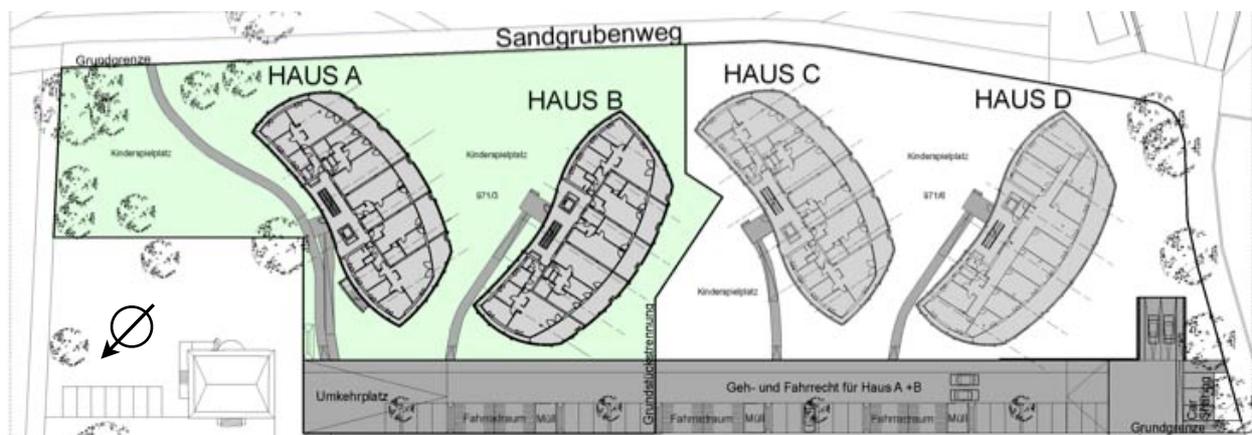


Abbildung 1. Übersichtsplan Wohnpark am Sandgrubenweg (grün=Untersuchungsobjekt).

Das Haus A wurde im Passivhausstandard gemäß Öko III Standard entsprechend den 2008 gültigen Wohnbauförderungsrichtlinien des Landes Vorarlberg errichtet. Der Einfachheit halber wird Haus A in diesem Bericht fortan als Passivhaus bezeichnet. Der spezifische Heizwärmebedarf nach den Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik (Energieausweis für Wohngebäude) wurde auf $9,03 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ berechnet. Das Passivhaus ist mit einer semizentralen kontrollierten Be- und Entlüftung mit zentralen Komponenten am Dach und jeweils dezentralen, kompakten Lüftungsgeräten in den einzelnen Wohneinheiten (Drexel & Weiß Modell aerosilent Micro und Centro) ausgestattet. Das Zentralgerät auf dem Dach wird durch eine solegefüllte Heizschlange, welche mit

Warmwasser aus der Warmwasseraufbereitung, frostfrei gehalten. Das Haus B wurde im Öko II Standard nach den Vorarlberger Förderrichtlinien 2006 errichtet, der errechnete Heizwärmebedarf beläuft sich hierbei auf 33,23 kWh/m²·a. Auch die erforderliche Anzahl von Ökopunkten in den restlichen Kriterien des Gebäudeausweises für ökologischen Wohnbau des Landes Vorarlberg konnte für beide Gebäudetypen erreicht werden. Wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich, unterscheiden sich die Gebäudehüllen des Passivhauses und des Niedrigenergiehauses in einigen der verwendeten Bauteile.

Tabelle 1. Wärmedurchgangskoeffizienten von Passivhaus und Niedrigenergiehaus.

U-Werte	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit
Außenwand hinterlüftet	0,145	0,145	W/m ² ·K
Fußboden zu Erde bzw. Außenluft	0,171	0,237	W/m ² ·K
Fußboden zu Tiefgarage	0,167	0,167	W/m ² ·K
warme Zwischendecke OG	0,196	0,318	W/m ² ·K
Flachdach	0,107	0,115	W/m ² ·K
Fenster und Türen Gesamtdurchschnitt	0,718	0,980	W/m ² ·K
Fenster Glas	0,5	0,7	W/m ² ·K
Fenster Rahmen	1,2	1,2	W/m ² ·K

Der im Vergleich zum Passivhaus höher berechnete Heizwärmebedarf des Niedrigenergiehauses resultiert primär aus dem höheren Wärmedurchgang der verwendeten Fenstergläser, den höheren Wärmeverlusten und den geringeren solaren Wärmegewinnen auf Grund der Gebäudeausrichtung. Die Raumheizung basiert in beiden Gebäudetypen auf einer Fußbodenheizung, die über einen in jeder Wohnung zentral angebrachten Touchscreen von Sontec (Touch3) gesteuert werden kann. Neben einer Einzelraumsteuerung ist auch das Festlegen verschiedener Sollwerte möglich, die sowohl zeitgesteuert (Nachtabsenkung) als auch manuell (An/Abwesenheit, Urlaub) abgerufen werden können. Eine zentrale Pelletsheizung im Niedrigenergiehaus fungiert als Wärmeerzeuger (Heizung und Warmwasser) für beide Wohnhäuser. Sämtliche Wohnungen verfügen über einen außen liegenden Sonnenschutz in Form von Seil geführten Textilscreens, die elektrisch gesteuert werden.

Das Passivhaus fasst 19 Wohnungen und das Niedrigenergiehaus fasst 22 Wohnungen. Alle Wohnungen hatten einen Zähler zur kontinuierlichen Erfassung der Heizwärme, der Soll- und Isttemperatur der Fußbodenheizung, des Warmwassers und Kaltwassers. Für die kontinuierliche Erfassung des Raumklimas wurden für das Passivhaus und das Niedrigenergiehaus jeweils vier Wohnungen mit einem Kohlendioxidsensor im

Wohnzimmer und je einem Feuchtigkeitssensor im Wohnzimmer, Schlafzimmer und Badezimmer ausgestattet. Bei den vier Wohnungen im Passivhaus handelt es sich um eine Wohnung im 1. Obergeschoss mit Südausrichtung, drei Heizkreisen und 57 m² Wohnnutzfläche, eine Wohnung im 2. Obergeschoss mit Südwestausrichtung, drei Heizkreisen und 95 m² Wohnnutzfläche, eine Wohnung im 3. Obergeschoss mit Südwestausrichtung, fünf Heizkreisen und 115 m² Wohnnutzfläche sowie eine Wohnung im 3. Obergeschoss mit Südostausrichtung, vier Heizkreisen und 81 m² Wohnnutzfläche.



Abbildung 2. Wohnungsgrundrisse von StudienteilnehmerInnen aus dem Passivhaus, die auch mit einem Kohlendioxidsensor im Wohnzimmer und je einem Feuchtigkeitssensor im Wohnzimmer, Schlafzimmer und Badezimmer ausgestattet wurden.

Bei den vier Wohnungen im Niedrigenergiehaus handelt es sich um eine Wohnung im Erdgeschoss mit Südausrichtung, fünf Heizkreisen und 95 m² Wohnnutzfläche, eine Wohnung im 1. Obergeschoss mit Westausrichtung, drei Heizkreisen und 55 m² Wohnnutzfläche, eine Wohnung im 2. Obergeschoss mit Nordwestausrichtung, vier Heizkreisen und 81 m² Wohnnutzfläche sowie eine Wohnung im 3. Obergeschoss mit Nordwestausrichtung, fünf Heizkreisen und 89 m² Wohnnutzfläche.

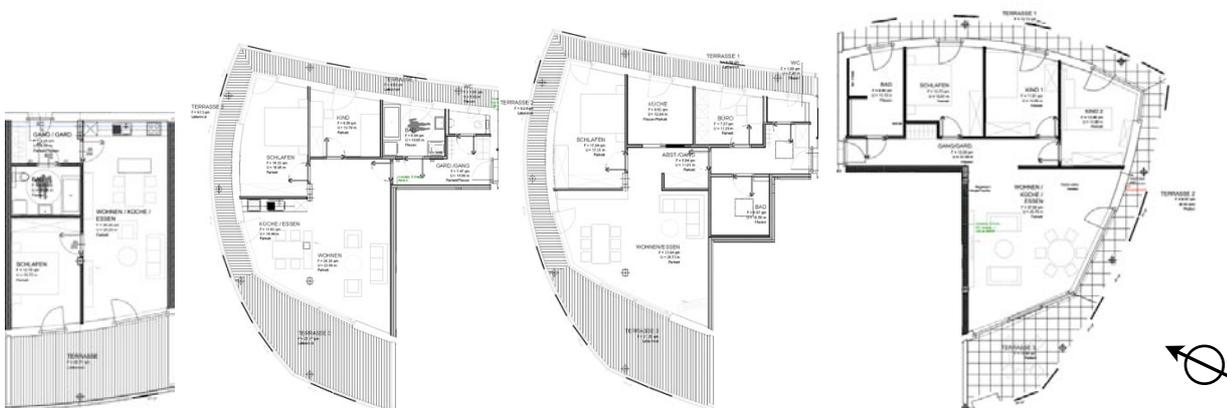


Abbildung 3. Wohnungsgrundrisse von StudienteilnehmerInnen aus dem Niedrigenergiehaus, die auch mit einem Kohlendioxidsensor im Wohnzimmer und je einem Feuchtigkeitssensor im Wohnzimmer, Schlafzimmer und Badezimmer ausgestattet wurden.

Tabelle 2. Wohnungen im Passivhaus und im Niedrigenergiehaus.

Passivhaus				Niedrigenergiehaus			
Etage	Wohnfläche	Heizkreise	Ausrichtung	Etage	Wohnfläche	Heizkreise	Ausrichtung
EG	95 m ²	5	Südwest	EG	81,7 m ²	4	Nordwest
EG	51,5 m ²	3	Süd	EG	74,7 m ²	4	West
EG	57,1 m ²	3	Süd	EG	57,1 m ²	3	West
EG	74,7 m ²	4	Süd	EG	51,5 m ²	3	West
EG	81,7 m ²	4	Südost	EG	95 m ²	5	Südwest
OG 1	95 m ²	5	Südwest	OG 1	75,6 m ²	4	Nordwest
OG 1	51,5 m ²	3	Süd	OG 1	55,9 m ²	3	West
OG 1	57,1 m ²	3	Süd	OG 1	57,1 m ²	3	West
OG 1	74,7 m ²	4	Süd	OG 1	55,3 m ²	3	West
OG 1	81,7 m ²	4	Südost	OG 1	57,1 m ²	3	Südwest
OG 2	95 m ²	3	Südwest	OG 1	51,1 m ²	3	Südost
OG 2	51,5 m ²	3	Süd	OG 2	75,6 m ²	4	Nordwest
OG 2	57,1 m ²	3	Süd	OG 2	55,9 m ²	3	West
OG 2	74,4 m ²	4	Süd	OG 2	57,1 m ²	3	West
OG 2	81,7 m ²	4	Südost	OG 2	55,3 m ²	3	West
OG 3	115 m ²	3	Südwest	OG 2	57,1 m ²	3	Südwest
OG 3	67 m ²	3	Süd	OG 2	51,1 m ²	3	Südost
OG 3	97,1 m ²	4	Süd	OG 3	89 m ²	3	Nordwest
OG 3	81,7 m ²	4	Südost	OG 3	67,4 m ²	4	West
				OG 3	57,1 m ²	3	West
				OG 3	51,5 m ²	3	West
				OG 3	95 m ²	5	Südwest
WFL	1440 m ²	-		-	1424 m ²	-	

Zusätzlich wurden die Außenlufttemperatur und die Außenluftfeuchtigkeit mit Hilfe einer Wetterstation vor Ort erfasst. Sämtliche Daten wurden zentral in einer Datenbank gespeichert (Datenspeicherung basierend auf Wertänderungen bzw. Zeitintervall).

4. Untersuchungsmethoden

Für die Messung der Verbräuche von Heizwärme, Warmwasser und Kaltwasser wurden die geeichten Wohnungszähler herangezogen. Die Messung des Raumklimas erfolgte sowohl über Raumsensoren für Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Kohlendioxidkonzentration in der Luft als auch mit Hilfe von mobilen Messgeräten für Luft- und Oberflächentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Kohlendioxidkonzentration, Luftstromgeschwindigkeit (Anemometer), Beleuchtungsstärke (Luxmeter), Schalldruckpegel, niederfrequente elektrische und hochfrequente elektromagnetische Strahlungen. Die Messung der Lufttemperatur mittels Raumsensoren erfolgte in allen Räumen einer Wohnung über die Thermostate der Einzelraumregelung. Die Raumsensoren für Luftfeuchtigkeit befanden sich jeweils im Wohnzimmer, (Eltern-) Schlafzimmer und im Badezimmer. Die Raumsensoren für Kohlendioxid befanden sich im Wohnzimmer. Die Messwerte der Raumsensoren wurden mit den Messwerten der mobilen Messgeräte abgeglichen. Die Außenlufttemperatur und die Außenluftfeuchtigkeit wurden mit Hilfe einer Wetterstation vor Ort erfasst. Für die Befragung der BewohnerInnen wurden drei verschiedene Fragebogen entwickelt. Ein Fragebogen erfasste die Personenmerkmale, ein weiterer Fragebogen die Langzeitbeurteilung von Winter- sowie Sommermonaten und ein Fragebogen wurde entwickelt, mit dem der Wohnkomfort monatlich abgefragt wurde.

Wohnkomfort ist jene Art von Behaglichkeit, die wir durch die Ausstattung unserer Wohnumwelt mit technischen Geräten erreichen (Buber et al., 2007). So zeigt insbesondere die Entwicklung des Wohnbauwesens, der Heizungs- und Lüftungstechnik, der Raumbelichtung und des Interieurs, wie wichtig dieses Komfortempfinden für die Menschen ist. Fragt man BewohnerInnen was sie mit Wohnkomfort in Verbindung bringen, so nennen sie in erster Linie äußere Faktoren wie gute Luftqualität (z.B. Frischluft, angenehme Luftfeuchtigkeit), Wärme bzw. Temperaturempfindung (z.B. Luft, Fußboden, Badewanne), helle Räume und Sonnenlicht, warme Farben und Raumgröße (ebd.). Wichtig erscheinen auch die jahreszeitlichen Unterschiede in der Komfortbewertung. Dementsprechend differenziert der Ökopass zwischen Behaglichkeit im Winter und Sommer (vgl. Lipp, 2004). Weitere Ökopass-Hauptkriterien sind Innenraumluftqualität, Tageslicht und Besonnung, Schallschutz, elektromagnetische Qualität und ökologische Qualität (Energie, Wasser und Materialien).

In ähnlicher Weise wie die Ausstattung unserer Wohnumwelt mit technischen Geräten zum Wohnkomfort beiträgt, so versuchen Bewohner auch durch ihr Verhalten Einfluss auf die eigene Behaglichkeit in der Wohnung zu nehmen. Das entsprechende Benutzerverhalten umfasst demnach die Raumlüftung (manuelle Fensterlüftung, automatische Be- und Entlüftung), die Änderung der Raumtemperaturen (Heizen, Kühlen, Beschatten), die Raumbelichtung (Kunstlicht, Besonnung), die Raumfarbenausstattung (Decken, Überzüge, Vorhänge, Bilder) und die Personenbelegung der Wohnung (Abwesenheiten, Besuche). Doch auch schon alleine die Möglichkeit der individuellen Einflussnahme kann den Wohnkomfort steigern (Rohregger et al., 2004).

5. Befragungsstichprobe

Das Passivhaus fasst 19 Wohnungen, das Niedrigenergiehaus fasst 22 Wohnungen. BewohnerInnen von jeweils vier Wohnungen pro Gebäudetyp wurden von Oktober 2010 bis Oktober 2012 monatlich und in Teilaspekten halbjährlich befragt. Die BewohnerInnen der restlichen Wohnungen wurden im Jahr 2012 halbjährlich befragt. Die Rücklaufquote der Fragebogen betrug 35%. Schlussendlich konnten pro Gebäude BewohnerInnen von je 7 Wohnungen in die Befragungsstichprobe aufgenommen werden. Die zwei Stichproben unterscheiden sich hinsichtlich der in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Kriterien nicht voneinander. Durchschnittlich waren die Wohneinheiten des Passivhauses mit 1,5 Personen belegt, welche die Wohnungen zu 84% der Zeit nutzten (ca. 14 h/Tag), und die Wohnungen des Niedrigenergiehauses waren durchschnittlich mit 2 Personen belegt, welche die Wohnung zu 98% der Zeit nutzten (ca. 15 h/Tag). Für das Passivhaus ergibt das bei einer Bruttogrundfläche von 1655,60 m² und 19 Wohnungen hochgerechnet eine Personenbelegung von zirka 60 m² pro Person. Für das Niedrigenergiehaus ergibt das bei einer Bruttogrundfläche von 1656,44 m² und 22 Wohnungen hochgerechnet eine Personenbelegung von zirka 40 m² pro Person.

Tabelle 3. Merkmale der Befragungsstichprobe (n=14).

Befragungsstichprobe	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Wohnungen	7	7	Anzahl	-
BewohnerInnen pro Wohnung	1,5	2	Anzahl	0,177
Personenbelegung	60	40	m ² /Person	-
Nutzungstage der Wohnung	84	98	% der Zeit	0,103
Nutzungszeit der Wohnung	14	15	h/Tag	0,257
Besucher in der Wohnung	3	4	h/Tag	0,363
Raucher (regelmäßig)	0	1	Anzahl	-
Wohnungen mit Haustieren	1	1	Anzahl	-
Pflanzen in der Wohnung	2,7	2,9	Anzahl	0,341
Umweltbewusstsein	2,1	2,2	Skala 0-3	0,288

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

Die Ermittlung des Anteils leerstehender Wohnungen erfolgte über eine Analyse des Kaltwasserverbrauchs. Wenn innerhalb eines gesamten Monats in einer Wohnung kein Kaltwasser verbraucht wurde, so wurde die Wohnung für diesen Monat als leerstehend betrachtet. Hierbei zeigt sich, dass spätestens im März 2011 die Wohnungen im

Passivhaus und im Niedrigenergiehaus fast vollständig belegt waren. Einzelne Wohnungen blieben zwischendurch ungenutzt. Ab November 2012 ist eine geringfügige Reduzierung der Wohnungsbelegung im Niedrigenergiehaus erkennbar.

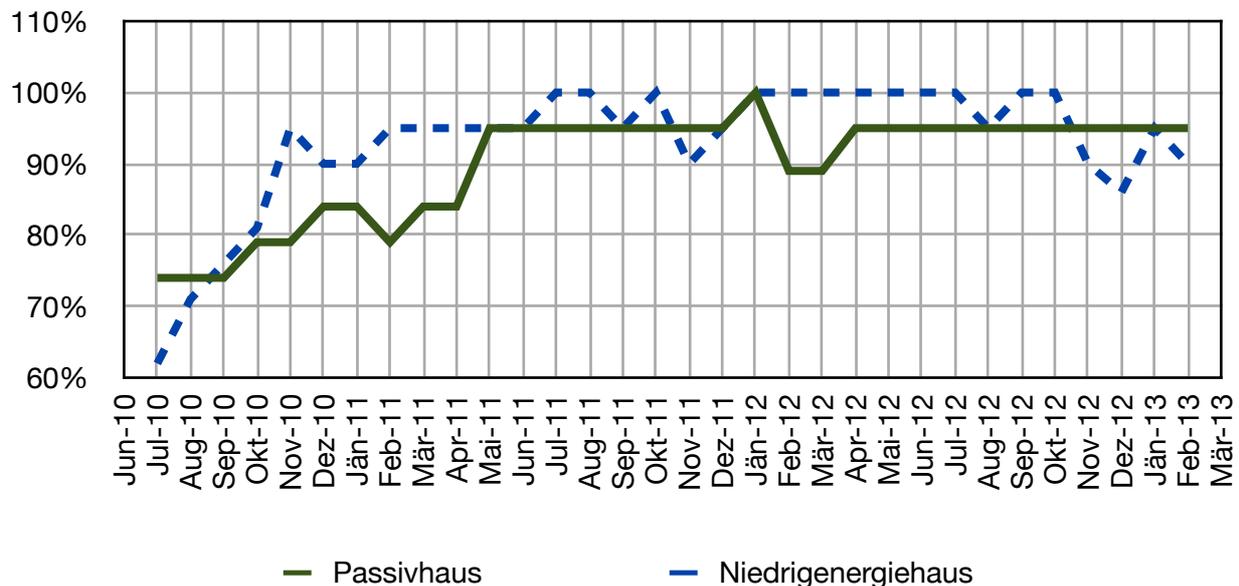


Abbildung 4. Anteil der Belegung vorhandener Wohnungen (%) im Passivhaus (gesamt 19 Wohnungen) und im Niedrigenergiehaus (gesamt 22 Wohnungen).

In der Stichprobe aus dem Niedrigenergiehaus befand sich ein Raucher. In der Stichprobe aus dem Passivhaus wurde in einer Wohnung den Besuchern das Rauchen erlaubt. In den Stichproben beider Gebäudetypen konnten etwa gleich viel Haustiere und Pflanzen in den Wohnungen gezählt werden. Das Umweltbewusstsein war in beiden Stichproben gleich ausgeprägt, d.h. sie versuchten so gut wie möglich auf die Umwelt zu achten. Gründe für den Erwerb einer Wohnung im Passivhaus waren entsprechend das Umweltbewusstsein aber auch der propagierte höhere Komfort, die geringeren Betriebskosten und die höhere Förderung (jeweils zu gleichen Anteilen). Auch der höhere Wiederverkaufswert wurde als Grund genannt. Während des Untersuchungszeitraums wurden in den Wohnungen einige Änderungen vorgenommen. Im Passivhaus wurde in einer Wohnung ein Ultraschallluftbefeuchter beschafft, in einer Wohnung die Luftauslassfolien entfernt, in einer Wohnung ein Dämmerungssensor für die Beschattung installiert und in drei Wohnungen der Temperaturfühler umpositioniert. Im Niedrigenergiehaus wurde in einer Wohnung ein großer Teppich entfernt.

6. Lüftungsverhalten

Jede Wohnung im Passivhaus verfügt über eine kontrollierte Be- und Entlüftung mit einem eigenen, dezentralen Gerät der Type aerosilent micro mit zwei Ventilatoren zur Volumenstromregelung und einen Abluftfilter. Für die Inbetriebnahme des Lüftungsgerätes

wird die Luftmenge für die Lüfterstufe 2 (Nennluftmenge) eingestellt. Die Luftwechselrate beträgt für die Wohnungen des Passivhauses durchschnittlich 0,5 1/h. Die abgesenkte und die erhöhte Luftmenge werden automatisch mit –30% (Lüfterstufe 1) bzw. +30% (Lüfterstufe 3) bestimmt. Die Befragungsergebnisse zeigen, dass die verschiedenen Lüfterstufen der Belüftungsanlage im Sommer und Winter gleich genutzt werden. Die Lüfterstufe 1 wird durchschnittlich zu 60% der Zeit genutzt, die Lüfterstufe 2 zu 30% und die Lüfterstufe 3 zu 5%. In durchschnittlich 5% der Zeit wird die Lüftung deaktiviert. Das Lüftungsverhalten der BewohnerInnen im Passivhaus hat sich im Vergleich zur vorigen Wohnung nach eigenen Angaben dahingehend verändert, dass sie die Fenster (aufgrund der kontrollierten Be- und Entlüftung) öfter geschlossen halten. Das Lüftungsverhalten der BewohnerInnen im Niedrigenergiehaus, die über keine kontrollierte Be- und Entlüftung verfügen, hat sich im Vergleich zur vorigen Wohnung nach eigenen Angaben nicht verändert.

In den Sommermonaten wurde eine bewusste Fensterlüftung im Passivhaus selten ($M_P=0,5$) und im Niedrigenergiehaus jeweils morgens und abends durchgeführt ($M_N=2,3$; $p=0,003$). Während der Sommertage machten die BewohnerInnen im Niedrigenergiehaus nach eigenen Angaben die Fenster länger ganz auf als die BewohnerInnen im Passivhaus ($M_P=1,2$ h/Tag; $M_N=3,4$ h/Tag; $p=0,043$). In den restlichen Parametern der Fensterlüftung unterscheiden sich die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses und des Passivhauses nicht signifikant, wenngleich die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses tendenziell die Fenster länger geöffnet bzw. gekippt halten als die BewohnerInnen des Passivhaus. Auch hinsichtlich der Durchführung von Raumbeschattungen unterscheiden sich die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses und des Passivhauses nicht signifikant, wenngleich die BewohnerInnen des Passivhaus nach eigenen Angaben tendenziell länger beschatten als die BewohnerInnen des Niedrigenergiehaus. Die Beschattung konnte mittels eines elektrobetriebenen Sonnenschutzes (Senkrechtmarkisen) durchgeführt werden und wurde sowohl als Blend- und Sichtschutz als auch für die Temperaturregelung verwendet. Die Wohnungen des Passivhauses erhalten im Sommer in der Mittagszeit die direkte Sonneneinstrahlung, die Wohnungen des Niedrigenergiehauses in der Abendzeit.

Tabelle 4. Merkmale des Lüftungsverhaltens im Sommer (n=14).

Lüftungsverhalten im Sommer	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Lüfterstufe 1 (0,35 1/h)	60	-	% der Zeit	-
Lüfterstufe 2 (0,50 1/h)	30	-	% der Zeit	-
Lüfterstufe 3 (0,65 1/h)	5	-	% der Zeit	-
Lüftung aus	5	-	% der Zeit	-
bewusste Fensterlüftung	0,5	2,3	Skala 0-3	0,003

Lüftungsverhalten im Sommer	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
gekipptes Fenster am Tag	1,5	4,4	h/Tag	0,160
offenes Fenster am Tag	1,2	3,4	h/Tag	0,043
gekipptes Fenster in der Nacht	4,1	6,5	h/Nacht	0,117
offenes Fenster in der Nacht	0,1	0,1	h/Nacht	0,381
manuelle Beschattung im Wohnzimmer	2,9	0,6	h/Tag	0,193
manuelle Beschattung im Schlafzimmer	5,1	0,1	h/Tag	0,197
manuelle Beschattung im Kinderzimmer	1,4	0,2	h/Tag	0,289

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

In den Wintermonaten wurde eine bewusste Fensterlüftung im Passivhaus ein Mal täglich ($M_P=0,8$) und im Niedrigenergiehaus jeweils morgens und abends durchgeführt ($M_N=2,2$; $p=0,003$). Während der Wintertage kippten die BewohnerInnen im Niedrigenergiehaus nach eigenen Angaben die Fenster länger als die BewohnerInnen im Passivhaus ($M_P=0,8$ h/Tag; $M_N=5,1$ h/Tag; $p=0,027$). In den restlichen Parameter der Fensterlüftung unterscheiden sich die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses und des Passivhauses nicht signifikant, wenngleich die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses tendenziell die Fenster länger geöffnet bzw. gekippt halten als die BewohnerInnen des Passivhauses. Auch hinsichtlich der Durchführung von Raumbeschattungen unterscheiden sich die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses und des Passivhauses im Winter nicht signifikant. In den Wintermonaten beschatteten aber die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses nach eigenen Angaben tendenziell länger (mit Ausnahme des Schlafzimmers) als die BewohnerInnen des Passivhauses. Dies deckt sich mit dem beobachteten Zusammenhang zwischen subjektiv eingeschätzter Luftdichtheit der Wohnung und der Beschattungsdauer im Winter ($p < 0,010$).

Tabelle 5. Merkmale des Lüftungsverhaltens im Winter (n=14).

Lüftungsverhalten im Winter	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Lüfterstufe 1 (0,35 1/h)	60	-	% der Zeit	-
Lüfterstufe 2 (0,50 1/h)	30	-	% der Zeit	-
Lüfterstufe 3 (0,65 1/h)	5	-	% der Zeit	-
Lüftung aus	5	-	% der Zeit	-
bewusste Fensterlüftung	0,8	2,2	Skala 0-3	0,016

Lüftungsverhalten im Winter	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
gekipptes Fenster am Tag	0,8	5,1	h/Tag	0,027
offenes Fenster am Tag	0,8	1,3	h/Tag	0,197
gekipptes Fenster in der Nacht	2,8	4,4	h/Nacht	0,245
offenes Fenster in der Nacht	0,4	0,1	h/Nacht	0,219
manuelle Beschattung im Wohnzimmer	1,2	2,7	h/Tag	0,150
manuelle Beschattung im Schlafzimmer	5,0	2,8	h/Tag	0,354
Beschattung im Kinderzimmer	1,5	3,9	h/Tag	0,194

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

7. Sonstiges Nutzungsverhalten

Die Häufigkeit der Nutzung von Elektrogeräten (Fernsehgerät, Computer, Waschmaschine, Geschirrspüler, Kochgeräte) war in den Wohnungen beider Gebäudetypen in etwa gleich. Im Niedrigenergiehaus wurde in einer Wohnung eine Elektroheizung im Bad zirka eine Stunde pro Tag genutzt. In keiner Wohnung wurde ein Wäschetrockner genutzt. Eine Lufttrocknung der Wäsche im Wohnzimmer, in der Küche oder im Büroraum führten BewohnerInnen des Passivhauses und des Niedrigenergiehauses etwa ein Mal pro Woche durch. Ansonsten wurde die Wäsche im Freien aufgehängt oder gelegentlich der Trockenraum genutzt. Die BewohnerInnen beider Gebäudetypen gaben an, dass sie ihre Wohnung seltener reinigen müssen als ihre vorherige Wohnung.

Tabelle 6. Merkmale des sonstigen Nutzungsverhaltens (n=8).

Nutzungsverhalten	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Fernsehgerätnutzung	1,5	2,6	Skala 0-3	0,127
Computernutzung	1,1	1,2	Skala 0-3	0,477
Waschmaschinennutzung	0,7	2,5	Skala 0-3	0,071
Wäschetrocknernutzung	-	-	-	-
Wäschelufttrocknung	0,7	0,5	Skala 0-4	0,250
Geschirrspülernutzung	0,9	1,7	Skala 0-3	0,293
Elektroheizungsnutzung	-	3,0	Skala 0-3	-

Nutzungsverhalten	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Kochen	0,7	1,7	Skala 0-3	0,153
Wohnungsreinigung	1,5	1,9	Skala 0-3	0,225

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

8. Baubiologische Kennwerte

Die baubiologischen Kennwerte wurden mit Hilfe mobiler Messgeräte von einer eingeschulten Person in den Jahren 2011 und 2012 vor Ort in jeweils drei von vier Wohnungen jeweils im Frühjahr (vorrangig Februar) und Herbst (im Oktober) gemessen. Die Auswahl der Kennwerte erfolgte auf der Basis vorausgegangener Untersuchungen (vgl. Wagner & Mauther, 2008). Der unterschiedlichen Himmelsausrichtung beider Gebäude wurde Rücksicht getragen, indem zu gleichen Anteilen Messungen am Vormittag (8:00-10:00) und Nachmittag (15:00-17:00 Uhr) vorgenommen wurden. Insgesamt konnten auf diese Weise 12 Messstichproben pro Gebäude vorgenommen werden, die als Gesamtstichprobe pro Gebäude miteinander vergleichbar sind. Für die statistische Testung wurden die Mittelwerte pro Wohnung herangezogen.

Tabelle 7. Baubiologische Kennwerte in den Wohnzimmern (n=8).

Singulärmessungen im Wohnzimmer	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Helligkeit am Fenster (ohne Leuchte)	1613	2235	lx	0,207
Helligkeit am Esstisch (ohne Leuchte)	246	530	lx	0,050
Helligkeit am Esstisch (mit Leuchte)	641	647	lx	0,496
Schalldruckpegel	30	32	dB	0,161
Kohlendioxid	581	682	ppm	0,282
Luftfeuchtigkeit	43	50	%	0,065
Lufttemperatur	22	21	°C	0,083
Bodentemperatur	22	22	°C	0,424
Wandtemperatur	20	20	°C	0,285
Fenstertemperatur	19	18	°C	0,156
Luftstrom am Lüftungsauslass	0,58	-	m/s	-
Luftstrom am Lüftungsabzug	2,34	-	m/s	-

Singulärmessungen im Wohnzimmer	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Luftstrom beim Türdurchlass	0,36	0,09	m/s	0,050
Niederfrequenz Elektromog am Tisch	7,0	6,1	V/m	0,404
Hochfrequenz Elektromog	67,7	48,1	mW/m ²	0,242

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

Die Helligkeitsmessungen wurden im Wohnzimmer jeweils im Schatten vorgenommen, d.h. ohne direkte Sonneneinstrahlung, indem innerhalb einer Messzeitdauer von einer Minute der Mittelwert aus Minimal- und Maximalwert ermittelt wurde. Zwischen den vier Wohnungen beider Gebäudetypen lässt sich so kein signifikanter Unterschied ermitteln, wenngleich die BewohnerInnen im Passivhaus am Esstisch tendenziell eine geringere Tageslichthelligkeit im Raum haben ($p=0,050$). Diese Tendenz wird auch durch die Kommentare der BewohnerInnen im Niedrigenergiehaus bestätigt, welche die angenehme Helligkeit ihrer Wohnung hervorheben. In helleren Wohnungen wurden auch tendenziell mehr Besucher empfangen. Beim Einsatz von künstlicher Beleuchtung wird in beiden Gebäudetypen am Esstisch der Normwert für Lese- und Schreibarbeiten von 500 Lux (horizontal) erreicht bzw. überschritten (vgl. DIN EN 12464). In den Wohnzimmern lässt sich bezüglich Schalldruckpegel, Kohlendioxidmenge und Luftfeuchtigkeit kein signifikanter Unterschied nachweisen. Der höhere Schalldruckpegel bei geöffnetem Fenster wurde als unangenehm empfunden. Die Messwerte liegen innerhalb der TQ-Norm (vgl. ÖGNB, 2010). Der Schalldruckpegel ist bei rund 30 dB als sehr niedrig einzustufen und ist mit den bauakustischen TQ-Messungen vergleichbar (siehe Gutachten des Ökologischen Instituts für Umweltforschung). Die manuell gemessene Lufttemperatur ist im Passivhaus um 1 °C höher als im Niedrigenergiehaus. Dieser Messwertunterschied ist jedoch nicht statistisch signifikant. Die Temperatur des Fußboden, der Wand und der Fenster(-rahmen) im Wohnzimmer beider Gebäudetypen sind in einem Einzelmesswertvergleich ebenfalls vergleichbar. Die Oberflächentemperaturen der Wand sowohl im Passivhaus ($p < 0,001$) als auch im Niedrigenergiehaus ($p = 0,010$) sowie der Fenster(-rahmen) im Passivhaus ($p < 0,001$) und im Niedrigenergiehaus ($p = 0,010$) sind allerdings bis zu 3 °C niedriger als die Raumlufttemperatur. Der Luftstrom beim Türdurchlass zwischen den Räumen mit Lüftungsauslass und Lüftungsabzug (Überstromlüftung) ist im Passivhaus tendenziell stärker als bei vergleichbaren Türdurchlässen im Niedrigenergiehaus ohne Belüftungsanlage ($p = 0,050$). Mit einem Wert von 0,36 m/s liegt das Passivhaus in diesem Bereich geringfügig außerhalb der Behaglichkeitsbewertung durch den Ökopass ($< 0,15$ m/s). Dieser Luftzug kann sich aber nur bei geschlossener Türe bilden. Vergleichbare Messergebnisse erhält man auch beim Blower-Door Test (siehe Zertifikat über die Qualität der luftdichten Gebäudehülle). Der niederfrequente Elektromog am Tisch und der hochfrequente Elektromog in der Wohnung ist in beiden Gebäudetypen annähernd gleich stark ausgeprägt, liegt aber

unterhalb der von der deutschen Bundesanstalt für Strahlenschutz vorgegebenen Grenzwerte (vgl. Oberfeld, 2008).

Tabelle 8. Baubiologische Kennwerte in den Schlafzimmern (n=8).

Singulärmessungen im Schlafzimmer	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Schalldruckpegel	30	30	dB	0,249
Kohlendioxid	564	572	ppm	0,480
Luftfeuchtigkeit	42	48	%	0,126
Lufttemperatur	22	21	°C	0,100
Luftstrom am Bett	0,01	0,34	m/s	0,183
Niederfrequenz Elektromog am Bett	9,6	9,4	V/m	0,493

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

Ein Vergleich der Schlafzimmer beider Gebäudetypen zeigt keine signifikanten Unterschiede in den Messergebnissen. Schalldruckpegel, Kohlendioxidmenge und Luftfeuchtigkeit liegen innerhalb der TQ-Norm. Der Luftstrom am Bett im Niedrigenergiehaus ist tendenziell größer und liegt in diesem Gebäudetyp außerhalb der Behaglichkeitsbewertung durch den Ökopass ($< 0,15$ m/s). Der niederfrequente Elektromog am Bett ist in beiden Gebäudetypen annähernd gleich stark ausgeprägt und liegt mit Messwerten von rund 10 V/m über den baubiologischen Richtwerte für Schlafbereiche des Landes Salzburg ($< 0,3$ V/m potentialfrei gemessen).

9. Wohnkomfort

Die Auswahl der für die Untersuchung relevanten Kriterien des Wohnkomforts erfolgte auf der Basis vorausgegangener Studien mit Fokus auf das Wohlbefinden in Passivhäusern (vgl. Buber et al., 2007; Danner, 2003). Die BewohnerInnen beider Gebäudetypen beurteilen die generelle Behaglichkeit bei einer Skala von 0-3 (je geringer der Wert, desto behaglicher) im Sommer ($M_P=0,4$; $M_N=0,4$) und im Winter ($M_P=0,1$; $M_N=0,4$) als sehr hoch. Je größer die Behaglichkeit in der Wohnung im Sommer war, desto zufriedener waren die BewohnerInnen im Allgemeinen mit ihrer Wohnsituation und dem selbsteingeschätzten Komfort ($p < 0,010$). Die subjektiv eingeschätzte Luftqualität spielt hier eine große Rolle. Sowohl im Passivhaus als auch im Niedrigenergiehaus sind die BewohnerInnen mit der Luftqualität in der Wohnung im Sommer ($M_P=0,6$; $M_N=0,5$) und im Winter ($M_P=0,4$; $M_N=0,5$) zufrieden. Zwischen der Einschätzung der Luftqualität und der empfundenen Behaglichkeit in der Wohnung bestand ein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,010$). In den Sommermonaten empfinden die BewohnerInnen beider Gebäudetypen die

Raumtemperatur in ihrer Wohnung am Tag ($M_P=86\%$ der Befragungen; $M_N=90\%$ der Befragungen) und in der Nacht ($M_P=71\%$ der Befragungen; $M_N=100\%$ der Befragungen) bei einem Großteil der 28 Befragungen als angenehm. In den restlichen Fällen gaben sie an, dass die Raumtemperatur zu hoch ist.

Tabelle 9. Subjektiver Wohnkomfort im Sommer (n=14).

Wohnkomfort im Sommer	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Generelle Behaglichkeit	0,4	0,4	Skala 0-3	0,336
Wohnungsluftqualität im Sommer	0,6	0,5	Skala 0-3	0,309
Angenehme Raumtemperatur am Tag	86	90	% der Befr.	0,424
Angenehme Raumtemperatur in der Nacht	71	100	% der Befr.	0,215

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p<0,050$)

In den Wintermonaten empfinden die BewohnerInnen beider Gebäudetypen die Raumtemperatur in ihrer Wohnung am Tag ($M_P=75\%$ der Befragungen; $M_N=100\%$ der Befragungen) und in der Nacht ($M_P=100\%$ der Befragungen; $M_N=100\%$ der Befragungen) bei fast allen wiederholten Befragungen als angenehm. Von BewohnerInnen des Passivhauses wurde gelegentlich die Raumtemperatur im Winter als zu niedrig empfunden.

Tabelle 10. Subjektiver Wohnkomfort im Winter (n=14).

Wohnkomfort im Winter	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Generelle Behaglichkeit	0,1	0,4	Skala 0-3	0,164
Wohnungsluftqualität im Winter	0,4	0,5	Skala 0-3	0,484
Angenehme Raumtemperatur am Tag	75	100	% der Befr.	0,348
Angenehme Raumtemperatur in der Nacht	100	100	% der Befr.	0,403

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p<0,050$)

Über das gesamte Jahr betrachtet wurde in beiden Gebäudetypen von den BewohnerInnen in den Befragungen meistens die Raumtemperatur am Tage als angenehm eingestuft. Im Passivhaus waren das 87% aller Befragungen (60 Mal angenehm und 9 Mal zu warm) und im Niedrigenergiehaus waren das 98 % aller Befragungen (47 Mal angenehm und ein Mal zu kalt). In der Nacht waren das im Passivhaus 86% aller Befragung (62 Mal angenehm und 8 Mal zu warm) und im Niedrigenergiehaus waren es 91% aller Befragungen (41 Mal angenehm, 3 Mal zu warm und ein Mal zu kalt). Die Temperatur der Bodenoberfläche wurde im Passivhaus in 97% aller Befragungen als angenehm empfunden (67 Mal angenehm und 3 Mal zu warm) und

im Niedrigenergiehaus in 93% aller Befragungen als angenehm (40 Mal angenehm und 3 Mal zu kalt). Die Temperatur der Wandoberfläche wurde im Passivhaus in 98% aller Befragungen als angenehm empfunden (69 Mal angenehm und ein Mal zu warm) und auch im Niedrigenergiehaus in 98% aller Befragungen als angenehm (42 Mal angenehm und ein Mal zu kalt). Bei einer geringeren Oberflächentemperatur der Wand im Winter ist auch eine geringere Behaglichkeit der BewohnerInnen zu beobachten ($p < 0,010$). Die Temperatur der Fensteroberfläche wurde im Passivhaus in 89% aller Befragungen als angenehm empfunden (62 Mal angenehm, 6 Mal zu warm und ein Mal zu kalt) und im Niedrigenergiehaus in 98% aller Befragungen als angenehm (42 Mal angenehm und ein Mal zu kalt). Die Luftfeuchtigkeit im Raum wurde im Passivhaus in 70% aller Befragungen als angenehm empfunden (42 Mal angenehm, 10 Mal zu niedrig und 8 Mal zu hoch) und im Niedrigenergiehaus in 86% aller Befragungen als angenehm (36 Mal angenehm und 7 Mal zu niedrig). Die zu hohe Raumfeuchtigkeit wurde im Passivhaus als schwüles Raumklima empfunden. Die zu niedrige Raumfeuchtigkeit wurde im Passivhaus in Form von Hautreizung sowie trockener Nasenschleimhäute empfunden und im Niedrigenergiehaus als trockener Hals.

Die BewohnerInnen beider Gebäudetypen empfinden die Sauberkeit der Raumluft in ihren Wohnungen gut bis sehr gut ($M_P = 0,4$; $M_N = 0,6$). Als Grund für die saubere Raumluft geben die BewohnerInnen des Passivhauses durchwegs die automatische Be- und Entlüftung an und die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses die von ihnen durchgeführte manuelle Fensterlüftung. Die subjektiv eingeschätzte Luftqualität hat einen Einfluss auf die empfundene Behaglichkeit in der Wohnung, d.h. es besteht ein Zusammenhang zwischen Luftqualität und Behaglichkeits- bzw. Komfortbewertung im Sommer und im Winter ($p < 0,010$). Sowohl im Passivhaus als auch im Niedrigenergiehaus nimmt ein Großteil von Besuchern der Wohnungen eine erhöhte Luftqualität und andere positive Aspekte wahr ($M_P = 80\%$ der Befragungen; $M_N = 86\%$ der Befragungen). Im Passivhaus wurde im Zuge der wiederholten Befragung einmal ein Feuchteschaden erwähnt (Abdichtung der Dachluke). Im Niedrigenergiehaus wurde im Zuge der wiederholten Befragung drei Mal auf einen Feuchteschaden hingewiesen (über der Badewanne und Wärmebrücke im Fensterbereich des Schlafzimmers). Alle Feuchteschäden konnten schließlich behoben werden.

Keiner der befragten BewohnerInnen hatte in der neuen Wohnung Allergien, die sie vorher nicht hatten. Im Niedrigenergiehaus wurden in 14% der Befragungen Probleme mit Stechmücken u.ä. erwähnt. Sowohl die BewohnerInnen des Passivhauses als auch des Niedrigenergiehauses gaben an, dass sie ihren Schlaf durchwegs als erholsam empfinden ($M_P = 0,8$; $M_N = 1,0$). Ein Grund für weniger guten Schlaf war das Wahrnehmen von Schlaggeräuschen des Beschattungssystems (Jalousien) bei Wind. Dies zeigt sich auch bei der Beurteilung der Geräuschbelästigung, die bei beiden Gebäudetypen gelegentlich wahrgenommen wurde ($M_P = 2,3$; $M_N = 2,2$). Genannt wurden z.B. Trittschallgeräusche, laut zuschlagende Wohnungstüren, WC-Spülungsgeräusche, Betriebsgeräusch der Belüftungsanlage und Schlaggeräusche des Beschattungssystems bei Wind. Geruchsbelästigungen wurden im Passivhaus in 7% der 70 wiederholten Befragungen

genannt und im Niedrigenergiehaus in 14% der 41 wiederholten Befragungen. Genannt wurden z.B. Rauchgeruch vom Kamin der zentralen Pelletsheizung, die "abgestandene" Zuluft der automatischen Belüftung im Sommer und Kochgeruch. Luftzug wurde im Passivhaus in 4% der 70 wiederholten Befragungen wahrgenommen. Im Niedrigenergiehaus wurde bei 41 wiederholten Befragungen in keinem Fall von einem wahrgenommenen Luftzug berichtet. Im Niedrigenergiehaus wurde ferner das offene Treppenhaus als unangenehm empfunden (speziell bei Schneesturm). Als positive Eigenschaften wurden von den BewohnerInnen beider Gebäudetypen die zentrale und ruhige Lage, die Qualität des verwendeten Baumaterials, die Raumhöhe aber auch die allgemein gute Schalldämmung erwähnt. Im Niedrigenergiehaus wurde insbesondere die Helligkeit der Räume durch das einfallende Tages- bzw. Sonnenlicht positiv hervorgehoben.

Tabelle 11. Allgemeiner subjektiver Wohnkomfort (n=14).

Wohnkomfort allgemein	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Angenehme Raumtemperatur am Tag	87	98	% der Befr.	0,425
Angenehme Raumtemperatur in der Nacht	86	91	% der Befr.	0,517
Angenehme Temperatur des Boden	97	93	% der Befr.	0,487
Angenehme Temperatur der Wand	98	98	% der Befr.	0,522
Angenehme Temperatur der Fenster	89	98	% der Befr.	0,402
Angenehme Raumluftfeuchtigkeit	70	86	% der Befr.	0,310
Sauberkeit der Raumluft	0,4	0,6	Skala 0-3	0,252
gutes Luftqualitätsurteil durch Besucher	80	86	% der Befr.	0,459
andere positive Urteile durch Besucher	80	86	% der Befr.	0,459
Probleme mit Feuchteschäden	4	11	% der Befr.	0,370
Probleme mit neuen Allergien	0	0	% der Befr.	-
Probleme mit Stechmücken u.ä.	0	14	% der Befr.	0,038
Schlafqualität	0,8	1,0	Skala 0-3	0,130
Geräuschbelästigung	2,3	2,2	Skala 0-3	0,457
Geruchsbelästigung	7	14	% der Befr.	0,261
Wahrnehmung eines Luftzugs	4	0	% der Befr.	0,043

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

Mit der Wohnsituation sind die BewohnerInnen beider Gebäudetypen im Allgemeinen sehr zufrieden ($M_P=0,2$; $M_N=0,3$). Bei der halbjährlichen subjektiven Einschätzung der eigenen Wohnung nach den Kriterien Ökologie, Energiebedarf, Luftdichtheit, Luftqualität, Komfort und Betriebskosten lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den BewohnerInnen des Passivhauses und des Niedrigenergiehauses feststellen.

Tabelle 12. Subjektive Einschätzung der Wohnqualität (n=14).

Allgemeine Bewertung	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Zufriedenheit mit der Wohnsituation	0,2	0,3	Skala 0-3	0,344
Einschätzung der Ökologie	0,8	0,6	Skala 0-3	0,333
Einschätzung des Energiebedarfs	0,6	0,7	Skala 0-3	0,438
Einschätzung der Luftdichtheit	0,3	0,4	Skala 0-3	0,439
Einschätzung der Luftqualität	0,4	0,5	Skala 0-3	0,298
Einschätzung des Wohnkomforts	0,4	0,5	Skala 0-3	0,296
Einschätzung der Betriebskosten	1,0	1,0	Skala 0-3	0,480

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p<0,050$)

10. Benutzerfreundlichkeit

Die Benutzerfreundlichkeit der eingesetzten Technologie kann sich sowohl auf den Energieverbrauch als auch auf den Wohnkomfort auswirken (vgl. Streicher et al., 2004). Das Heizsystem wurde im Zuge der wiederholten Befragung von allen Befragten immer als praktisch eingestuft. Die Bedienbarkeit des Heizsystems wurde nur von einem Bewohner im Passivhaus wiederholt als zu kompliziert eingestuft ($M_P=73\%$ der Befragungen; $M_N=100\%$ der Befragungen). Eine geringere Einschätzung der Bedienbarkeit des Heizsystems steht im Zusammenhang mit der subjektiv als weniger angenehm empfundenen Raumtemperatur ($p<0,010$).

Mit der Praktikabilität des Lüftungssystems (Funktion, Komfort etc.) waren die BewohnerInnen des Passivhauses generell zufrieden ($M=0,6$). Allerdings wurde auch erwähnt, dass sie zu einer unangenehmen Geräusentwicklung führe. Auch mit der Bedienbarkeit des Lüftungssystems waren die BewohnerInnen des Passivhauses generell zufrieden ($M=0,7$). Allerdings wurde auch erwähnt, dass sie zu wenig Einstellungsmöglichkeiten biete. Über die technischen Belange der Wohnung (Lüftung, Heizung, Beschattung etc.) sind die BewohnerInnen beider Gebäudetypen gut aufgeklärt worden ($M_P=0,6$; $M_N=0,9$).

Tabelle 13. Einschätzung zur Benutzerfreundlichkeit (n=14).

Bedienung	Passivhaus	Niedrigenergiehaus	Messeinheit	p*
Praktikabilität des Heizungssystems	100	100	% der Befr.	-
Bedienbarkeit des Heizungssystems	73	100	% der Befr.	0,176
Praktikabilität des Lüftungssystems	0,6	-	Skala 0-3	-
Bedienbarkeit des Lüftungssystems	0,7	-	Skala 0-3	-
Technische Aufklärung	0,6	0,9	Skala 0-3	0,165

*Irrtumswahrscheinlichkeit in der Inferenzstatistik (Signifikanz bei $p < 0,050$)

11. Luftqualität

In jeweils vier Wohnungen des Passivhauses und des Niedrigenergiehauses befanden sich Sensoren zur Messung der relativen Raumlufffeuchtigkeit im Wohnzimmer, (Eltern-) Schlafzimmer und Badezimmer. Sie registrierten im gesamten Erfassungszeitraum (Juni 2010 bis März 2013) den Anteil des Wasserdampfs am Gasgemisch in den Räumen (vgl. Schneider et al., 2006). Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass die Raumlufffeuchtigkeit in den Wohnungen des Passivhauses durchwegs geringer war als im Niedrigenergiehaus. Im Wohnzimmer betrug sie im Durchschnitt des Erfassungszeitraums $M_P=43\%$ bzw. $M_N=50\%$ ($p < 0,001$), im Schlafzimmer $M_P=45\%$ bzw. $M_N=57\%$ ($p < 0,001$) und im Badezimmer $M_P=47\%$ bzw. $M_N=53\%$ ($p < 0,001$).

Betrachtet man die Jahresverläufe der Raumlufffeuchtigkeit in den Zimmern beider Gebäudetypen so erkennt man, dass in den Sommermonaten die Raumlufffeuchtigkeit deutlich höher ist als in den Wintermonaten, mit Maximalwerten von $\max_P=66\%$ bzw. $\max_N=71\%$ und Minimalwerte von $\min_P=27\%$ bzw. $\min_N=40\%$. In den Räumen des Passivhauses unterschreitet die Raumlufffeuchtigkeit in den Wintermonaten also die **Behaglichkeitsgrenze** von 35% Feuchtigkeit laut Ökopass (vgl. Peper et al., 2011). Dies deckt sich auch mit den mündlichen Rückmeldungen der BewohnerInnen des Passivhauses, die im Winter beim Betreten der Wohnung den Unterschied zu draußen bemerkten. In den Sommermonaten überschreitet die Raumlufffeuchtigkeit in den Schlafräumen des Niedrigenergiehaus die Maximalgrenze von 65% laut Ökopass.

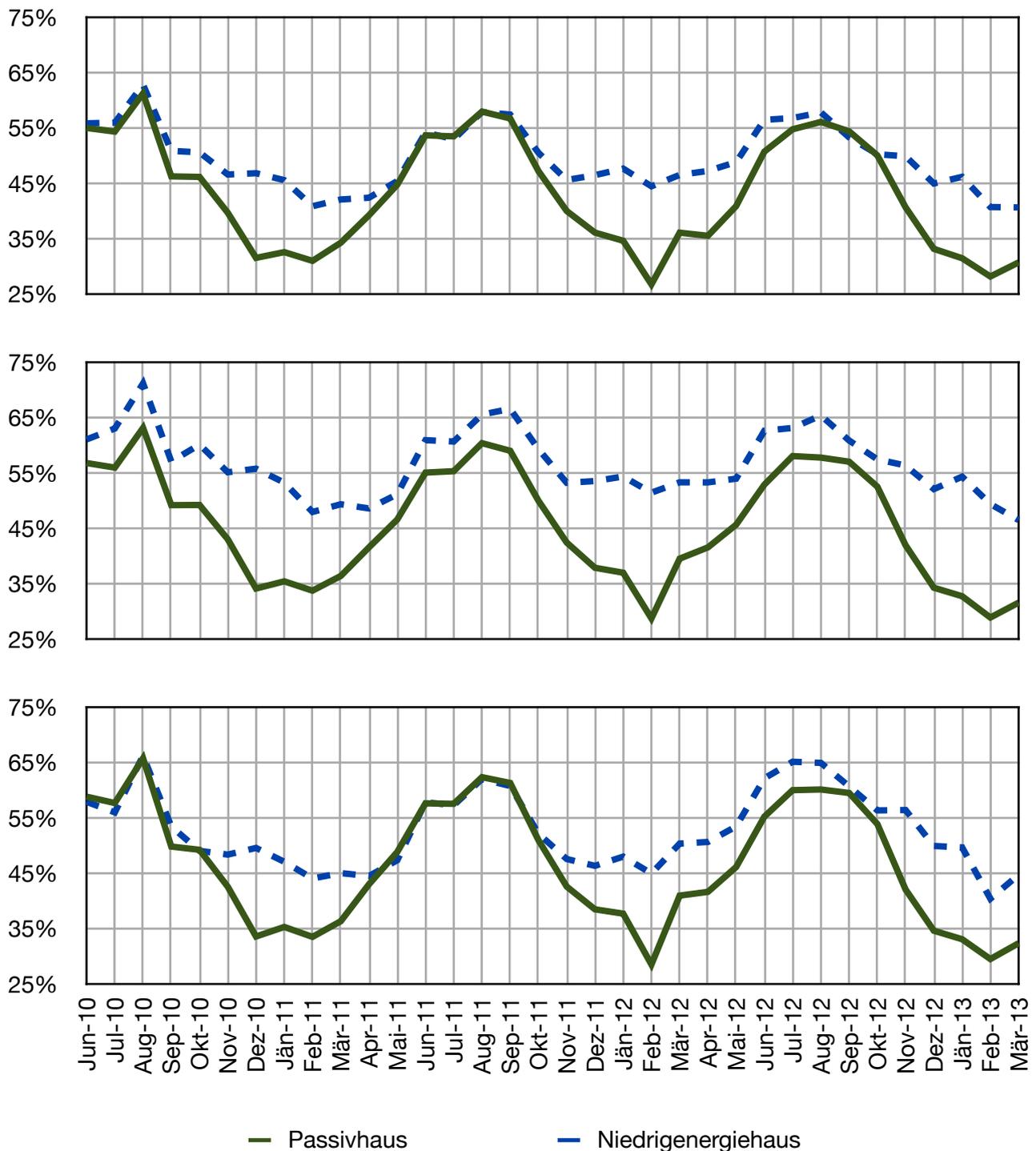


Abbildung 5. Monatsmittelwerte (n=8) der Raumlufffeuchtigkeit (%) im Wohnzimmer (oben), Schlafzimmer (Mitte) und Badezimmer (unten) von Passivhaus und Niedrigenergiehaus.

Eine Tageszeitvariation in der relativen Raumlufffeuchtigkeit konnte in den Wohnung kaum bemerkt werden. Verhältnismäßig am größten ist die Varianz im Badezimmer mit Varianzwerten von $VAR_P=0,18\%$ und $VAR_N=0,28\%$, mit Maximalwerten in den Morgen- und Abendstunden sowie Minimalwerten am Vormittag und Nachmittag.

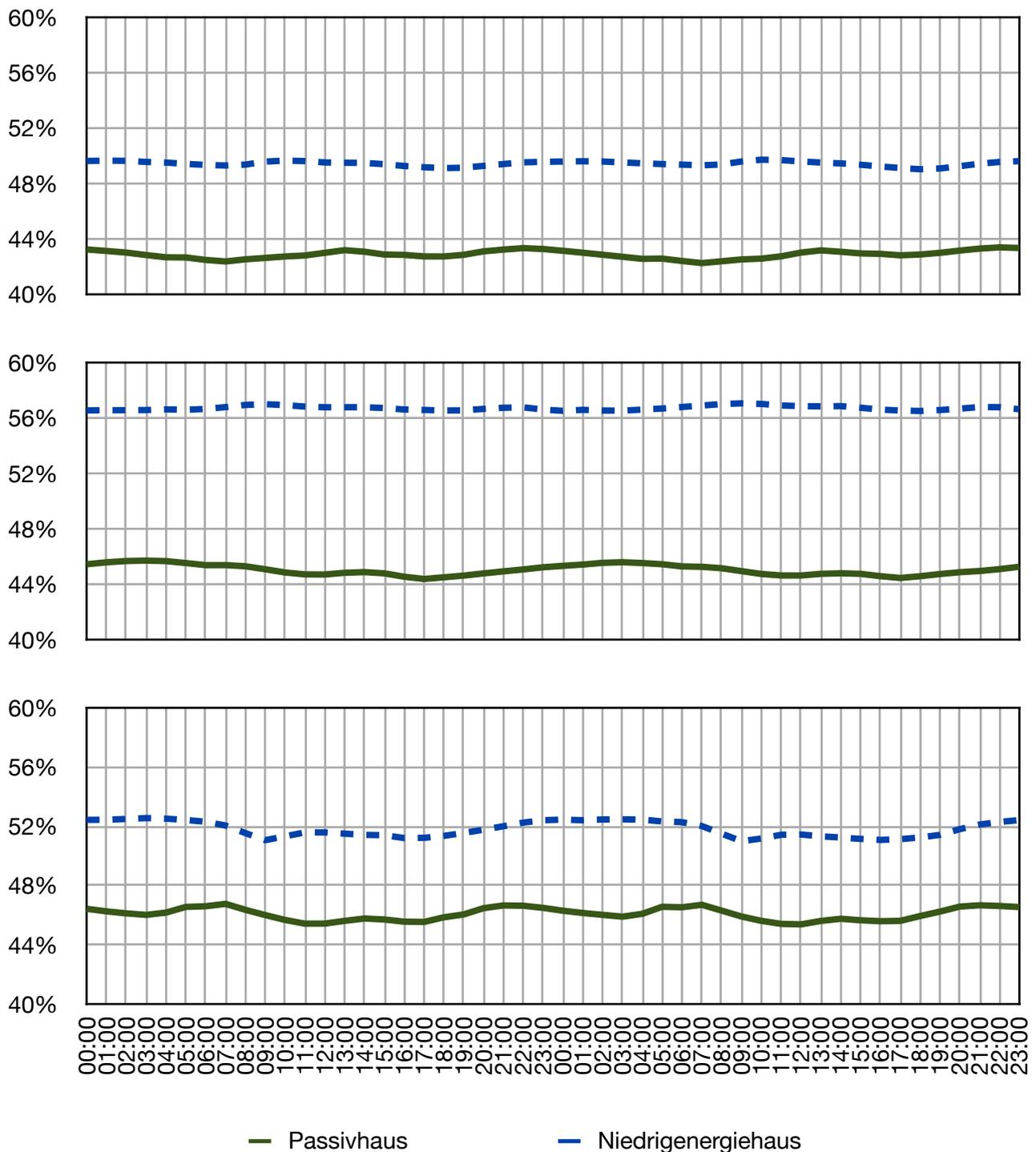


Abbildung 6. Stundenmittelwerte (n=8) der Raumlufffeuchtigkeit (%) im Wohnzimmer (oben), Schlafzimmer (Mitte) und Badezimmer (unten) von Passivhaus und Niedrigenergiehaus.

Die Kohlendioxidkonzentration in der Raumluff wurde mittels eines Kohlendioxidsensors im Wohnzimmer von je vier Wohnungen beider Gebäudetypen erfasst. Wenn man im Niedrigenergiehaus die Wohnung mit einem sehr starken Raucher mit berücksichtigt, dann ist die durchschnittliche Kohlendioxidkonzentration im Passivhaus deutlich geringer als im Niedrigenergiehaus ($M_P=538$ ppm; $M_N=707$ ppm; $p<0,001$). Schließt man die Wohnung mit

dem starken Raucher aus der Auswertung aus, dann verschwindet dieser Unterschied ($M_P=538$ ppm; $M_N=556$ ppm; $p<0,188$). Die Monatsmittelwerte im Zeitraum von Juni 2010 bis März 2013 zeigen dann auch einen deutlichen jahreszeitlichen Verlauf, mit Maximalwerten von 620 ppm im Passivhaus und 798 ppm im Niedrigenergiehaus während der Wintermonate sowie Minimalwerten von 464 ppm im Passivhaus und 465 ppm im Niedrigenergiehaus während der Sommermonate.

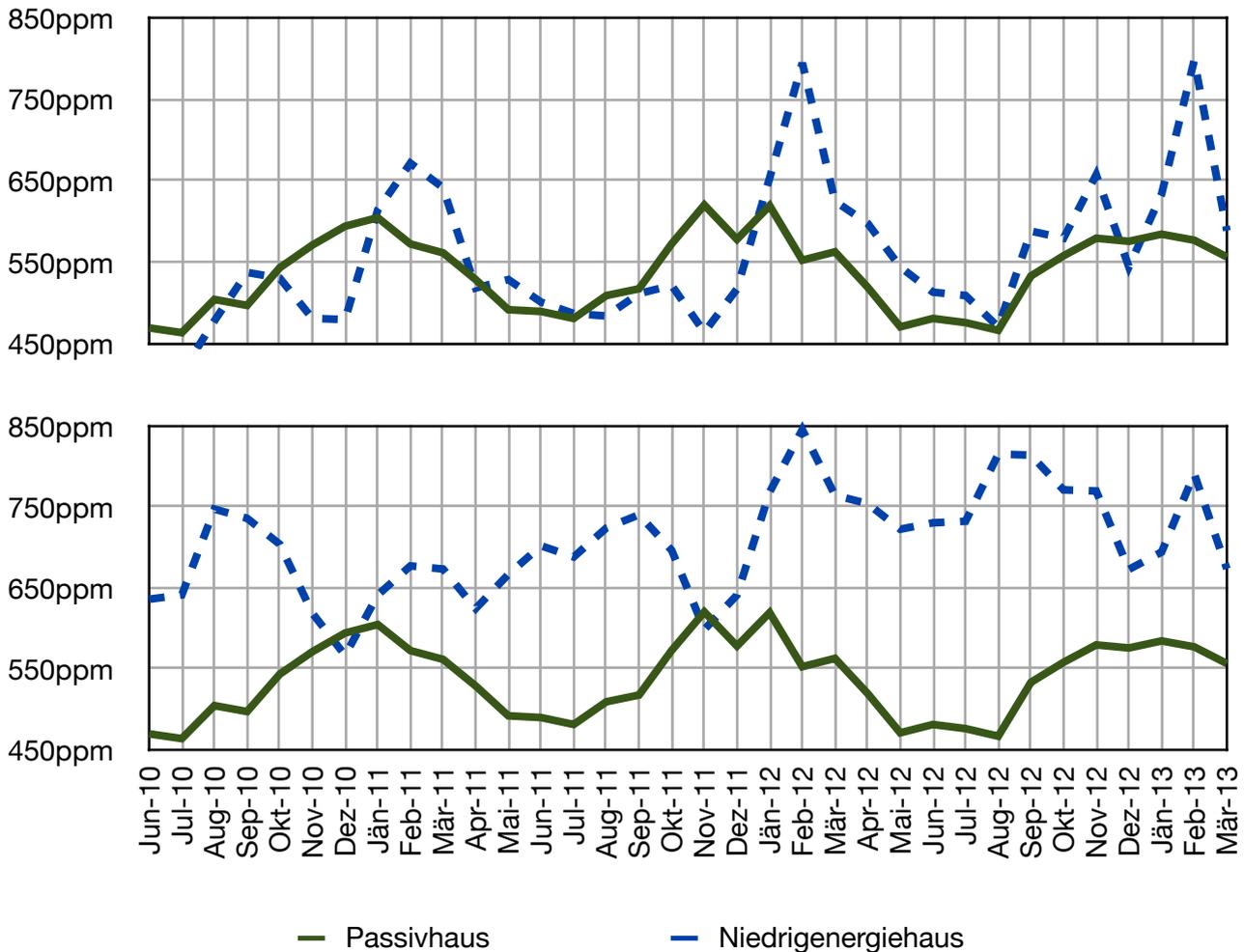


Abbildung 7. Monatsmittelwerte ($n=8$) der Kohlendioxidkonzentration (ppm) in den Wohnzimmern von Passivhaus und Niedrigenergiehaus ohne Raucher (oben) und mit Raucher (unten).

Auch ein deutlicher tageszeitlicher Verlauf in der Kohlendioxidkonzentration ist zu erkennen, mit Maximalwerten von $\max_P=587$ ppm im Passivhaus und $\max_N=738$ ppm (mit Raucher) bzw. $\max_N=590$ ppm (ohne Raucher) im Niedrigenergiehaus während der Morgen- und Abendstunden sowie Minimalwerten von $\min_P=502$ ppm im Passivhaus und $\min_N=679$ ppm (mit starkem Raucher) bzw. $\min_N=511$ ppm (ohne Raucher) im Niedrigenergiehaus während der Nachmittagszeiten. Die **Behaglichkeitsgrenze** von 1000 ppm laut DIN 1946 wird in den Mittelwerten in keinem Fall überschritten (vgl.

Umweltbundesamt, 2008). Betrachtet man die im Minutentakt erfassten Messwerte, so wird im Passivhaus die Behaglichkeitsgrenze bezüglich Kohlendioxidkonzentration in 0,4 % des Erfassungszeitraums überschritten und im Niedrigenergiehaus (mit dem Raucher) in 0,6 % des Erfassungszeitraums.

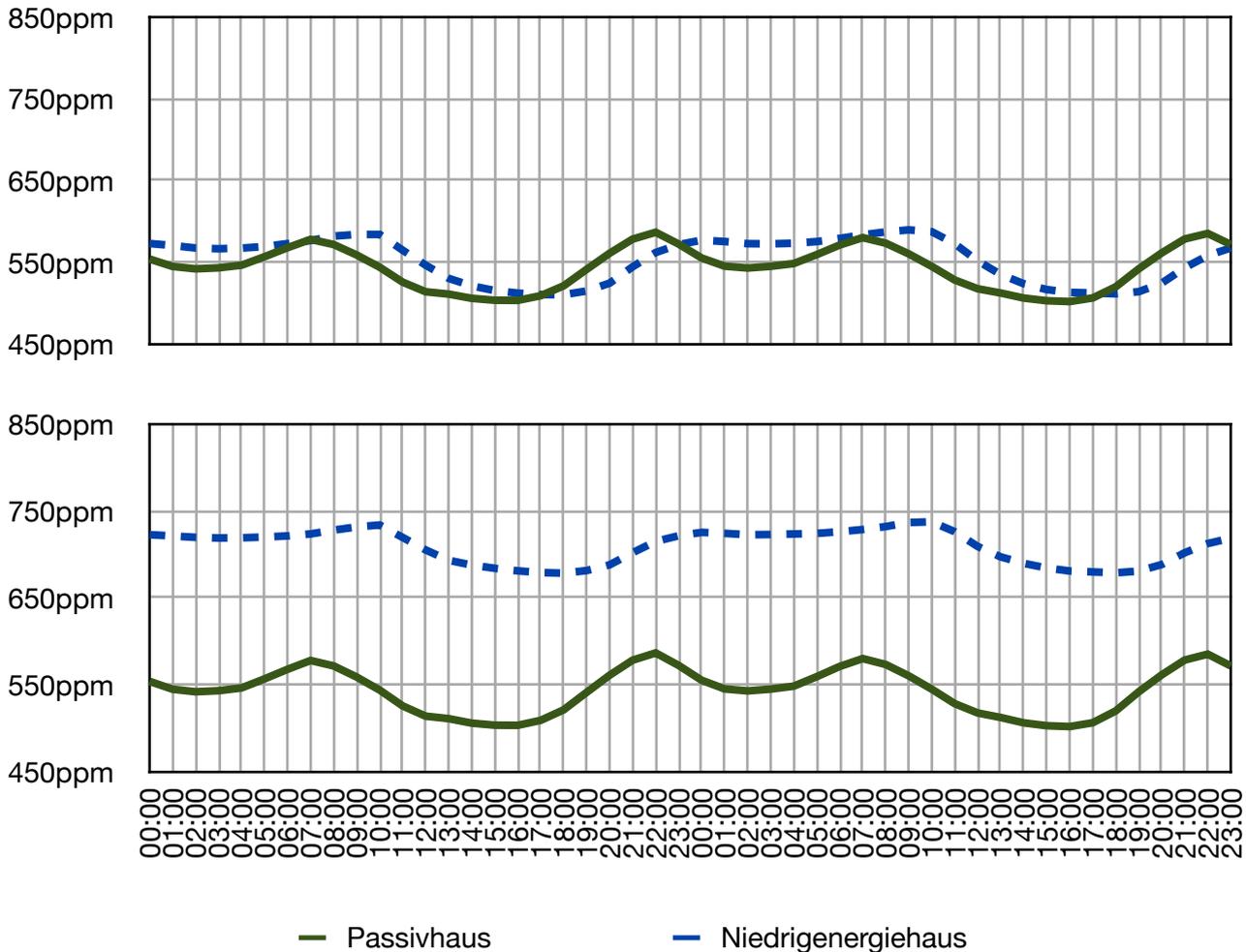


Abbildung 8. Stundenmittelwerte (n=8) der Kohlendioxidkonzentration (ppm) in den Wohnzimmern von Passivhaus und Niedrigenergiehaus ohne Raucher (oben) und mit Raucher (unten).

Die Raumheizung basiert in beiden Gebäudetypen auf einer Fußbodenheizung. Die Raumtemperatur im Wohnzimmer, (Eltern-) Schlafzimmer und Badezimmer konnte in allen Wohnungen beider Gebäudetypen über die kontrollierte Heizungssteuerung erfasst werden. Bei der Ist-Raumtemperatur konnte im Vergleich des Mittelwerts über den gesamten Erfassungszeitraum von Juni 2010 bis März 2013 konnte kein Unterschied zwischen Passivhaus und Niedrigenergiehaus festgestellt werden. Im Wohnzimmer betrug die Ist-Raumtemperatur durchschnittlich $M_P=22,3^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=22,1^\circ\text{C}$ ($p=0,309$), im Schlafzimmer $M_P=21,4^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=21,2^\circ\text{C}$ ($p=0,090$) und im Badezimmer $M_P=22,2^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=22,1^\circ\text{C}$ ($p=0,335$). Die Jahresverläufe waren in allen Räumen sehr ähnlich. Betrachtet

man die Monatsmittelwerte, so werden die **Behaglichkeitskriterien** laut Ökopass in den Sommermonaten von 22-25°C ($\max_P=24,7^\circ\text{C}$ bzw. $\max_N=25,5^\circ\text{C}$) und in den Wintermonaten von 18-22°C ($\min_P=19,9^\circ\text{C}$ bzw. $\min_N=20,1^\circ\text{C}$) sowohl im Passivhaus als auch im Niedrigenergiehaus weitgehend erfüllt (vgl. IBO, 2004).

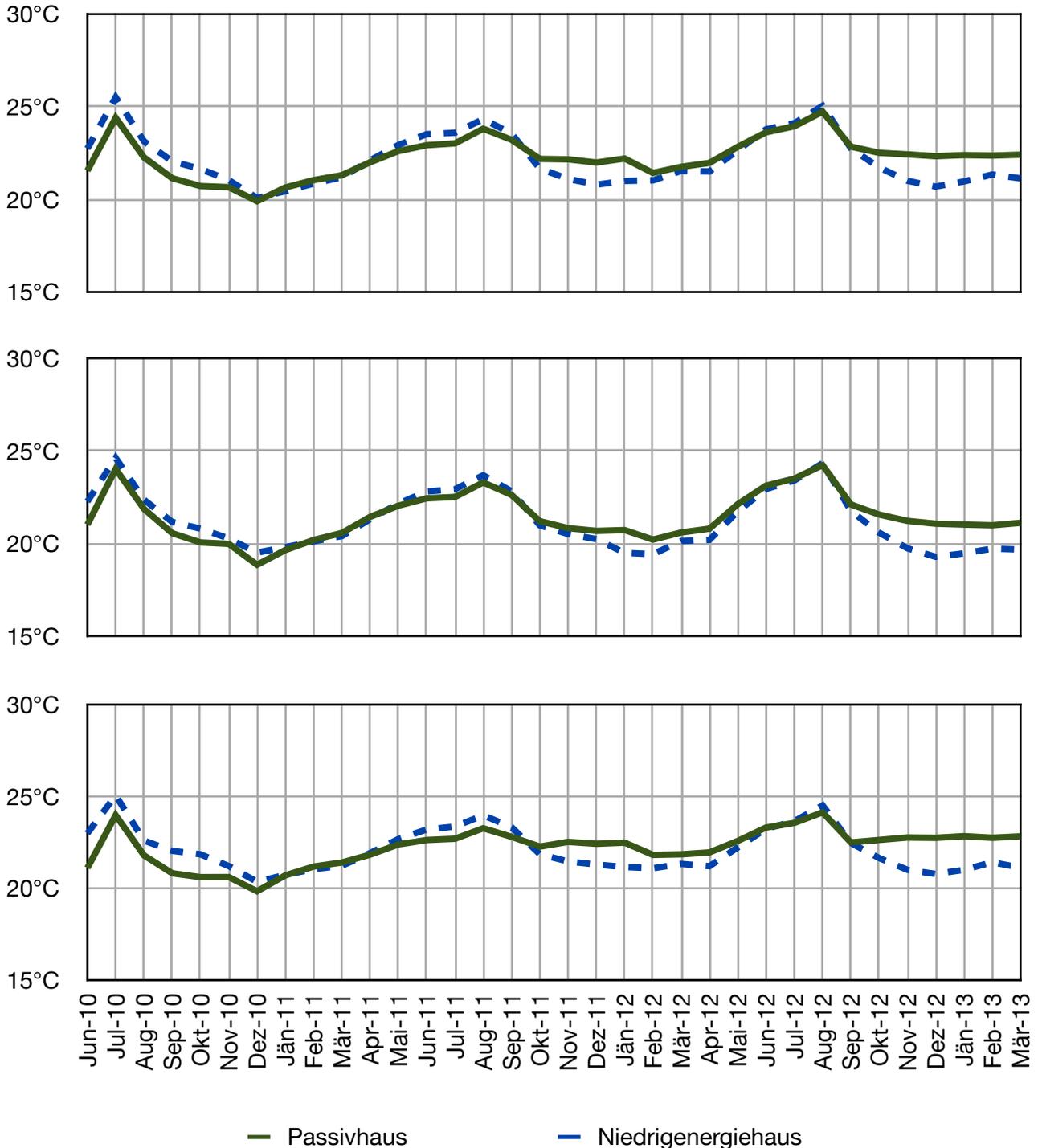


Abbildung 9. Monatsmittelwerte ($n=40$) der Ist-Raumtemperatur ($^\circ\text{C}$) im Wohnzimmer (oben), Schlafzimmer (Mitte) und Badezimmer (unten) von Passivhaus und Niedrigenergiehaus.

In der Ist-Raumtemperatur konnte allerdings eine deutliche und regelmäßige Variation im Tagesverlauf festgestellt werden, mit Minimalwerten (min=20,9°C) in den frühen Morgenstunden und Maximalwerten (max=22,5°C) in den frühen Abendstunden. Am niedrigsten war die Ist-Raumtemperatur im (Eltern-) Schlafzimmer, mit Minimalwerten von $\min_P=21,2^\circ\text{C}$ bzw. $\min_N=20,9^\circ\text{C}$ im Jahresmittel bzw. $\min_P=18,9^\circ\text{C}$ bzw. $\min_N=19,3^\circ\text{C}$ in den Wintermonaten.

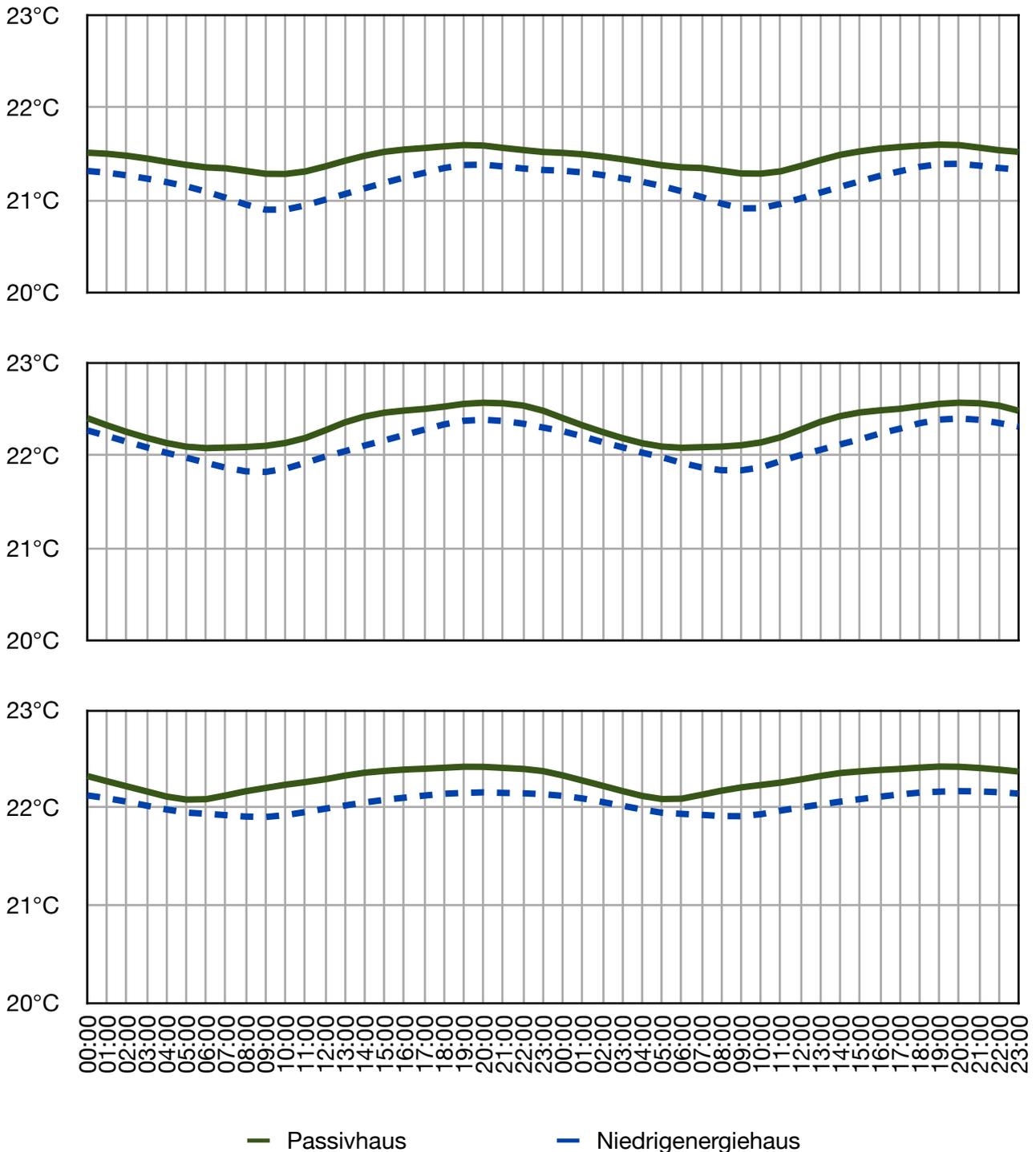


Abbildung 10. Stundenmittelwerte (n=40) der Ist-Raumtemperatur (°C) im Wohnzimmer (oben), Schlafzimmer (Mitte) und Badezimmer (unten) von Passivhaus und Niedrigenergiehaus.

In den Tagesverlaufskurven der Ist-Raumtemperaturen des Wohnzimmers $M_P=22,3^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=22,1^\circ\text{C}$ ($p<0,001$), des Schlafzimmers $M_P=21,5^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=21,2^\circ\text{C}$ ($p<0,001$) und des Badezimmers $M_P=22,3^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=22,0^\circ\text{C}$ ($p<0,001$) werden statistisch signifikante Mittelwertsunterschiede ersichtlich.

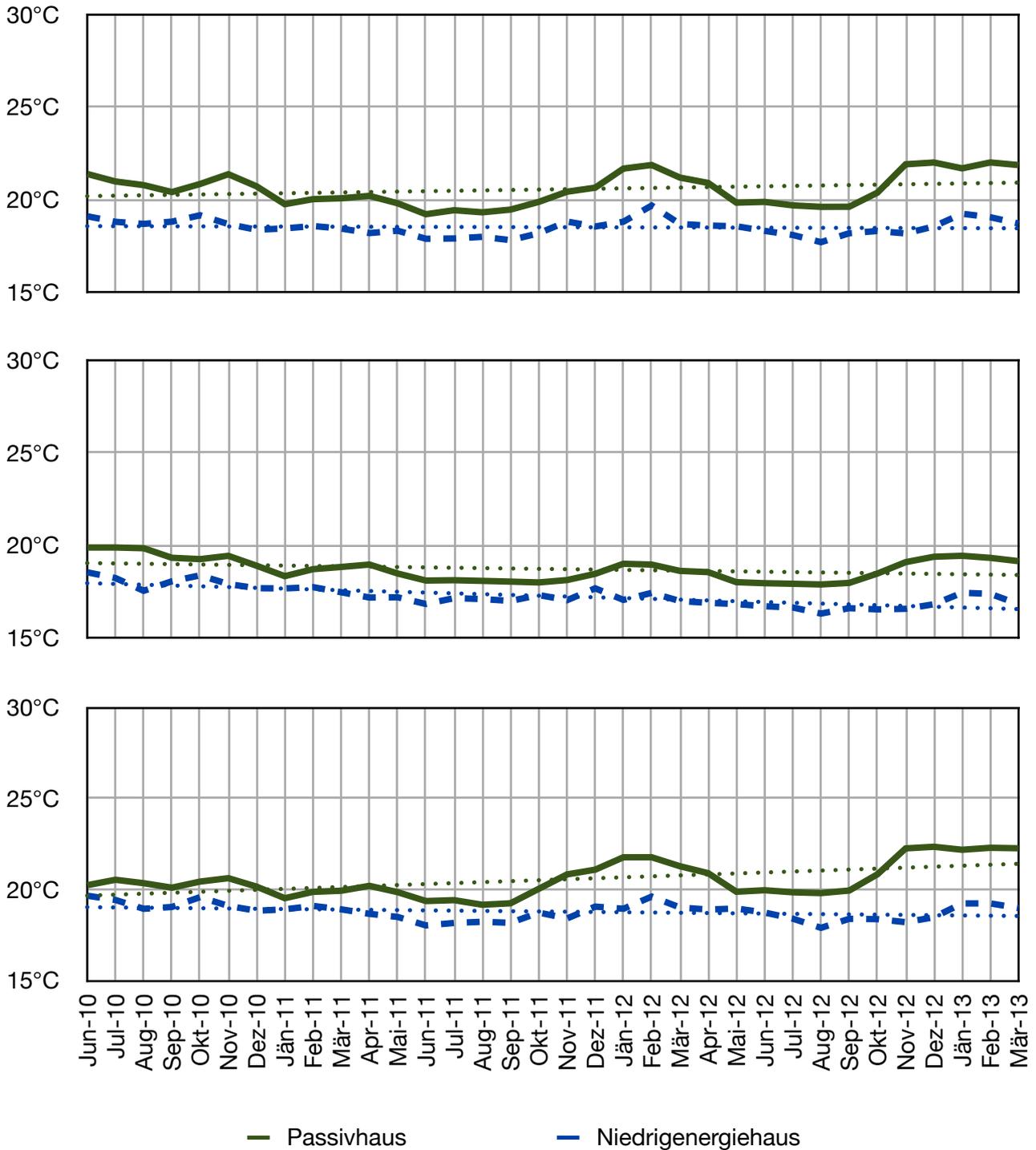


Abbildung 11. Monatsmittelwerte ($n=40$) und Trendlinien der von den BewohnerInnen eingestellten Soll-Raumtemperatur ($^\circ\text{C}$) im Wohnzimmer (oben), Schlafzimmer (Mitte) und Badezimmer (unten) von Passivhaus und Niedrigenergiehaus.

Die BewohnerInnen beider Gebäudetypen haben die Möglichkeit einer Einzelraumeinstellung der Soll-Raumtemperatur über einen in jeder Wohnung zentral angebrachten Touchscreen von Sontec (Touch3). Die Sollwerte können sowohl zeitgesteuert (Nachtabsenkung) als auch manuell (An/Abwesenheit, Urlaub) abgerufen werden. Im Gegensatz zur Ist-Raumtemperatur konnte bei der Soll-Raumtemperatur im Vergleich des Mittelwerts über den gesamten Erfassungszeitraum von Juni 2010 bis März 2013 ein deutlicher Unterschied zwischen Passivhaus und Niedrigenergiehaus festgestellt werden. Im Wohnzimmer betrug die Soll-Raumtemperatur durchschnittlich $M_P=20,5^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=18,5^\circ\text{C}$ ($p<0,001$), im Schlafzimmer $M_P=18,7^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=17,2^\circ\text{C}$ ($p<0,001$) und im Badezimmer $M_P=20,5^\circ\text{C}$ bzw. $M_N=18,8^\circ\text{C}$ ($p<0,001$). Im Passivhaus ist die durchschnittliche Soll-Raumtemperatur im Winter 2010/2011 im Wohn- und Schlafzimmer niedriger als in den nachfolgenden zwei Wintersaisons, während sie im Niedrigenergiehaus tendenziell unverändert bleibt.

12. Außenklima

Das Jahr 2010 war laut ZAMG ein kaltes Jahr mit relativ viel Niederschlägen. Die Jahre 2011 und 2012 waren laut ZAMG in Hinblick auf Lufttemperatur und Niederschläge hingegen weitgehend vergleichbar. Der Jahresdurchschnitt in der Lufttemperatur betrug $M_{2011}=11,2^\circ\text{C}$ bzw. $M_{2012}=11,5^\circ\text{C}$ ($p=0,300$) und in der relativen Luftfeuchtigkeit $M_{2011}=80\%$ bzw. $M_{2012}=80\%$ ($p=0,370$).

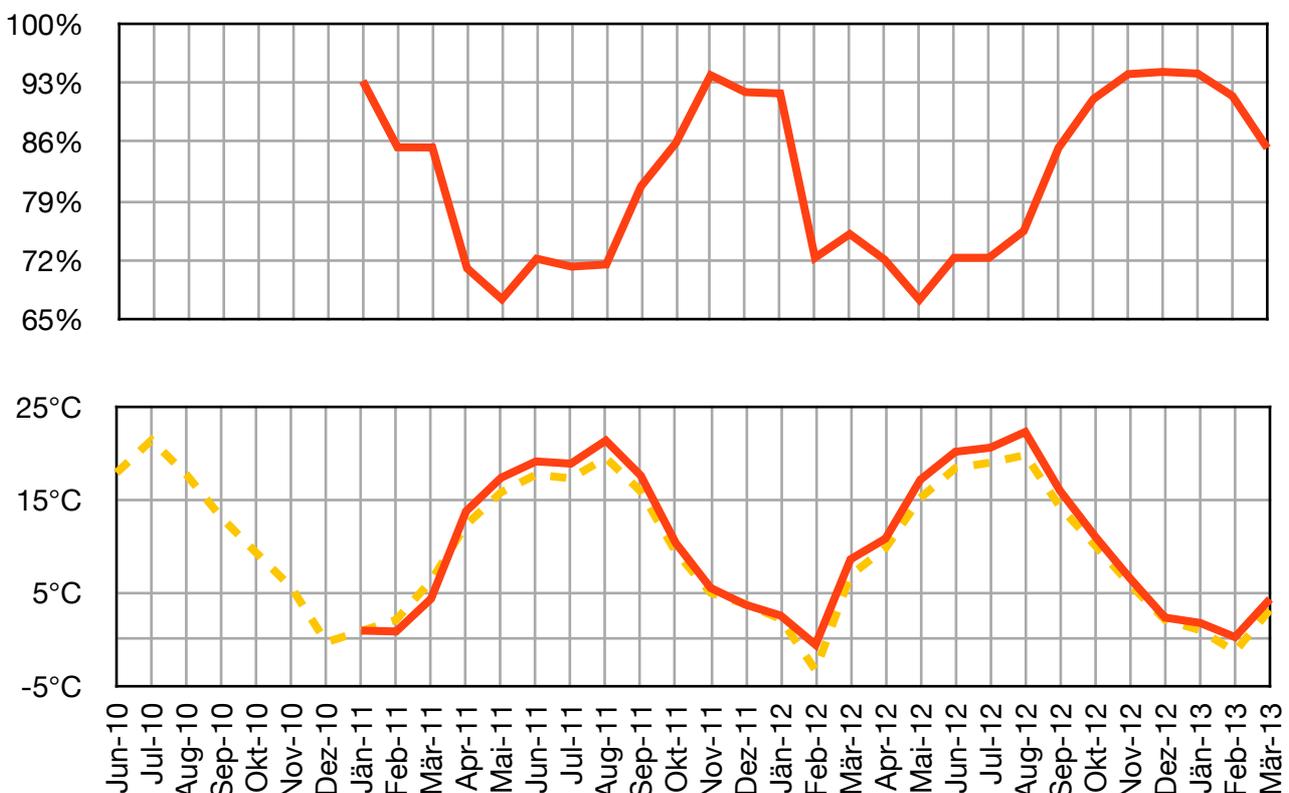


Abbildung 12. Monatsmittelwerte (orange) und ZAMG-Werte (gelb) für Luftfeuchtigkeit in % (oben) und Lufttemperatur in °C (unten) der Außenluft im Sandgrubenweg (Bregenz).

Die maximale Lufttemperatur betrug im Monatsmittel 22,3°C im Sommer und die minimale Lufttemperatur -0,6°C im Winter. Die maximale Luftfeuchtigkeit betrug im Monatsmittel 94% im Spätherbst und Frühwinter und die minimale Luftfeuchtigkeit 67% im Frühjahr und Fröhsommer. Die relative Luftfeuchtigkeit darf dabei nicht mit dem Dampfdruck verwechselt werden, der im Winter am geringsten und im Sommer am höchsten ist.

13. Wasserverbrauch

In allen Wohnungen im Passivhaus und Niedrigenergiehaus wurde der Warmwasser- und Kaltwasserverbrauch durch einen Wohnungszähler getrennt registriert. Die Warmwasseraufbereitung erfolgte über eine zentrale Holzpelletsheizung. Der Wasserverbrauch in den untersuchten Wohnungen konnte nicht mit der realen Bewohnerzahl in Verhältnis gesetzt werden, da nicht für alle Wohnungen die Anzahl der BewohnerInnen zuverlässig ermittelt werden konnte. Zwecks Vergleichbarkeit des Wasserbrauchs zwischen den Wohnungen der untersuchten Stichprobe und mit dem zu erwartenden Wasserverbrauch wurde der Verbrauch auf die Wohnungsfläche normiert. Die Bezugsgröße bleibt Liter pro Tag und Person, bei einer Annahme von 45 m²/Person Wohnfläche (vgl. Statistik Austria). Leerstehende Wohnungen wurden nicht berücksichtigt.

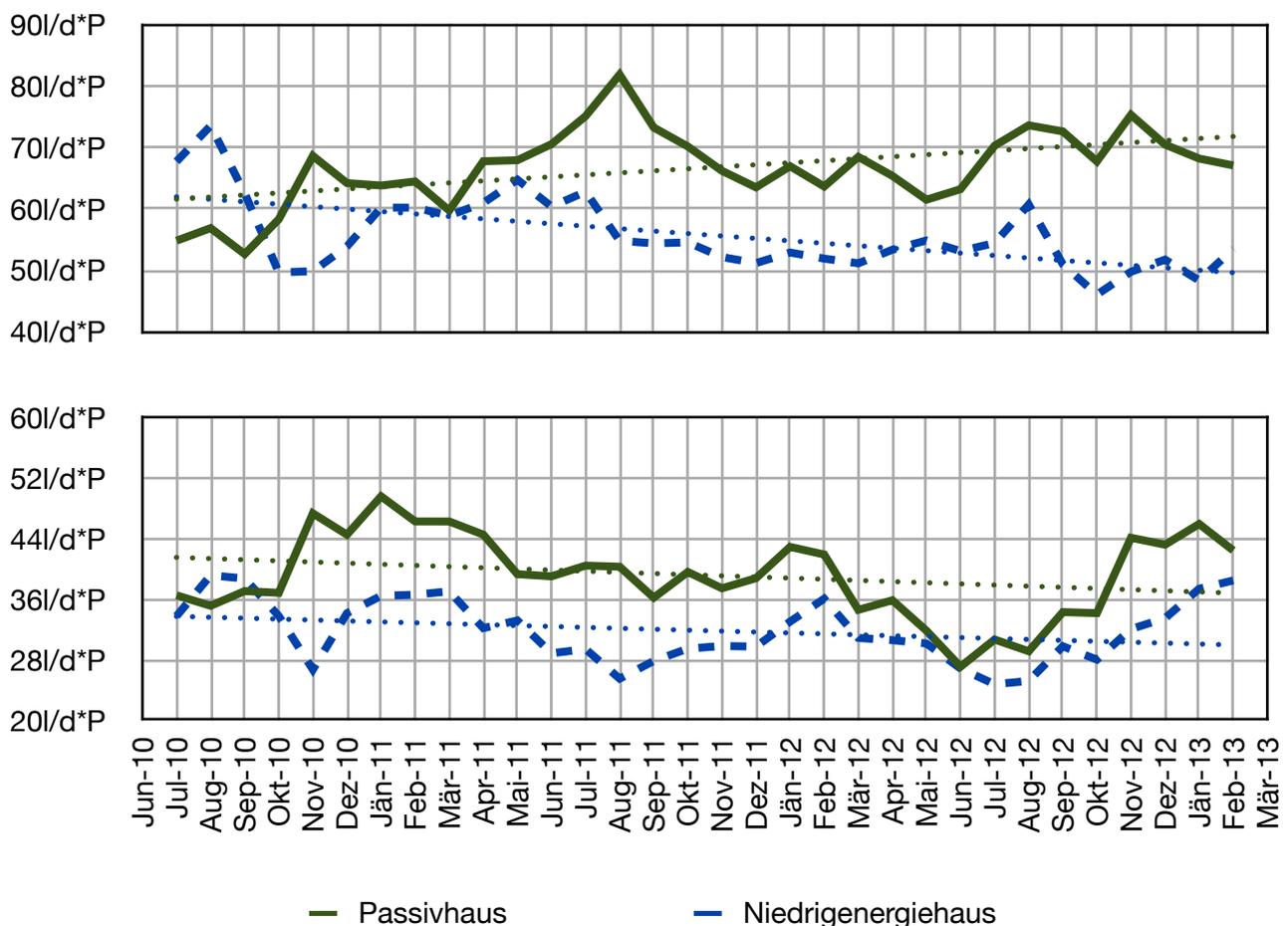


Abbildung 13. Monatsmittelwerte (n=40) und Trendlinien des Kaltwasserverbrauch (oben) und Warmwasserverbrauch (unten) in Passivhaus und Niedrigenergiehaus, angegeben mit Liter pro Tag und Person.

Der durchschnittliche Kaltwasserverbrauch im Passivhaus während des Erfassungszeitraums Juli 2012 bis Februar 2013 ist deutlich höher als der Verbrauch im Niedrigenergiehaus ($M_P=64,4$ l/d·P; $M_N=55,8$ l/d·P; $p<0,001$). Im Verlauf der Monatsmittelwerte zeigt sich, dass dieser Unterschied während des Erfassungszeitraum sukzessive größer wurde, vor allem bedingt durch die tendenzielle Abnahme des Kaltwasserverbrauchs im Niedrigenergiehaus.

Auch der für den Erfassungszeitraum registrierte durchschnittliche Warmwasserverbrauch im Passivhaus ist deutlich höher als der Verbrauch im Niedrigenergiehaus ($M_P=38,0$ l/d·P; $M_N=31,9$ l/d·P; $p<0,001$). Allerdings liegt der Warmwasserverbrauch im Vergleich zur VDI Richtlinie 2067 im mittleren Bereich. Errechnet man den Gesamtwasserverbrauch für die Jahre 2011 und 2012, so gibt das 106 l/d·P für das Passivhaus und 85 l/d·P für das Niedrigenergiehaus, das liegt deutlich unterhalb dem im Jahr 2012 von der Universität für Bodenkultur Wien ermittelten durchschnittlichen Wasserverbrauch von 135 l/d·P in Österreich (Neunteufel et al., 2012).

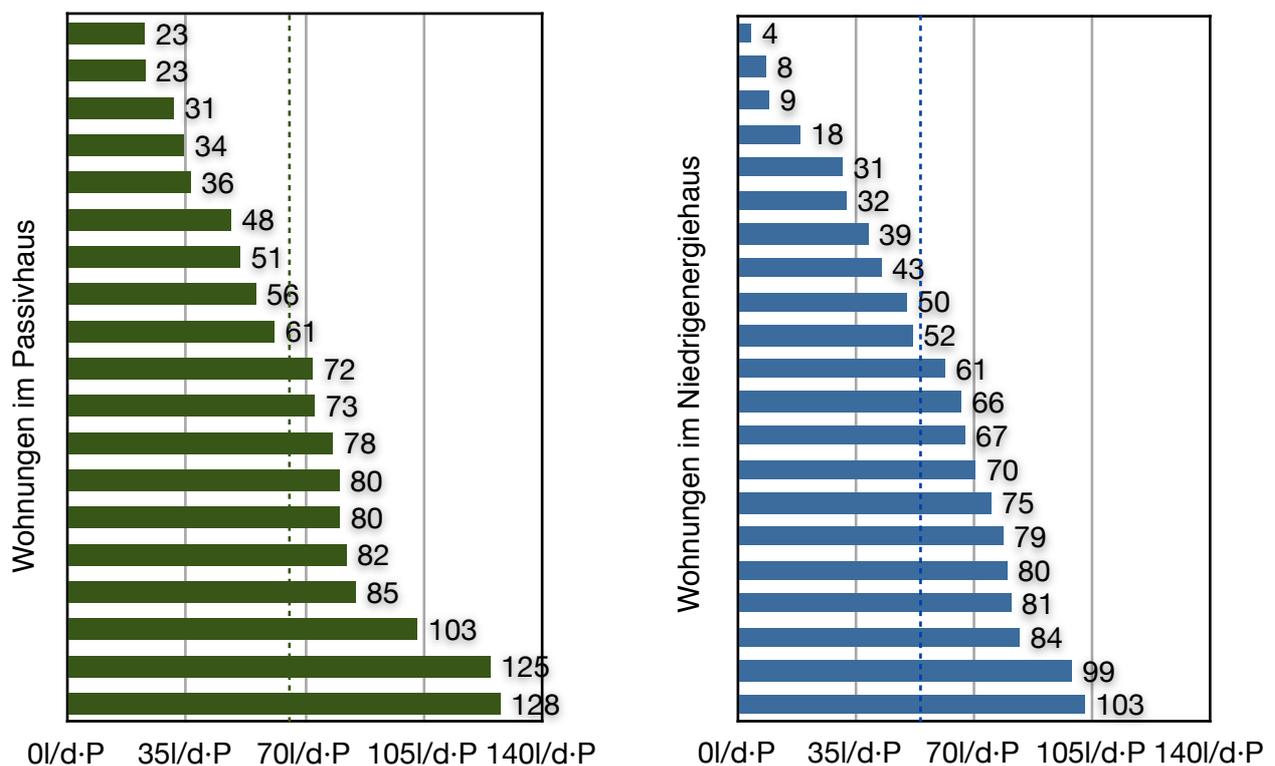


Abbildung 14. Durchschnittlicher Kaltwasserverbrauch (l/d·P) in Wohnungen des Passivhauses (links: $M_P=66,9$ l/d·P) und des Niedrigenergiehauses (rechts: $M_N=54,9$ l/d·P) während der Jahre 2011 und 2012.

Die Spannweite des Wasserverbrauchs während Jahre 2011 und 2012 ist in den einzelnen Wohnungen verhältnismäßig groß, bedingt auch durch Änderungen der Anzahl von Personen pro Wohnung im Erfassungszeitraum, die in der Berechnung des Literverbrauchs pro Tag und Person nicht vollständig berücksichtigt werden konnten. Beim

Warmwasserverbrauch reicht die Variation von 12,8 l/d·P bis 107,7 l/d·P für das Passivhaus und von 2,3 l/d·P bis 62,1 l/d·P für das Niedrigenergiehaus, beim Kaltwasserverbrauch reicht sie von 22,9 l/d·P bis 127,7 l/d·P für das Passivhaus und von 4,0 l/d·P bis 102,9 l/d·P für das Niedrigenergiehaus.

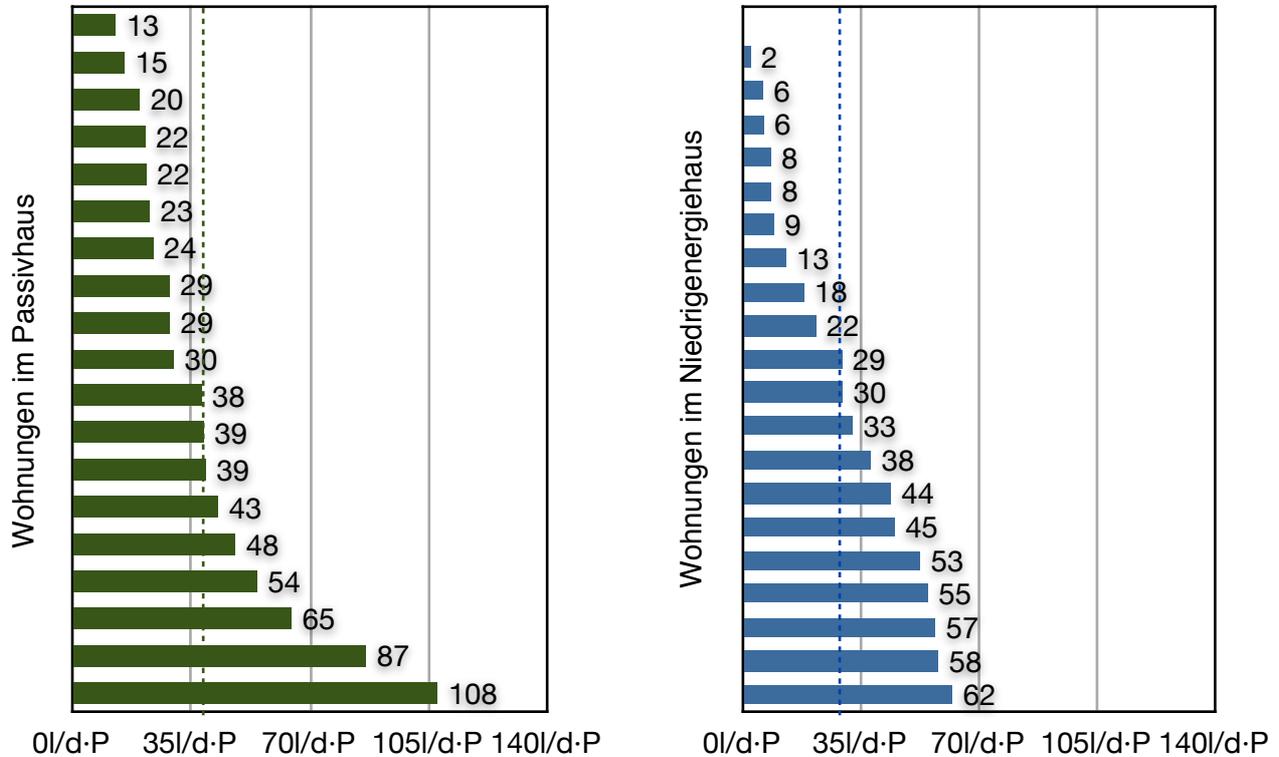


Abbildung 15. Durchschnittlicher Warmwasserverbrauch (l/d·P) in Wohnungen des Passivhauses (links: $M_P=39,3$ l/d·P) und des Niedrigenergiehauses (rechts: $M_N=29,8$ l/d·P) während der Jahre 2011 und 2012.

Der Warmwasserwärmebedarf wird laut Energieeinsparverordnung (EnEV) pauschal bei einem Bedarf von 23 l pro Person und Tag mit 12,5 kWh/m²·a angesetzt. Hochgerechnet auf den gemessenen Warmwasserverbrauch ergibt dies für das Passivhaus einen Warmwasserwärmeverbrauch von 21,4 kWh/m²·a und für das Niedrigenergiehaus einen Warmwasserwärmeverbrauch von 16,2 kWh/m²·a. Die Berechnung nach Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 “Energieeinsparung und Wärmeschutz” für beide Gebäudetypen weist einen Warmwasserwärmebedarf (WWWB) von jeweils 12,8 kWh/m²·a aus.

Damit liegen beide Gebäudetypen über dem erwarteten Warmwasserwärmebedarf. Der Heiztechnikenergiebedarf für die Warmwasseraufbereitung (HTEB-WW) konnte nicht mit Verbrauchswerten in Beziehung gesetzt werden. Es sind aber vor allem BewohnerInnen des Passivhauses, die über ein langes Warten auf Warmwasser klagen. Dies mag auch mit ein Grund für den größeren Warmwasserverbrauch im Passivhaus sein.

Tabelle 14. Energiekennzahlen für die Warmwasserbereitung.

Passivhaus	kWh/m ² ·a	Niedrigenergiehaus	kWh/m ² ·a
WW-Wärmebedarf <i>WWWB</i>	12,8	WW-Wärmebedarf <i>WWWB</i>	12,8
HT-Energiebedarf <i>HTEB-WW</i>	25,1	HT-Energiebedarf <i>HTEB-WW</i>	24,4
WW-Wärmeverbrauch <i>WWWV</i>	21,4	WW-Wärmeverbrauch <i>WWWV</i>	16,2

14. Stromverbrauch

Der von der Hausverwaltung erhobene Haushaltsstromverbrauch im Jahr 2011 betrug im Passivhaus $M_P=21,5$ kWh/m²·a und im Niedrigenergiehaus $M_N=19,3$ kWh/m²·a und zeigt keinen statistisch signifikanten Unterschied ($p=0,352$). Der Stromverbrauch der kontrollierten Be- und Entlüftung dürfte aber einen größeren Betrag ausmachen als die Differenz des Haushaltsstromverbrauchs zwischen beiden Gebäudetypen anzeigt. Im Vergleich zu einer Studie von Maas et al. (2007), die durchschnittlich von 20 kWh/m²·a Stromverbrauch (ohne Warmwasserenergie) bei Niedrigenergiehäusern und 36 kWh/m²·a (ohne Warmwasserenergie) bei den Passivhäusern ausgehen, liegt speziell der Stromverbrauch des Passivhauses im Wohnpark am Sandgrubenweg auf einem relativ niedrigem Niveau.

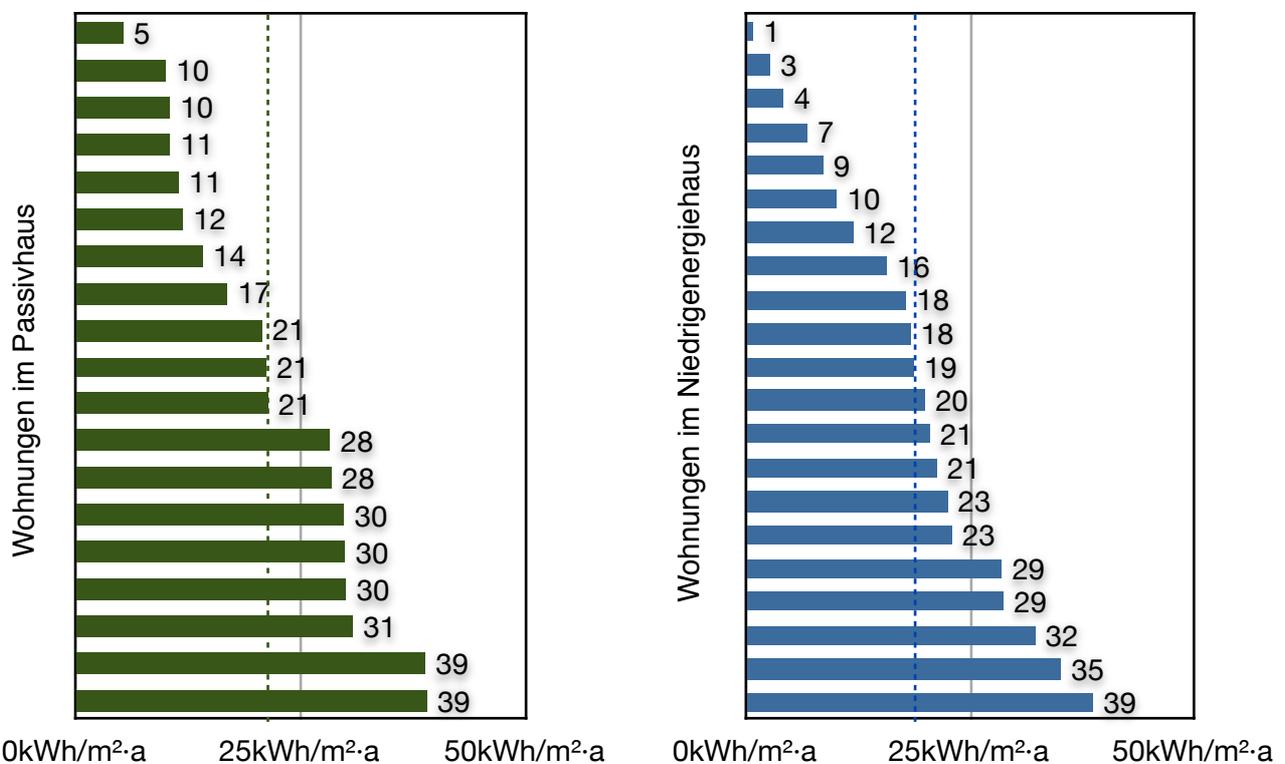


Abbildung 16. Durchschnittlicher Stromverbrauch (kWh/m²·a) in Wohnungen des Passivhauses (links: $M_P=21,5$ kWh/m²·a) und des Niedrigenergiehauses (rechts: $M_N=19,3$ kWh/m²·a) während des Jahres 2011.

15. Heizwärmeverbrauch

In allen Wohnungen beider Gebäudetypen befand sich je ein Wärmemengenzähler, der die verbrauchte Heizwärme mit der Messeinheit kWh registrierte. Der durch die Zähler registrierte Heizwärmeverbrauch ist im Erfassungszeitraum von Juni 2010 bis März 2013 im Passivhaus höher als im Niedrigenergiehaus ($M_P=41,9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$; $M_N=38,4 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$; $p=0,025$). Eine visuelle Inspektion der entsprechenden Monatsmittelwerte zeigt allerdings nur drei größere Abweichungen beider Verlaufskurven voneinander. Im Frühjahr 2011 ist der Heizwärmeverbrauch im Niedrigenergiehaus größer als im Passivhaus und im Herbst 2011 sowie im Herbst 2012 ist der Heizwärmeverbrauch im Passivhaus größer als im Niedrigenergiehaus. Der Heizwärmeverbrauch im Winter 2012/2013 unterscheidet sich vom Winter 2011/2012 und 2010/2011 recht deutlich durch einen geringeren Verbrauch, der im Niedrigenergiehaus deutlicher zu Tage tritt. Die größere Abnahme des Heizwärmeverbrauchs im Niedrigenergiehaus im Vergleich zum Passivhaus lässt sich nicht ausschließlich durch eine Reduzierung der Wohnungsbelegung erklären, denn im Winter 2010/2011 gab es deutlich geringere Belegungen in den Wohnungen beider Gebäudetypen und der Heizwärmeverbrauch war in beiden Gebäudetypen höher. Allerdings war die Außenlufttemperatur in den Monaten Dezember bis Februar in den ersten zwei Jahren geringfügig aber vergleichbar kühler als im Winter 2012/2013. Generell erreicht der Heizwärmeverbrauch naturgemäß in den Sommermonaten ein Minimum, wobei er nur im August 2012 gänzlich gegen Null geht. Zwischen dem durchschnittlichen Heizwärmeverbrauch und der spezifischen Behaglichkeit im Winter oder der allgemeinen Einschätzung des Wohnkomforts lässt sich in der untersuchten Stichprobe kein Zusammenhang feststellen.

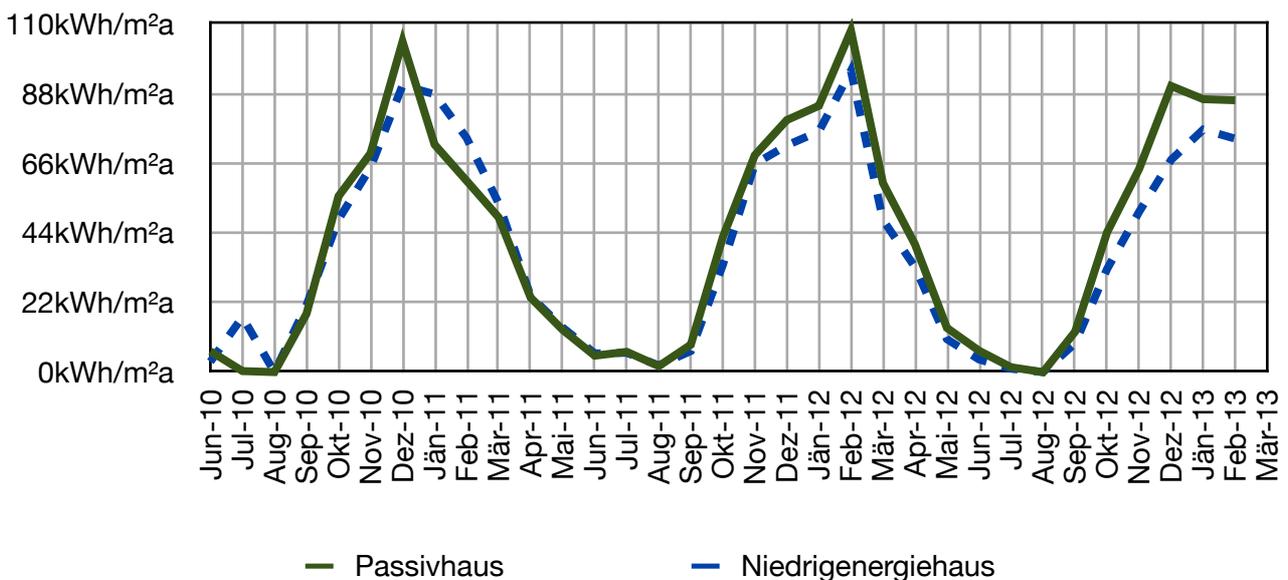


Abbildung 17. Monatsmittelwerte ($n=40$) des Heizwärmeverbrauchs ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$) im Passivhaus und im Niedrigenergiehaus während des gesamten Erfassungszeitraums.

Die Berechnung des Heizwärmebedarfs $Q_h = (Q_T + Q_V) - \eta \times (Q_s + Q_i)$ nach den Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik (Energieausweis für Wohngebäude) ergab nach dem Monatsbilanzverfahren bei einer Bruttogrundfläche von 1655,60 m² für das Passivhaus und einer Bruttogrundfläche von 1656,44 m² für das Niedrigenergiehaus am Standort Bregenz die folgenden Kennzahlen.

Tabelle 15. Energiekennzahlen für die Heizwärmebereitung laut Energieausweis 2008.

Passivhaus	kWh/m ² ·a	Niedrigenergiehaus	kWh/m ² ·a
Transmissionswärmeverluste Q_T	40,51	Transmissionswärmeverluste	52,53
Lüftungswärmeverluste Q_V	10,38	Lüftungswärmeverluste	27,88
Wärmeverluste	50,89	Wärmeverluste	80,41
Solare Wärmegewinne Q_s	57,59	Solare Wärmegewinne	51,94
Interne Wärmegewinne Q_i	26,27	Interne Wärmegewinne	26,29
Wärmegewinne	83,86	Wärmegewinne	78,23
Heizwärmebedarf Q_h	9,03	Heizwärmebedarf	33,23

Der ausschließlich für die Jahre 2011 und 2012 mittels Wärmemengenzähler registrierte Heizwärmeverbrauch betrug in den Wohnungen des Passivhauses durchschnittlich $M_P=39,9$ kWh/m²·a und in den Wohnungen des Niedrigenergiehauses durchschnittlich $M_N=36,3$ kWh/m²·a. Der statistische Vergleich des Heizwärmeverbrauchs beider Gebäudetypen nach diesem Berechnungsverfahren weist keinen signifikanten Unterschied aus ($p=0,205$), allerdings sollte der nach dem Monatsbilanzverfahren errechnete Heizwärmebedarf $HWB_P=9,03$ kWh/m²·a im Passivhaus und $HWB_N=33,23$ kWh/m²·a im Niedrigenergiehaus betragen.

Generell ist die Abweichung des gemessenen Heizwärmeverbrauchs vom errechneten Heizwärmebedarf jedoch nicht ungewöhnlich. Energetische Planungswerte werden teilweise sehr deutlich überschritten. Prozentual steigt die Abweichung mit besser werdendem Wärmeschutz. So beträgt sie bis zu 40% bei schlecht gedämmten Solarhäusern, bis zu 140% bei Niedrigenergiehäusern und bis zu 700% bei Passivhäusern (vgl. Erhorn, 2006). Zudem können Heizwärmeverbräuche einzelner Wohneinheiten im gleichen Gebäude nutzerbedingt erheblich voneinander abweichen. Auch die Klimabereinigung mittels Gradtagzahl beinhaltet ein großes Fehlerpotential (ebd.).

Trotz der bekannten Abweichungen zwischen errechnetem Heizwärmebedarf und realem Heizwärmeverbrauch sollte nachfolgend überprüft werden, wodurch die sehr deutliche Überschreitung des Heizwärmebedarfs im Passivhaus und die geringfügige Überschreitung des Heizwärmebedarfs im Niedrigenergiehaus bedingt ist.

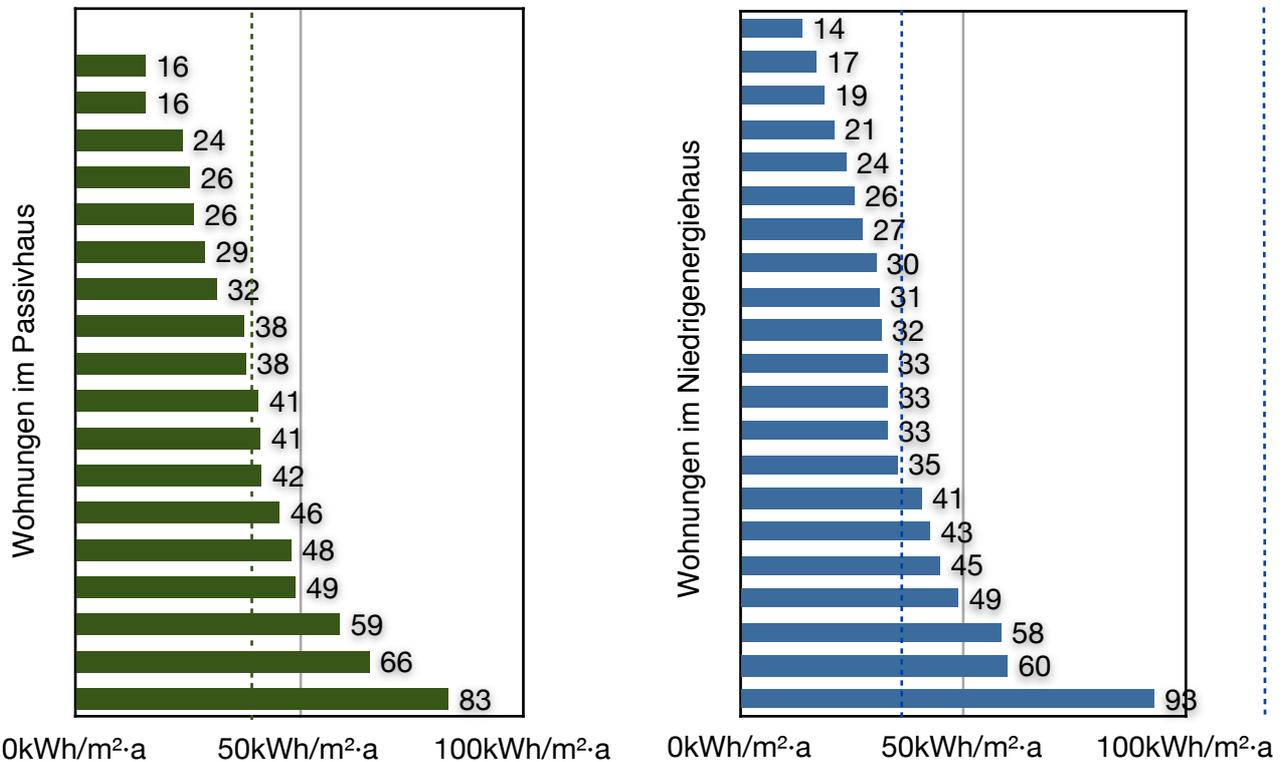


Abbildung 18. Durchschnittlicher Heizwärmeverbrauch (kWh/m²·a) im Passivhaus (links: $M_P=39,9$ kWh/m²·a) und im Niedrigenergiehaus (rechts: $M_N=36,3$ kWh/m²·a) während der Jahre 2011 und 2012.

In der nachfolgenden Tabelle sind die nach den Vorgaben der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik (Energieausweis für Wohngebäude) errechneten und die mittels Sensoren gemessenen bzw. aus den Messungen und Befragungen abgeleiteten Energiekennzahlen des Passivhauses und der Niedrigenergiehauses im Vergleich dargestellt. Es handelt sich um die Heiztage pro Jahr, die mittlere Rauminnentemperatur, das Ausmaß der Absenkung der Solltemperatur in der Nacht, die Außentemperatur im Jahresmittel und die daraus ermittelten Heizgradtage, die Anzahl der Personen pro Wohnung bzw. die Personenbelegung sowie Luftwechselrate jeweils für die Jahre 2011 und 2012. Die Luftwechselrate im Passivhaus entspricht der energieäquivalenten Luftmenge ohne Wärmerückgewinnung. Die Istwerte für die Personenbelegung und die Luftwechselrate wurden geschätzt. Diese Kennzahlen wurden zur Korrektur der mittels Wärmemengenzähler registrierten Heizwärmeverbräuche herangezogen.

Tabelle 16. Errechnete und gemessene Energiekennzahlen im Vergleich.

Soll- und Istwerte von 2011-2012	Passivhaus		Niedrigenergiehaus	
	Sollwerte	Istwerte	Sollwerte	Istwerte
Heiztage pro Jahr	88 d/a	240 d/a	164 d/a	224 d/a
Innentemperatur	20 °C	22,1 °C	20 °C	21,8 °C
Temperaturabsenkung	0 °C	1,5 °C	0 °C	1,2 °C
Außentemperatur Jahresmittel	9,3 °C	11,3 °C	9,3 °C	11,3 °C
Heizgradtage	3456 Kd	2920 Kd	3456 Kd	2920 Kd
Personenbelegung	33 m ² /P	60 m ² /P*	33 m ² /P	40 m ² /P*
Luftwechselrate	0,2 1/h	0,4 1/h*	0,4 1/h	0,4 1/h*

*Schätzwerte

Korrigiert man den mittels Wärmemengenzähler registrierten Heizwärmeverbrauch aus den Jahren 2011 und 2012 mit der Abweichung der Heiztage nach $HWV / Heiztage_{Ist} \cdot Heiztage_{Soll}$ so erhält man für die Wohnungen im Passivhaus durchschnittlich $M_P=14,4$ kWh/m²·a und für die Wohnungen Niedrigenergiehaus durchschnittlich $M_N=26,7$ kWh/m²·a (vgl. Loga, 2004).

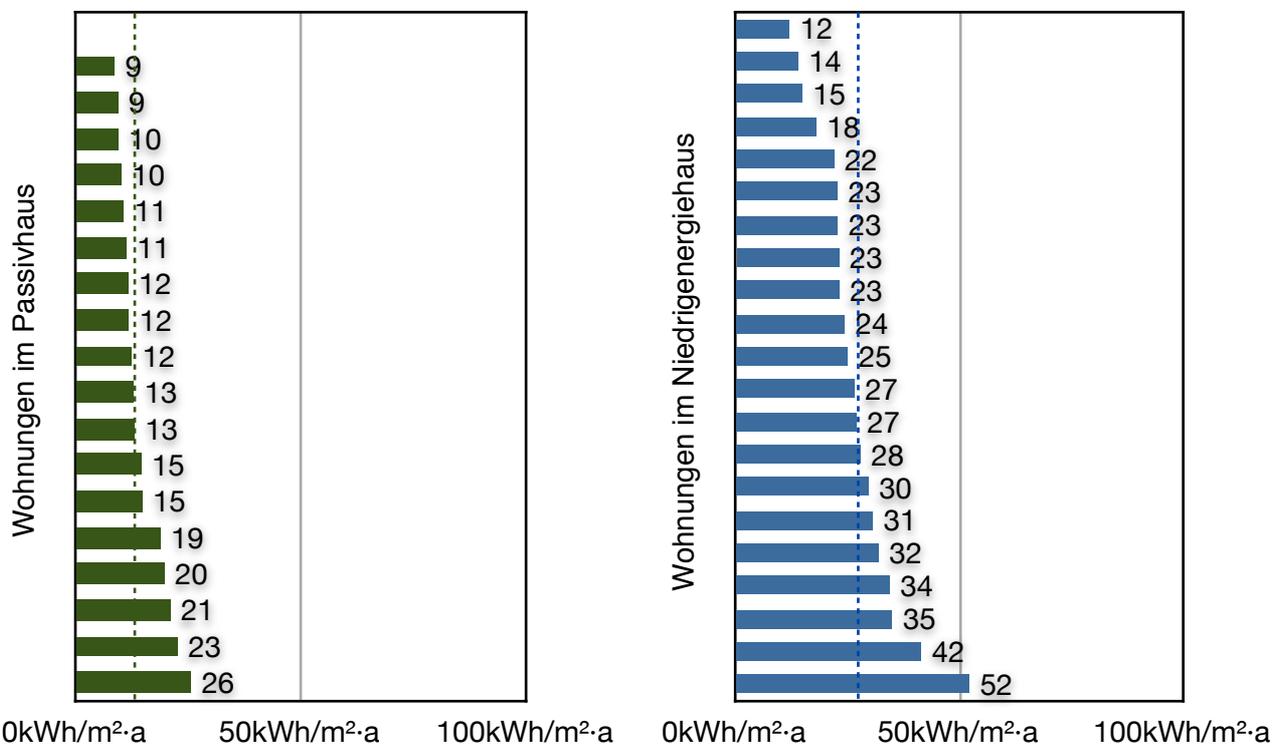


Abbildung 19. Mit den realen Heiztagen pro Jahr korrigierter Heizwärmeverbrauch (kWh/m²·a) im Passivhaus (links: $M_P=14,4$ kWh/m²·a) und im Niedrigenergiehaus (rechts: $M_N=26,7$ kWh/m²·a) während der Jahre 2011 und 2012.

Nach dieser Korrektur unterscheidet sich der Heizwärmeverbrauch beider Gebäudetypen statistisch signifikant voneinander ($p < 0,001$). Der Heizwärmeverbrauch für Wohnungen im Passivhaus liegt dennoch zirka 60% über dem Referenzwert und für Wohnungen im Niedrigenergiehaus zirka 20% unter dem Referenzwert. Im Niedrigenergiehaus wurde allerdings in einer Wohnung auch eine Elektroheizung im Bad zirka eine Stunde pro Tag genutzt.

Die Differenz zwischen Heizwärmebedarf (HWB) und Heizwärmeverbrauch (HWV) liegt vermutlich begründet in (a) dem Sommerheizbetrieb, (b) den höheren Temperaturen für Innenräume, (c) dem wärmeren Außenklima, (d) den Temperaturabsenkungen, (e) geringeren internen Wärmegewinnen und (f) größeren Lüftungswärmeverlusten.

(a) Die beobachtete hohe Zahl der Heiztage zeigt, dass die Heizung auch außerhalb der üblichen Heizzeit (1. Oktober bis 30. April) betrieben wurde (siehe auch die Darstellung der Messkurven im Anhang). Dementsprechend konnte beobachtet werden, dass in den Wohnungen die im Sommer das Fenster generell länger gekippt hielten auch ein größerer Heizwärmeverbrauch vorlag. Dieser Zusammenhang ist vermutlich auf die kälteren Sommertage beschränkt. Der Sommerheizbetrieb macht für die Wohnungen im Passivhaus durchschnittlich $M_P = 6,7 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ und für die Wohnungen im Niedrigenergiehaus durchschnittlich $M_N = 6,0 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ aus.

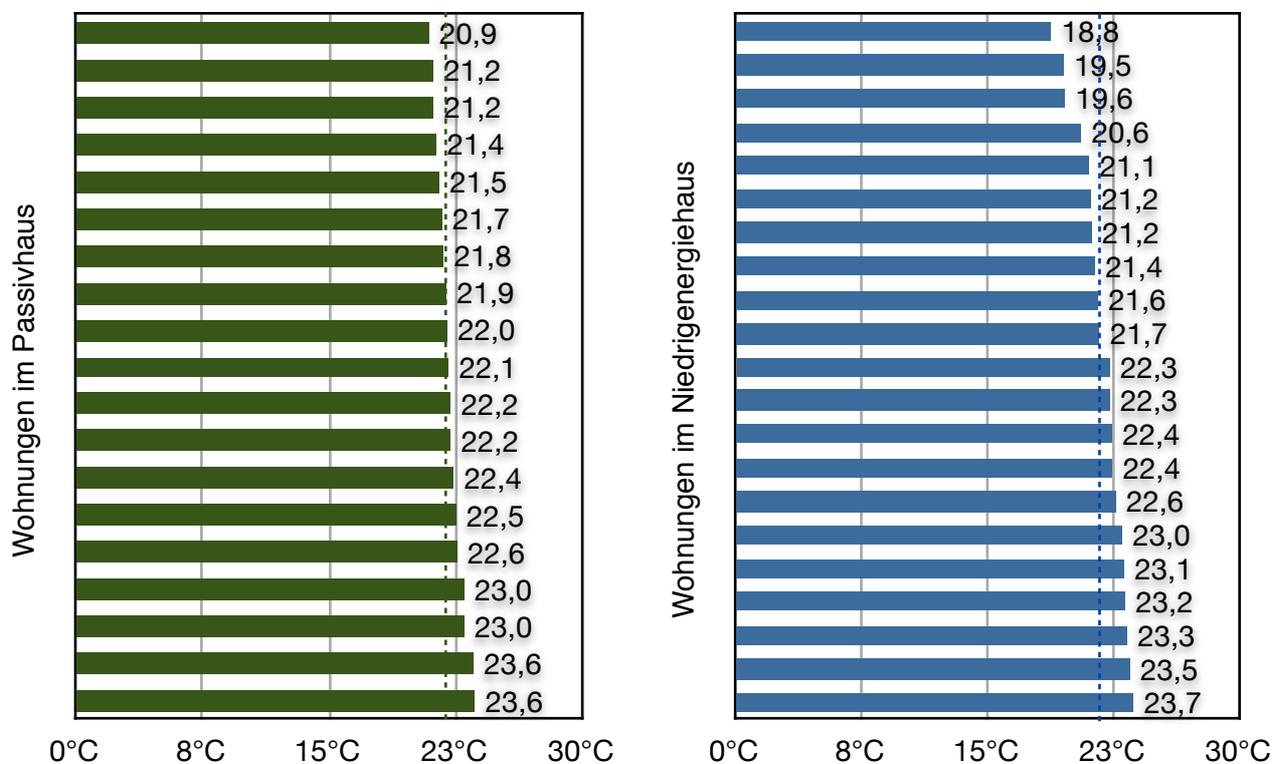


Abbildung 20. Durchschnittliche Raumtemperatur (°C) im Jahresmittel für alle Zimmer im Passivhaus (links: $M_P = 22,1 \text{ °C}$) und im Niedrigenergiehaus (rechts: $M_N = 21,8 \text{ °C}$) während der Jahre 2011 und 2012.

(b) Die gemittelte Temperatur in den Wohnungen des Passivhauses liegt mit $M_P=22,1\text{ °C}$ und im Niedrigenergiehaus mit $M_P=21,8\text{ °C}$ höher als die für die Berechnung angenommene Soll-Innentemperatur von 20 °C . Der bei konventionellen Gebäuden angesetzte 6% höhere Heizwärmeverbrauch pro Grad Temperaturerhöhung kann im Passivhaus allerdings nicht angesetzt werden. Das Hochbauamt der Stadt Frankfurt stellt fest, dass in Passivhäusern ein Grad Temperaturerhöhung einen höheren Heizwärmeverbrauch von zirka 15% ergibt. Damit wird für Wohnungen im Passivhaus ein um zirka $13\text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ höherer Heizwärmeverbrauch angenommen und bei Wohnungen im Niedrigenergiehaus ein um zirka $4\text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ höherer Heizwärmeverbrauch.

(c) Die Außentemperatur war im Jahresmittel von 2011 und 2012 um 2 °C höher als im Referenzklima. Die Witterungsbereinigung mit einem Klimakorrektureffektor = $\text{Heizgradtage}_{\text{Referenzjahr}} / \text{Heizgradtage}_{2011/2012}$ ergibt dementsprechend einen um 18% verringerten Heizwärmeverbrauch (vgl. Schöngrundner, 2002). Bei einem Jahresklima ähnlich dem Referenzklima hätten demnach Wohnungen im Passivhaus einen um $1,7\text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ höheren Heizwärmeverbrauch und Wohnungen Niedrigenergiehaus einen um $6,1\text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ höheren Heizwärmeverbrauch.

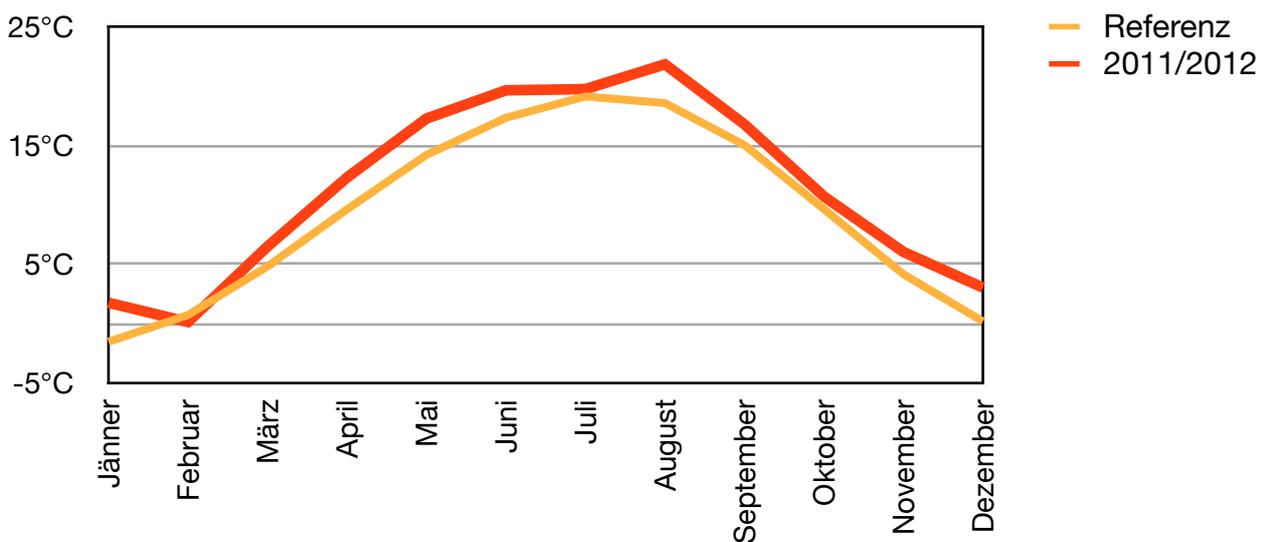


Abbildung 21. Jahresverlauf der Monatsmittelwerte für die gemessene Außentemperatur ($^{\circ}\text{C}$) in den Jahren 2011 und 2012 ($M=11,3\text{ °C}$) im Vergleich zur Referenzaußentemperatur ($M=9,3\text{ °C}$).

(d) In der Berechnung des Heizwärmebedarfs ist keine Temperaturabsenkung ausgewiesen. Grundsätzlich gilt, dass bei einem gut wärmegeämmten Haus mit Fußbodenheizung der Einspareffekt der Nachtabsenkung sehr gering ist. Nachtabsenkungen in höherem Ausmaß sind bei Fußbodenheizung wegen der längeren Aufheizzeiten nicht sinnvoll. Bei 5 °C Nachtabsenkung wird sogar von einer Auskühlung der Gebäudehülle ausgegangen (Schmid, 2013). Die Temperaturabsenkung wirkt sich

auch negativ auf die Luftfeuchtigkeit aus (Peper et al., 2011). In den untersuchten Wohnungen zeigt sich, dass bei stärkerer Temperaturabsenkung auch die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit in den Räumen geringer ist ($p < 0,010$). Die Messergebnisse ergeben im Passivhaus eine durchschnittliche Absenkung der Sollraumtemperatur um $M_P = 1,5 \text{ °C}$ und im Niedrigenergiehaus um $M_N = 1,2 \text{ °C}$. Damit muss in beiden Gebäudetypen von einem höheren Heizwärmeverbrauch ausgegangen werden als er durch den errechneten Heizwärmebedarf zu erwarten ist.

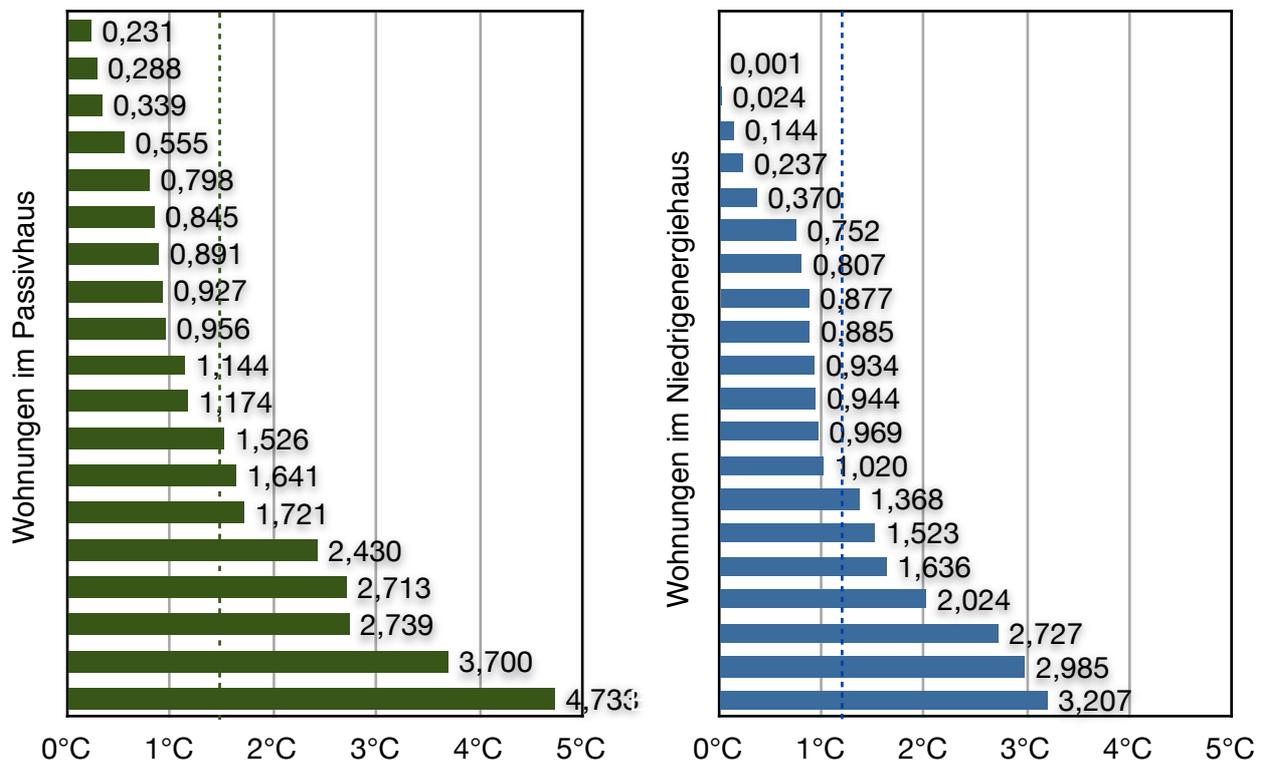


Abbildung 22. Durchschnittliche Absenkung der Sollraumtemperatur (°C) pro Tag für alle Zimmer im Passivhaus (links: $M_P = 1,5 \text{ °C}$) und im Niedrigenergiehaus (rechts: $M_N = 1,2 \text{ °C}$) während der Jahre 2011 und 2012.

(e) Die Berechnung der internen Wärmegewinne geht von einem Wärmegewinn je Person mit etwa $2 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ aus, jedoch nur bei einer Wohnungsbelegung von 33 m^2 pro Person und einem Verfügbarkeitsfaktor von 55%. Die Wohnungsbelegung im Passivhaus beträgt jedoch zirka 60 m^2 pro Person und im Niedrigenergiehaus zirka 40 m^2 pro Person. In beiden Gebäuden ist der Verfügbarkeitsfaktor geringer als 55 Prozent. Aus diesem Grund wird im Vergleich zu den Referenzwerten ein höherer Heizwärmeverbrauch von $1,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ pro Wohnung im Passivhaus und $0,5 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ pro Wohnung im Niedrigenergiehaus geschätzt.

(f) In der Berechnung des Heizwärmebedarfs wurde für das Passivhaus eine Luftwechselrate von $LR_P = 0,2 \text{ 1/h}$ mit Hilfe kombinierter Be- und Entlüftung angenommen (energieäquivalente Luftmenge ohne Wärmerückgewinnung) und für das Niedrigenergiehaus eine Luftwechselrate von $LR_N = 0,4 \text{ 1/h}$ mittels Lüften über manuelle

Fensteröffnung. BewohnerInnen des Passivhauses betrieben die kombinierte Be- und Entlüftungsanlage nach eigenen Angaben im Jahresdurchschnitt mit einer Leistung von $LR_M=0,4$ 1/h. Daraus ergibt sich für Wohnungen im Passivhaus eine deutlich höhere Luftwechselrate als der Referenzwert und damit eine Zunahme des Heizwärmeverbrauchs um zirka $10 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$. Für das Niedrigenergiehaus wurde die vorab geschätzte Luftwechselrate von $LR_N=0,4$ 1/h angenommen, wenngleich davon auszugehen ist, dass die Belüftung über manuelle Fensteröffnung schlussendlich geringer ausfiel. Auch im Passivhaus erfolgt eine zusätzliche Belüftung über manuelle Fensteröffnung.

Die bei der Begründung der Abweichung von den energetischen Planungswerten angegebenen Korrekturwerte für den Heizwärmeverbrauch sind teilweise Schätzwerte. Rechnet man diese Schätzwerte auf den gemessenen Heizwärmeverbrauch auf, dann erhält man für Wohnungen im Passivhaus einen korrigierten Heizwärmeverbrauch von **$HWV_P=10,4 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$** und für Wohnungen im Niedrigenergiehaus einen korrigierten Heizwärmeverbrauch von **$HWV_N=32,9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$** . Das Passivhaus liegt damit im Bereich des Referenzwerts der Richtlinie 6 Ausgabe April 2007 "Energieeinsparung und Wärmeschutz" des Österreichischen Instituts für Bautechnik, und das Niedrigenergiehaus erzielt nach rechnerischer Korrektur sogar einen deutlich geringeren Heizwärmeverbrauch als es die genannte Richtlinie erfordern würde.

16. Diskussion

Was unternehmen Menschen gewöhnlich, um den Komfort in ihren Wohnungen zu steigern bzw. aufrechtzuerhalten? Sie sorgen für Frischluft durch manuelle Fensterlüftung oder automatische Be- und Entlüftung, sie regulieren die Raumtemperatur mittels Heizen, Kühlen oder Beschatten, sie schaffen verschiedene Lichtsituationen mittels Kunstlicht oder Besonnung, sie verändern den Platzraum in ihrer Wohnung mittels gezielter Abwesenheiten, Besuche oder Mobiliar-Umplatzierung, und sie gestalten in unregelmäßigen Abständen die Raumfarbenausstattung durch Verwendung von Decken, Überzügen, Vorhänge oder Bildern. Am wichtigsten scheint den BewohnerInnen dieser Studie für die Aufrechterhaltung des Wohnkomforts die Raumluftqualität zu sein (Luftfeuchte, Kohlendioxid, Gerüche) gefolgt von der Raumtemperatur (Luft- und Oberflächentemperaturen). Betrachtet man beim Passivhaus den Einfluss des genannten Benutzerverhaltens auf den Heizwärmeverbrauch so zeigt sich im Vergleich zum Energieausweis, dass die Änderung der Raumtemperaturen ca. 40% des Mehrverbrauch ausmachen, der Heizbetrieb im Sommer ca. 20% der Abweichung, die unverhältnismäßige Raumlüftung ca. 30% der Abweichung und die Personenbelegung der Wohnung ca. 5% Abweichung.

Nach Rohregger et al. (2004) ist das Komfortargument für den Marktdurchbruch des Passivhauskonzepts von eminenter Bedeutung. Die Erwartungen hinsichtlich eines höheren Wohnkomforts im Passivhaus im Vergleich zum Niedrigenergiehaus konnten

allerdings nicht bestätigt werden, denn in beiden Gebäudetypen ist die subjektive Wohnkomforteinschätzung durch die Betroffenen gut bis sehr gut. Einige Annahmen, die generell für das Passivhaus gemacht werden, trafen für das untersuchte Passivhaus nicht ausnahmslos zu (z.B. konstante Raumlufttemperatur), hatten keine entscheidende Rolle bei der Einschätzung (z.B. Oberflächentemperaturen), konnten logischerweise nur zeitweise erreicht werden (z.B. Schall- und Stechmückenschutz bei geschlossenen Fenstern) oder sie wurden in beiden Gebäudetypen vergleichbar gut erreicht (z.B. Kohlendioxid). Es gibt auch Messgrößen, die in beiden Gebäudetypen zeitweise außerhalb der objektiven Behaglichkeitsspanne liegen (z.B. Raumluftfeuchtigkeit), die aber keinen negativen Einfluss auf die subjektive Wohnkomforteinschätzung durch die BewohnerInnen haben. Insgesamt sind die subjektiven Komforteinschätzungen und objektiven Indikatoren für Wohnkomfort in beiden Gebäudetypen auf einem sehr hohen positiven Niveau, so dass sich tendenzielle Unterschiede nur in einem sehr kleinen obersten Urteilsbereich ausmachen lassen. Größere Unterschiede ließen sich vermutlich durch ein anderes Lüftungsverhalten erzielen, denn das Nutzungsverhalten der BewohnerInnen beider Gebäudetypen unterscheidet sich nur in diesem Aspekt voneinander. Während die BewohnerInnen des Niedrigenergiehauses sich diesbezüglich weitgehend erwartungsgemäß verhalten, weichen die BewohnerInnen des Passivhauses in einige Aspekte des Lüftungsverhaltens (z.B. Luftwechselrate, Fensteröffnung) von den Erwartungen ab.

Auch die Auswertung des Heizwärmeverbrauchs zeigt, dass die energetischen Planungswerte nur bei konsequenter Einhaltung des erwarteten Benutzerverhaltens erreicht werden. Diese Befunde decken sich mit den Ergebnissen aus anderen Untersuchungen zum Heizwärmeverbrauch in Passivhäusern (vgl. Peper et al., 2011). Um den errechneten Heizwärmebedarf erreichen zu können, sollten BewohnerInnen in der Lage sein, die Lüftungsanlage bedarfsgerecht zu steuern (z.B. reduzierte Luftwechselrate bei Abwesenheit) und sie sollten in der Lage sein, die Heizung im Sommer abzuschalten bzw. auf Sommerbetrieb umzustellen, denn die Heizgrenze in Bezug auf die Außentemperatur kann auch im Sommer gelegentlich unterschritten werden (z.B. an kühlen Sommermorgen). Wenngleich man bei dem in dieser Studie verwendeten dezentralen Gerät für kontrollierte Be- und Entlüftung drei Lüfterstufen einstellen kann (Automatik und Handbetrieb) und das Gerät auch ausgeschaltet werden kann, wird es doch zu 90% der Zeit auf Lüfterstufe 1 und 2 betrieben. Weiters wird empfohlen, dass mit Temperaturerhöhungen und Temperaturabsenkungen behutsam umgegangen werden sollte. BewohnerInnen von Passivhäusern dürfen nicht davon ausgehen, dass die Raumtemperaturen von Witterungseinflüssen unbeeinflusst bleiben. Durch die höheren solaren Wärmegewinne heizt ein Passivhaus mehr auf. Wenn z.B. durch die Sonneneinstrahlung hohe Raumtemperaturen erzeugt wurden (z.B. 25 °C) und darauf ein Schlechtwettertag folgt, dann können z.B. auch 22 °C subjektiv als zu kalt erscheinen. Ungeeignet ist, wenn die erhöhten Raumtemperatur durch manuelles Fensteröffnen und die geringeren Temperaturen durch Soll-Temperaturerhöhung kompensiert werden. Auch diese Studie konnte zeigen, dass nur bei Einhaltung dieser Nutzungsweise die hohen

Anforderungen an das Passivhaus hinsichtlich des Heizwärmeverbrauchs erfüllt werden können.

Die Ansprüche an den Wohnkomfort sind im Bauwesen im letzten Viertel des vergangenen Jahrhunderts enorm gestiegen und haben heute ein sehr hohes Niveau erreicht (vgl. Bachmann & Lange, 2012). Obwohl der zeitgemäße Wohnkomfort auch eine sehr subjektive Größe ist, die z.B. Barrierefreiheit, Raumgröße, Ausstattung, ökologische Materialien, natürliche Belichtung/Besonnung, Lüftung und einen persönlichen Außenbereich mit Bepflanzung beinhaltet, ist man mit Hilfe des Gebäudeausweises in der Lage viele dieser Aspekte zu beschreiben und zu bewerten. Dennoch erscheint die Beschreibung nicht vollständig zu sein. So ist etwa die Personenbelegung der Privatwohnungen ein weiterer Aspekt worin sich die untersuchten Gebäudetypen voneinander unterscheiden. Von einer Überbelegung spricht man dann, wenn die Zahl der BewohnerInnen größer ist als die Anzahl der Wohnräume, dagegen liegt eine Unterbelegung vor, wenn pro Person mehr als zwei Wohnräume existieren. Letzteres trifft auf das untersuchte Passivhaus teilweise zu, d.h. der Anteil an Wohnfläche pro Person ist in dem untersuchten Passivhaus relativ hoch. Bei dem geringen Heizenergiebedarf der Passivhäuser ist die Personenbelegung, neben dem Wohnkomfort, denn auch eine entscheidende Einflussgröße für den Energieverbrauch. Der Trend hin zu einer geringeren Belegungsdichte kennzeichnet zu einem entscheidenden Maß den steigenden Anspruch an den subjektiven Wohnkomfort. Im derzeitigen Gebäude- und Energieausweis sind also noch einige Unwägbarkeiten enthalten. Diese umfasst die Klimadaten (z.B. Temperatur, Strahlungsintensität), die städtebauliche Verschattung, die Bilanzinnentemperaturen (in der Norm 20°C bei Wohnräumen), die Belegungsdichte, der Luftwechsel (z.B. Lüfterstufenwahl, Fensterlüftung) und nicht zuletzt der Nutzenergiebedarf (z.B. Warmwasser, Haushaltsstrom, Prozessenergien). Dies kann zu Abweichungen vom Nachweis führen, bei der Ausführung und bei der Nutzung (vgl. Moesecke, 2011).

17. Literaturverzeichnis

- Bachmann, P. & Lange, M. (2012). Qualitätskriterien für Gebäude. In: Bachmann P. & M. Lange (Hrsg.), Mit Sicherheit gesund bauen. Fakten, Argumente, Strategien für das gesunde Bauen und Wohnen, S. 53-68. Berlin: Springer.
- Buber, R., Gadner, J. & Höld, R. (2007). Wohnen in Passivhäusern. Der Einsatz des Fokusgruppeninterviews zur Identifikation von Wohlfühlkomponenten. In R. Buber & H. H. Holzmüller (hrsg.), Qualitative Marktforschung, S. 825-845. Wien: Springer.
- Danner, M. (2003). Nutzererfahrung in der Passshaussiedlung "Lummerlund". Ergebnisse einer sozialwissenschaftlichen Evaluation. *Energieeffizientes Bauen*, 4/3, 10-15.
- DIN (2011). DIN EN 12464 Beleuchtung von Arbeitsstätten. Berlin: Beuth-Verlag.
- Erhorn, H. (2006). Zur Genauigkeit der Bewertungsmethoden von Energieausweisen für bestehende Wohngebäude. Bericht WB 129/2006 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.

- Feist, W. (2001) Energieeffizienz. In E. Rebhan (Hrsg.). Energiehandbuch: Gewinnung, Nutzung, Wandlung und Nutzung von Energie. Heidelberg: Springer.
- Fellner, M. & Lipp, B. (2007). Gebäudebewertung in Österreich, IBO Magazin, 7, 5-8.
- IBO (Hrsg.) (2004). Gesunde Raumlufte. Schadstoffe in Innenräumen - Prävention und Sanierung. Wien: IBO-Verlag.
- IBO (2013). IBO Ökopass. URL: www.ibo.at/
- IG-Passivhaus Österreich (2013). Was ist ein Passivhaus. URL: www.igpassivhaus.at/passivhaus/was-ist-ein-passivhaus/
- Lipp, B. (2004). Innenraum und Gesundheit. In IBO (Hrsg.). Gesunde Raumlufte. Schadstoffe in Innenräumen - Prävention und Sanierung, S. 37-42. IBO (Hrsg.) (2004). Gesunde Raumlufte. Schadstoffe in Innenräumen - Prävention und Sanierung. Wien: IBO-Verlag.
- Loga, T. (2004). Die Heizperiodenbilanz im Vergleich zum Monatsbilanzverfahren Abschätzung der Heizgrenztemperaturen und Bilanzzeiten für das Heizperiodenbilanzverfahren nach EN 832 / DIN V 4108-6. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt.
- Maas, S., Waldmann, D., Zürbes, A. & Scheuren, J.-J. (2007). Wie viel Energie der Luxemburger wirklich verbraucht. *Revue Technique Luxembourgeoise*, 4, 211-216.
- Neunteufel, R., Richard, L. & Perfler, R. (2012). Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Auswertung empirischer Daten zum Wasserverbrauch. Bericht für das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Oberfeld, G. (2008). Informationsmappe Elektrosmog. URL: www.salzburg.gv.at/infomappe-elektrosmog-2.pdf
- ÖGNB (2010). Total Quality Building (TQ). URL: www.tq-building.org
- Peper, S., Schieders, J. & Feist, W. (2011). Monitoring Altbausanierung zum Passivhaus. Verbrauch, Raumluftefeuchtigkeit, Kellerfeuchte. Messtechnische Untersuchungen an den Sanierungsbauten Tevestraße Frankfurt a. M. Bericht für das Hessische Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- Rohregger, G., Lipp, B., Lackner, H. K., Moser, M., Buber, R., Gardner, J. & Waltjen, T. (2004). Behagliche Nachhaltigkeit. Untersuchungen zum Behaglichkeits- und Gesundheitswert von Passivhäusern. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie "Haus der Zukunft".
- Schmid, M. (2013). Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude: Grundlagen, Lösungsansätze, Beispiele. Berlin: Springer.
- Schneider, U., Birnbauer, G., Brakhan, F., Zelger, T., Haas, C., Pokorny, K. & Berger, M. (2006). Grünes Licht. Licht, Luft, Freiraum und Gebäudebegrünung im großvolumigen Passivhauswohnbau. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie "Haus der Zukunft".
- Schöngrundner, K. (2002). Heizgradtagbereinigung des Heizenergieeinsatzes. Projektbericht im Auftrag der Stadt Graz.
- Seefeldt, F., Wünsch, M., Michelsen, C., Baumgartner, W., Ebert-Bolta, O., Matthes, U., Leybold, P. & Herz, T. (2006). Potentiale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklung. Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

- Smutny, R., Trebersprung, M. & Oberhuber, A. (2008). Nachhaltigkeits-Monitoring Molkereistraße. Wissenschaftliche Evaluierung von Nutzerzufriedenheit, Energieperformance und Klimaschutzbeitrag von gemeinnützigen Wiener Wohnbauten in Passivhausstandard am Beispiel des Passivhaus-Studentenheims Molkereistraße in Wien. Bericht der Universität für Bodenkultur Wien.
- Streicher, W., Mach, T., Schweyer, K., Heimrath, R., Kouba, R., Thür, A., Jähnig, D., Bergmann, I., Schusek-Berger, J., Rohracher, H. & Krapmeier, H. (2004). Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie "Haus der Zukunft".
- Thür, G., Roder, A., Summer, M., Ritsch, W. & Stadelmann, C. (2006). Nachhaltige Wohnungsangebote – individuellen und gemeinschaftlichen Mehrwert schaffen. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie "Haus der Zukunft".
- Umweltbundesamt (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt; Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, 11, 1358-1369.
- van Moeseke, G. (2011). Sustainable architecture and the Passive House concept: achievements and failures on energy matters. Paper presented at 27th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Wagner, W. & Mauther, F. (2008). Energietechnische und baubiologische Begleituntersuchung der Bauprojekte Passivhauswohnanlage Roschegasse. Projektbericht im Rahmen der Programmlinie "Haus der Zukunft".

Kontaktdaten

alpS GmbH

Dr. Paul Stampfl

Arbeitsbereichsleiter Klimawandelanpassung

Grabenweg 68

A-6020 Innsbruck

T 0699 17365370

E stampfl@alps-gmbh.com

Rhomberg Bau GmbH

Mag. Matthias Moosbrugger

Leiter Marketing & Kommunikation

Mariahilfstraße 29

6900 Bregenz

T 05574 403-195

E matthias.moosbrugger@rhomberg.com

FH Vorarlberg - UCT Research

Prof. Dr. Guido Kempter

Leiter UCT Research

Sägerstraße 4

6850 Dornbirn

T 05572 792 7300

E guido.kempter@fhv.at